

ΨΗΦΙΑΚΗ ΤΗΛΕΟΡΑΣΗ

Ανδρέας Εμμ. Παπαδάκης



Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά
Συγγράμματα και Βοηθήματα
www.kallipos.gr

HEALINK
Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
ανάπτυξη των ατόμων, της κοινωνίας,
της χώρας
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

ΑΝΔΡΕΑΣ ΕΜΜ. ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ
Αναπλ. Καθηγητής ΑΣΠΑΙΤΕ, Δρ. Μηχ. ΕΜΠ

ΨΗΦΙΑΚΗ ΤΗΛΕΟΡΑΣΗ

Επίγεια Ψηφιακή Τηλεόραση



Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά
Συγγράμματα και Βοηθήματα
www.kallipos.gr

ΨΗΦΙΑΚΗ ΤΗΛΕΟΡΑΣΗ

Επίγεια Ψηφιακή Τηλεόραση

Συγγραφή

Ανδρέας Εμμ. Παπαδάκης (Δρ. Μηχ. ΕΜΠ)

Κριτικός αναγνώστης

Νικόλαος Μήτρου (Καθ. ΕΜΠ)

Συντελεστές έκδοσης

Γλωσσική Επιμέλεια: Βασίλειος Τσιάμης

Γραφιστική Επιμέλεια: Μιχάλης Φωτεινόπουλος

ISBN: 978-960-603-454-1

Copyright © ΣΕΑΒ, 2015



Το παρόν έργο αδειοδοτείται υπό τους όρους της άδειας Creative Commons Αναφορά Δημιουργού - Μη Εμπορική Χρήση - Παρόμοια Διανομή 3.0. Για να δείτε ένα αντίγραφο της άδειας αυτής επισκεφτείτε τον ιστότοπο <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/gr/>

ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου

www.kallipos.gr

Στη σύζυγό μου Ειρήνη

Πίνακας περιεχομένων

Πίνακας περιεχομένων.....	4
Πίνακας Συντομεύσεων- Ακρωνύμια	11
Πίνακας Όρων – Αντιστοιχίσεων	14
Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή	17
1.1 Εισαγωγή	17
1.2 Τεχνολογικές Περιοχές	18
1.3 Δομή Συγγράμματος και Βασικές Πηγές	20
1.3.1 Δομή Συγγράμματος	20
1.3.2 Βασικές Πηγές.....	21
Βιβλιογραφία/Αναφορές	22
Κεφάλαιο 2 – Παραγωγή Τηλεοπτικού Σήματος.....	23
2.1 Εισαγωγή	24
2.2 Περιγραφή Εικόνας	24
2.2.1. Αναπαράσταση Οπτικής Πληροφορίας	24
2.2.1.1 Τριχρωματική Όραση.....	24
2.2.1.2 Φωτεινότητα και Χρωμοδιαφορές	25
2.3 Δημιουργία Σήματος στην Αναλογική Τηλεόραση	28
2.3.1 Διαπλεγμένη Σάρωση	28
2.3.2 Παλμοί Οριζόντιας και Κατακόρυφης Επιστροφής	29
2.3.2.1 Δεδομένα εντός του Παλμού Κατακόρυφης Επιστροφής	31
2.3.3 Συστήματα Διαχείρισης Χρώματος.....	32
2.4 Δημιουργία Ψηφιακού Σήματος	34
2.4.1 Φιλτράρισμα και Δειγματοληψία	34
2.4.2 Κβαντισμός.....	35
2.4.3 Υποδειγματοληψία Χρώματος.....	36
2.4.4 Δομή Βίντεο	37
2.5 Σήμα Υψηλής Ευκρίνειας	38
Βιβλιογραφία/Αναφορές	42
Κριτήρια αξιολόγησης.....	43
Κριτήριο αξιολόγησης 1.....	43
Απάντηση/Λύση	43
Κριτήριο αξιολόγησης 2.....	43

Απάντηση/Λύση	44
Κεφάλαιο 3 – Συμπύεση Βίντεο.....	46
3.1 Εισαγωγή	47
3.2 Μηχανισμοί Συμπύεσης	47
3.3 Προετοιμασία Σήματος Βίντεο	49
3.3.1 Μείωση Ακρίβειας Βίντεο.....	49
3.3.2 Διάστημα Οριζόντιων και Κατακόρυφων Παλμών	50
3.3.3 Υποδειγματοληψία Χρώματος.....	50
3.3.4 Περιορισμός Ρυθμού.....	51
3.4 Εκμετάλλευση Χρονικού Πλεονασμού.....	51
3.5 Εκμετάλλευση Χωρικού Πλεονασμού.....	56
3.5.1 Διακριτός Μετασχηματισμός Συνημιτόνου	57
3.5.1.1 Μονοδιάστατος ΔΜΣ.....	57
3.5.1.2. Δισδιάστατος ΔΜΣ	59
3.5.2 Χρήση ΔΜΣ.....	60
3.5.2.1 Πρακτικές Υπολογισμού	61
3.5.2.2 Προσαρμογή Επιπέδου Ποιότητας.....	62
3.5.3 Σάρωση κατά Ζιγκ Ζαγκ.....	63
3.5.4 Παράδειγμα	63
3.5.5 Κωδικοποίηση Μήκους Διαδρομής	64
3.6 Εκμετάλλευση Στατιστικού Πλεονασμού.....	66
3.6.1 Ομοιόμορφη Κωδικοποίηση	66
3.6.2 Κωδικοποίηση Huffman	66
3.6.3 Παράδειγμα	68
3.7 Προφίλ και Επίπεδα	70
Βιβλιογραφία/Αναφορές	73
Κριτήρια αξιολόγησης.....	74
Κριτήριο αξιολόγησης 1	74
Απάντηση/Λύση	74
Κριτήριο αξιολόγησης 2.....	74
Απάντηση/Λύση	74
Κριτήριο αξιολόγησης 3.....	75
Απάντηση/Λύση	75
Κεφάλαιο 4 – Συμπύεση Ήχου	77
4.1 Εισαγωγή	78
4.2 Ψηφιοποίηση του Ήχου.....	79
4.2.1 Βασικά Στάδια Ψηφιοποίησης.....	79
4.2.2 Ψηφιοποίηση Στερεοφωνικού Ήχου	80

4.2.3 Πολυκαναλικός Ήχος.....	80
4.3 Συμπύεση Ήχου	81
4.3.1 Ακουστικό Φάσμα και Ευαισθησία.....	81
4.3.2 Επικάλυψη.....	82
4.3.2.1 Επικάλυψη στο Πεδίο της Συχνότητας.....	82
4.3.2.2 Επικάλυψη στο Πεδίο του Χρόνου	83
4.3.3 Κβαντισμός και Θόρυβος Κβαντισμού.....	84
4.4 Κωδικοποίηση Ήχου	84
4.4.1 Κωδικοποίηση Υπομπάντας.....	85
4.4.1.1 Παράδειγμα Επικάλυψης	86
4.4.1.2 Δημιουργία Πλαισίου.....	87
4.4.2 Κωδικοποίηση Μετασχηματισμού	88
4.4.3 Υβριδικό Μοντέλο Κωδικοποίησης	89
4.5 Πρότυπα Κωδικοποίησης Ήχου MPEG	89
Βιβλιογραφία/Αναφορές	91
Κριτήρια αξιολόγησης.....	92
Κριτήριο αξιολόγησης 1	92
Απάντηση/Λύση	92
Κριτήριο αξιολόγησης 2.....	92
Απάντηση/Λύση	93
Κεφάλαιο 5 – Συρμοί Μεταφοράς	94
5.1 Εισαγωγή	95
5.2 Στοιχειώδεις Ροές και Πολυπλεξία.....	96
5.2.1 Στοιχειώδεις Ροές και Τεμαχισμός σε Πακέτα.....	96
5.2.2 Πακέτα PES.....	96
5.3 Πολυπλεξία	98
5.4 Δομή Πακέτων Συρμού Μεταφοράς και Πίνακες Πληροφοριών	101
5.4.1 Πακέτα Συρμού Μεταφοράς.....	101
5.4.2 Πίνακες Πληροφοριών	103
5.4.2.1 Πίνακες Πληροφορίας Προγράμματος.....	103
5.4.2.2 Μηχανισμός Εντοπισμού Στοιχειωδών Ροών	104
5.4.2.3 Ιδιωτικοί Πίνακες	105
5.4.3 Κρυπτογραφημένα Προγράμματα	106
5.5 Συγχρονισμός και Εντοπισμός Σφαλμάτων	107
5.5.1 Συγχρονισμός Κωδικοποιητή – Αποκωδικοποιητή	107
5.5.2 Εντοπισμός Σφαλμάτων	108
5.6 Παραδείγματα	108
5.6.1 Εντοπισμός Συρμού Μεταφοράς	108

5.6.2 Ανάλυση Πακέτων Συρμού Μεταφοράς	112
Βιβλιογραφία/Αναφορές	113
Κριτήρια αξιολόγησης.....	114
Κριτήριο αξιολόγησης 1	114
Απάντηση/Λύση	114
Κριτήριο αξιολόγησης 2.....	114
Απάντηση/Λύση	114
Κριτήριο αξιολόγησης 3	115
Απάντηση/Λύση	115
Κριτήριο αξιολόγησης 4.....	116
Απάντηση/Λύση	116
Κριτήριο αξιολόγησης 5.....	116
Απάντηση/Λύση	116
Κεφάλαιο 6 – Κωδικοποίηση Καναλιού	118
6.1 Εισαγωγή	119
6.2 Τυχαιοποίηση - Διασπορά Ενέργειας	121
6.2.1 Βαθμίδα Τυχαιοποίησης.....	121
6.2.2 Παράδειγμα	123
6.3 Εξωτερική Κωδικοποίηση	124
6.3.1 Εξωτερική Κωδικοποίηση	124
6.3.1.1 Κωδικοποίηση.....	125
6.3.1.2 Αποκωδικοποίηση.....	126
6.3.2 Παραδείγματα	126
6.3.2.1 Χρήση κώδικα για κωδικοποίηση RS.....	126
6.3.2.2 Δημιουργία μοντέλου για υλοποίηση RS.....	127
6.4 Εξωτερική Διεμπλοκή	128
6.4.1 Εξωτερική Διεμπλοκή	129
6.4.2 Εξωτερική Απεμπλοκή.....	131
6.4.3 Παραδείγματα	132
6.4.3.1 Απλό παράδειγμα διεμπλοκής - απεμπλοκής.....	132
6.4.3.2 Παράδειγμα στο Matlab.....	132
6.4.3.3 Παράδειγμα στο Simulink.....	133
6.5 Εσωτερική Κωδικοποίηση.....	134
6.5.1 Εσωτερική Κωδικοποίηση.....	134
6.5.1.1 Παράδειγμα Συνελκτικού Κωδικοποιητή	135
6.5.1.2 Συνελκτικός Κωδικοποιητής Προτύπου του ETSI.....	138
6.5.2 Διάτρηση.....	140
6.5.3 Παραδείγματα	141

6.6 Εσωτερική Διεμπλοκή.....	141
6.6.1 Αντιστοίχιση bits σε επιμέρους ροές	142
Βιβλιογραφία/Αναφορές	144
Κριτήρια αξιολόγησης.....	145
Κριτήριο αξιολόγησης 1	145
Απάντηση/Λύση	145
Κριτήριο αξιολόγησης 2	145
Απάντηση/Λύση	145
Κριτήριο αξιολόγησης 3	145
Απάντηση/Λύση	145
Κεφάλαιο 7 – Μετάδοση	146
7.1 Εισαγωγή	147
7.2 Αναλογική Μετάδοση.....	147
7.2.1 Ασπρόμαυρη Τηλεόραση.....	148
7.2.1.1 Διαμόρφωση Σήματος Φωτεινότητας.....	148
7.2.1.2 Διαμόρφωση Σήματος Ήχου.....	149
7.2.1.3 Φάσμα Σήματος Ασπρόμαυρης Τηλεόρασης	150
7.2.2 Διαμόρφωση Έγχρωμου Τηλεοπτικού Σήματος	151
7.2.2.1 Σήμα Χρωμικότητας.....	151
7.2.2.2 Διαμόρφωση Σήματος Χρώματος	151
7.2.2.3 Σήμα Burst και Αντιμετώπιση Διαφοράς Φάσης.....	153
7.2.2.4 Φονέας Χρώματος.....	155
7.3 Ψηφιακή Διαμόρφωση	155
7.3.1 Αντιστοίχιση Ροής σε Σύμβολα	155
7.3.2 Διαμόρφωση COFDM	158
7.3.2.1 Τρόποι Λειτουργίας – Πλήθος Φερόντων	159
7.3.2.2 Διάστημα Προστασίας.....	160
7.3.3 Σηματοδοσία και Σήματα Αναφοράς	162
7.3.3.1 Σηματοδοσία	162
7.3.3.2 Σήματα Αναφοράς.....	162
7.3.4 Μονοσυχνотικά Δίκτυα	163
Βιβλιογραφία/Αναφορές	165
Κριτήρια αξιολόγησης.....	166
Κριτήριο αξιολόγησης 1	166
Απάντηση/Λύση	166
Κεφάλαιο 8 – IPTV	171
8.1 Εισαγωγή	172

8.2 Ρόλοι και Λειτουργικότητα	173
8.2.1 Ρόλοι.....	174
8.2.2 Λειτουργικότητα	174
8.3 Τοπολογίες Δικτύου και Τρόποι Εκπομπής.....	175
8.3.1 Βασικές Αρχιτεκτονικές	176
8.3.2 Τρόποι Εκπομπής.....	176
8.3.2.1 Διευθυνσιοδότηση	179
8.3.2.2 Αλλαγή Ομάδας Πολυεκπομπής	180
8.4 Στοιβα Πρωτοκόλλων και Ενθυλάκωση Δεδομένων	182
8.4.1 Στοιβα Πρωτοκόλλων.....	182
8.4.2 Ενθυλάκωση Δεδομένων	184
8.4.2.1 Χρήση Πακέτων TS.....	184
8.4.2.2 Απευθείας Μετάδοση με RTP.....	185
8.5 Αρχιτεκτονική - STB	185
8.5.1 Δικτυακή Διεπαφή	186
8.5.2 Έξοδοι Βίντεο και Ήχου.....	187
8.5.3 Διεπαφή Χρήστη	187
8.5.4 Έλεγχος Πρόσβασης	188
8.5.5 Μέσο Αποθήκευσης	188
8.5.6 Μεσισμικό	188
Βιβλιογραφία/Αναφορές	189
Κριτήρια αξιολόγησης.....	190
Κριτήριο αξιολόγησης 1.....	190
Απάντηση/Λύση	190
Κριτήριο αξιολόγησης 2.....	190
Απάντηση/Λύση	191
Κριτήριο αξιολόγησης 3.....	191
Απάντηση/Λύση	191
Κεφάλαιο 9 – Τηλεοπτικός Δέκτης.....	193
9.1 Εισαγωγή	194
9.2 Αναλογικός Τηλεοπτικός Δέκτης.....	194
9.2.1 Βαθμίδα Εισόδου	196
9.2.2 Κύκλωμα Μίξης.....	197
9.2.2.1 Σύνθεση Συχνότητας.....	197
9.2.2.2 Συντονισμός με Σύνθεση	198
9.2.2.3 Μίξη	198
9.2.3 Απόκριση Ενδιάμεσης Συχνότητας	199
9.2.4 Φωρατής Οπτικού Σήματος.....	201

9.2.5 Διαχείριση Πληροφορίας Χρώματος.....	201
9.2.5.1 Επεξεργασία του σήματος burst	201
9.2.5.2 Αποδιαμόρφωση Χρώματος.....	202
9.3 Ψηφιακός Δέκτης.....	202
9.3.1 Συντονισμός και Αποκωδικοποίηση Καναλιού	204
9.3.1.1 Αποδιαμόρφωση OFDM	204
9.3.2 Αποπολυπλεξία TS και Αποκωδικοποίηση MPEG.....	205
9.4 Τεχνολογία Συσκευών Απεικόνισης	206
9.4.1 Τεχνολογία Καθοδικού Σωλήνα	206
9.4.1.1 Μονοχρωματική Οθόνη.....	206
9.4.1.2 Έγχρωμες Οθόνες	207
9.4.2 Επίπεδες Οθόνες.....	207
9.4.2.1 Τεχνολογίες Επίπεδων Οθονών.....	208
Βιβλιογραφία/Αναφορές	210
Κριτήρια αξιολόγησης.....	211
Κριτήριο αξιολόγησης 1	211
Απάντηση/Λύση	211
Κεφάλαιο 10 – Αναμενόμενες Εξελίξεις	212
10.1 Εισαγωγή.....	213
10.2 Παροχή Υπηρεσιών Προστιθέμενης Αξίας.....	213
10.2.1 MHEG.....	213
10.2.2 MHP.....	214
10.2.3 Smart TV	214
10.3 Κωδικοποίηση.....	215
10.3.1 MPEG 4 AVC / H. 264.....	215
10.3.2 HVEC.....	215
10.4 Εξέλιξη Τηλεοπτικού Σήματος.....	216
10.4.1 Τρισδιάστατο Σήμα	216
10.4.1.1 Παραγωγή Τρισδιάστατου Σήματος	216
10.4.1.2. Συμπίεση.....	216
10.4.2 Σήμα Υπερ-Υψηλής Ευκρίνειας	217
Βιβλιογραφία/Αναφορές	218

Πίνακας Συντομεύσεων- Ακρωνύμια

AAC	Advanced Audio Coding
AC-3	Audio Coding 3
ACC	Automatic Chrominance Control
ADC	Analogue to Digital Converter
AF	Adaptation Field
AFC	Automatic Frequency Control
AGC	Automatic Gain Control
AM	Amplitude Modulation
ATSC	Advanced Television Systems Committee
AU	Access Unit
AVC	Advanced Video Coding
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BAT	Bouquet Association Table
BCH	Bose-Chaudhuri-Hocquenghem
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CA	Conditional Access
CAM	Conditional Access Module
CAT	Conditional Access Table
CI	Common Interface
CMY	Cyan, Magenta, Yellow
COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing
CRC	Cyclic Redundancy Code
CRM	Customer Relationship Management
CRT	Cathod Ray Tube
CVBS	Composite Video Blanking and Synchronization
DAC	Digital to Analog Converter
dB	deciBel
DC	Direct Current
DCT	Discrete Cosine Transform
DRM	Digital Rights Management
DSB	Double Side Band
DSB-SC	Double Side Band Suppressed Carrier
DSL	Digital Subscriber Line
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DTS	Decoding Time Stamp
DVB	Digital Video Broadcasting
DVB-T/S/C	DVB- Terrestrial / Satellite / Cable
DVD	Digital Video Disc
DVI	Digital Video Interface
EAV	End of Active Video
ECM	Entitlement Control Message
EHT	Extra High Tension
EIT	Event Information Table
EMM	Entitlement Management Message
EPG	Electronic Program Guide
ES	Elementary Stream
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transform
FM	Frequency Modulation
FST	Frequency Synthesized Tuner
GoP	Group of Pictures

HBI	Horizontal Blank Interval
HD	High Definition
HDCP	High Bandwidth Digital Content Protection
HDMI	High Definition Multimedia Interface
HD-SDI	High Definition Serial Digital Interface
HE	High Efficiency
HPNA	Home Phoneline Network Alliance
HSL	Hue, Saturation, Luminance
Hz	Hertz
IDCT	Inverse DCT
IEC	International Electrotechnical Commission
IF	Intermediate Frequency
IGMP	Internet Group Management Protocol
IP	Internet Protocol
IPTV	Internet Protocol TV
ITU	International Telecommunication Union
JPEG	Joint Picture Experts Group
Kbps	Kilobits per second
KBps	KiloBytes per second
LCD	Liquid Crystal Display
LED	LightEmittingDiodes
LFE	Low FrequencyEnhancement
LSB	Least Significant Bit
MAD	Mean Absolute Difference
Mbps	Megabits per second
MBps	MegaBytes per second
MDCT	Modified DCT
MPEG	Motion Pictures Expert Group
MPTS	Multi Program Transport Stream
ms	millisecond
MSB	Most Significant Bit
MSE	Mean Squared Error
MTU	Maximum Transmission Unit
MV	Motion Vector
NIT	Network Information Table
NRZ	Non Return to Zero
NTSC	National Television System Committee
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PAL	Phase Alternation per Line
PAT	Program Association Table
PCM	Pulse Code Modulation
PCR	Program Clock Reference
PDP	Plasma Display Panel
PES	Packetized Elementary Stream
PID	Packet ID
PIN	Personal Identification Number
Pixel	Picture Element
PLL	Phased-Locked Loop
PLN	Power Line Networking
PMT	Program Map Table
PRBS	Pseudo Random Binary Sequence
PS	Program Stream
PSI	Program Specific Information
PTS	Presentation Time Stamp
PVR	Personal Video Recorder
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying

RF	Radio Frequency
RGB	Red, Green, Blue
RLE	Run Length Encoding
RS	Reed Solomon
RST	Running Status Table
RTCP	Real Time Control Protocol
RTP	Real Time Protocol
RTSP	Real Time Streaming Protocol
SAV	Start of Active Video
SbM	Symbol to bit Mapping
SCART	Syndicat des Constructeurs d'Appareils Radiorécepteurs et Téléviseurs – Radio and Television Receiver Manufacturers' Association
SD	Sound Detector
SD	Standard Definition
SDT	Service Descriptor Table
SECAM	Système Electronique Couleur avec Memoire
SMPTE	Society of Motion Picture & Television Engineers
SNR	Signal to Noise Ratio
SPTS	Simple Program Transport Stream
SQNR	Signal to Quantization Noise Ration
SSB	Single Side Band
STB	Set Top Box
STC	System Time Clock
SXGA	Super-Extended Graphic Array
TCP	Transmission Control Protocol
TPS	Transmission Parameter Signaling
TS	Transport Stream
TSDT	Transport Stream Description Table
TwinVQ	Transform-domain Weighted Interleave Vector Quantization
UDP	User Datagram Protocol
UHF	Ultra High Frequency
UXGA	Ultra-Extended Graphic Array
VBI	VerticalBlankInterval
VCO	Voltage-Controlled Oscillator
VCR	Video Cassette Recorder
VGA	Video Graphic Array
VHF	Very High Frequency
VITS	Vertical Insertion Test Signal
VoD	Video on Demand
VSF	VestigialSideBand
XVGA	Extended VGA
ΕΕΠ	Επιθυμητό Επίπεδο Ποιότητας
ΦΧΣ	Φίλτρο Χαμηλών Συχνοτήτων

Πίνακας Όρων – Αντιστοιχίσεων

Advanced Audio Coding	Προχωρημένη Κωδικοποίηση Ήχου
Access Unit	Μονάδα Πρόσβασης
Adaptation Field	Πεδίο Προσαρμογής
Additive White Gaussian Noise	Προσθετικός Λευκός Γκαουσιανός Θόρυβος
Advanced Video Coding	Προχωρημένη Κωδικοποίηση Βίντεο
Amplitude Modulation	Διαμόρφωση κατά Πλάτος
Analogue to Digital Converter	Μετατροπέας σήματος από Αναλογική σε Ψηφιακή μορφή
Audio Coding 3	Κωδικοποίηση Ήχου 3
Automatic Chrominance Control	Αυτόματος Έλεγχος Φωτεινότητας
Automatic Frequency Control	Αυτόματος Έλεγχος Συχνότητας
Automatic Gain Control	Αυτόματος Έλεγχος Κέρδους
Bidirectional Frames	Πλαίσια Αμφίδρομης Πρόβλεψης
Bouquet Association Table	Πίνακας Συσχέτισης Δέσμης
Cathod Ray Tube	Καθοδικός Σωλήνας
Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Ορθογωνική Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας
Common Interface	Τυπική Διεπαφή
Composite Video Blanking and Synchronization	Σύνθετο σήμα Βίντεο, Αμαύρωσης και Συγχρονισμού
Conditional Access	Ελεγχόμενη Πρόσβαση
Conditional Access Module	Βαθμίδα Ελέγχου Πρόσβασης
Conditional Access Table	Πίνακας Ελέγχου Πρόσβασης
Constraint Length	Μήκος Περιορισμού
Customer Relationship Management	Διαχείριση Σχέσεων με τους Πελάτες
Cyclic Redundancy Code	Κώδικας Κυκλικού Πλεονασμού
Decoding Time Stamp	Χρονοσήμανση Αποκωδικοποίησης
Digital Rights Management	Διαχείριση Δικαιωμάτων Ψηφιακού Έργου
Digital Subscriber Line	Ψηφιακός Βρόχος Συνδρομητή
Digital Subscriber Line Access Multiplexer	Πολυπλέκτης Πρόσβασης Ψηφιακού Βρόχου Συνδρομητή
Digital to Analog Converter	Μετατροπέας σήματος από Ψηφιακή σε Αναλογική μορφή
Digital Video Broadcasting	Ευρείεκπομπή Ψηφιακού Βίντεο
Digital Video Interface	Διεπαφή Ψηφιακού Βίντεο
Direct Current	Συνεχές Ρεύμα
Discrete Cosine Transform	Διακριτός Μετασχηματισμός Συνημιτόνου
Double Side Band	Διπλευρική Διαμόρφωση
Double Side Band Suppressed Carrier	Διπλευρική Διαμόρφωση με Καταπιεσμένο Φέρον
Electronic Program Guide	Ηλεκτρονικός Οδηγός Προγράμματος
Elementary Stream	Στοιχειώδης Ροή
End of Active Video	Σημείο Τέλους Ενεργού Βίντεο
Entitlement Control Message	Μήνυμα Ελέγχου Δικαιώματος
Entitlement Management Message	Μήνυμα Διαχείρισης Δικαιώματος
Event Information Table	Πίνακας Πληροφορίας Γεγονότων
Extra High Tension	Υπερυψηλή Τάση
Fast Fourier Transform	Ταχύς Μετασχηματισμός Φουριέ
Field	Πεδίο
Forward Error Correction	Προληπτική Διόρθωση Σφαλμάτων
Frame	Πλαίσιο
Frame per second	Πλαίσια ανά δευτερόλεπτο
Frequency Modulation	Διαμόρφωση κατά Συχνότητα
Frequency Synthesized Tuner	Συντονισμός με Σύνθεση Συχνότητας
Group of Pictures	Ομάδα Πλαισίων
High Bandwidth Digital Content Protection	Προστασία Ψηφιακού Περιεχόμενου Υψηλού Εύρους Ζώνης

High Definition	Υψηλή Ευκρίνεια
High Definition Multimedia Interface	Διεπαφή Πολυμέσων Υψηλής Ευκρίνειας
High Definition Serial Digital Interface	Σειριακή Ψηφιακή Διεπαφή Υψηλής Ανάλυσης
High Efficiency	Υψηλή Απόδοση
Horizontal Blank Interval	Οριζόντιος Παλμός Συγχρονισμού
Hue, Saturation, Luminance	Χροιά, Κορεσμός, Φωτεινότητα
Interleaver	Διεμπλοκέας
Intermediate Frequency	Ενδιάμεση Συχνότητα
International Telecommunication Union	Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών
Internet Group Management Protocol	Πρωτόκολλο Διαχείρισης Ομάδων στο Internet
Internet Protocol	Πρωτόκολλο Διαδικτύου
Internet Protocol TV	Διαδικτυακή Τηλεόραση
Inverse DCT	Ανάστροφος Διακριτός Μετασχηματισμός Φουριέ
Least Significant Bit	Δυαδικό ψηφίο Ήσσονος Σημασίας
Level	Επίπεδο
Light Emitting Diode	Δίοδος Εκπομπής Φωτός
Liquid Crystal Display	Οθόνη Υγρού Κρυστάλλου
Low Frequency Enhancement	Ενίσχυση Χαμηλών Συχνοτήτων
Maximum Transmission Unit	Μέγιστη Μονάδα Μετάδοσης
Mean Absolute Difference	Μέση τιμή Απόλυτων τιμών των Διαφορών
Mean Squared Error	Μέση τιμή Τετραγωνικού Σφάλματος
Modified DCT	Διαφοροποιημένος Διακριτός Μετασχηματισμός Συνημιτόνου
Most Significant Bit	Δυαδικό Ψηφίο Μείζονος Σημασίας
Motion Vector	Διάνυσμα Κίνησης
Multi Program Transport Stream	Συρμός Μεταφοράς Πολλαπλών Προγραμμάτων
Multimedia Home Platform	Οικιακή Πλατφόρμα Πολυμέσων
Network Information Table	Πίνακας Πληροφοριών Δικτύου
Network Provider	Πάροχος Υπηρεσιών Δικτύου
Non Return to Zero	Μη επιστροφή στο Μηδέν
Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Ορθογωνική Πολυπλεξία Διάρθρωσης Συχνότητας
Packet ID	Αναγνωριστικό Πακέτου
Packetized Elementary Stream	Πακετοποιημένη Στοιχειώδης Ροή
Personal Identification Number	Προσωπικός Κωδικός Ταυτοποίησης
Personal Video Recorder	Προσωπικός Εγγραφές Βίντεο
Phase Alternation per Line	Εναλλαγή Φάσης ανά Γραμμή
Phased-Locked Loop	Βρόχος Κλειδώματος Φάσης
Picture Element	Εικονοστοιχείο
Plasma Display Panel	Οθόνη Πλάσματος
Presentation Time Stamp	Χρονοσήμανση Παρουσίασης
Private Sections and Tables	Ιδιωτικές Ενότητες και Πίνακες
Profile	Προφίλ
Program and System Information Protocol	Πρωτόκολλο Πληροφοριών Προγράμματος και Συστήματος
Program Association Table	Πίνακας Συσχέτισης Προγράμματος
Program Clock Reference	Πεδίο Αναφοράς Ρολογιού
Program Map Table	Πίνακας Αντιστοίχισης Προγράμματος
Program Specific Information	Πληροφορία Προγράμματος
Program Stream	Συρμός Προγράμματος
Pseudo Random Binary Sequence	Ψευδοτυχαία Δυαδική Ακολουθία
Puncturing	Διάτρηση
Quadrature Amplitude Modulation	Τετραγωνική Διαμόρφωση Πλάτους
Quadrature Phase Shift Keying	Τετραγωνική Διαμόρφωση Φάσης
Quality of Service	Ποιότητα Υπηρεσίας
Radio Frequency	Ραδιοσυχνότητα
Real Time Control Protocol	Πρωτόκολλο Ελέγχου Πραγματικού Χρόνου
Real Time Protocol	Πρωτόκολλο μετάδοσης Πραγματικού Χρόνου
Real Time Streaming Protocol	Πρωτόκολλο Ροής Πραγματικού Χρόνου
Red, Green, Blue	Κόκκινο, Πράσινο, Μπλε

Return Channel Terrestrial	Επίγειο Κανάλι Επιστροφής
Run Length Encoding	Κωδικοποίηση Μήκους Διαδρομής
Running Status Table	Πίνακας Κατάστασης
Scrambling	Τυχαιοποίηση
Service Descriptor Table	Πίνακας Περιγραφής Υπηρεσίας
Set Top Box	Επιτραπέζιος Αποκωδικοποιητής
Signal to Noise Ratio	Σηματοθορυβικός Λόγος
Signal to Quantization Noise Ration	Σηματοθορυβικός Λόγος λόγω Κβαντισμού
Simple Program Transport Stream	Συρμός Μεταφοράς Απλού Προγράμματος
Single Side Band	Μονόπλευρη Διαμόρφωση
Sound Detector	Ανιχνευτής ήχου
Standard Definition	Τυπική ευκρίνεια
Standard Definition	Τυπική Ευκρίνεια
Start of Active Video	Σημείο Έναρξης Ενεργού Βίντεο
Super-Extended Graphic Array	Υπερ – Επεκτεταμένος Πίνακας Γραφικών
Surface Acoustic Wave Filter	Φίλτρο Ακουστικών Κυμάτων
Symbol to bit Mapping	Αντιστοίχιση Συμβόλου σε Δυαδικά Ψηφία
System Time Clock	Ρολόι Συστήματος
Time Base	Βάση Χρονισμού
Transmission Control Protocol	Πρωτόκολλο Ελέγχου Μετάδοσης
Transmission Parameter Signaling	Σηματοδοσία Παραμέτρων Μετάδοσης
Transport Stream	Συρμός Μεταφοράς
Transport Stream Description Table	Πίνακας Περιγραφής Συρμού Μεταφοράς
Vertical Insertion Test Signal	Σήμα Ελέγχου Κατακόρυφου Παλμού αμαύρωσης
VerticalBlankInterval	Κατακόρυφος Παλμός Συγχρονισμού
Vestigial SideBand	Διαμόρφωσης Υπολειπόμενης Πλευρικής Ζώνης
Video on Demand	Βίντεο κατ' απαίτηση

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

Σύνοψη

Στο πρώτο αυτό κεφάλαιο κάνουμε εισαγωγή στα θέματα της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης. Συγκεκριμένα, εξετάζουμε τις βασικές απαιτήσεις και τεχνολογίες που τη χαρακτηρίζουν. Περιλαμβάνονται αναφορές στα βασικά θέματα που εντάσσονται στο τεχνολογικό οικοσύστημα της ψηφιακής τηλεόρασης από τη δημιουργία του ψηφιακού σήματος, τη συμπίεση και την κωδικοποίησή του μέχρι την ενίσχυσή του με πλεονάζουσα πληροφορία για την αντιμετώπιση των τυχόν σφαλμάτων κατά τη μετάδοση.

Επίσης, περιλαμβάνονται αναφορές στη διαδικτυακή τηλεόραση (IPTV) και τις επικείμενες εξελίξεις. Τα θέματα αυτά αντιστοιχούν στα υπόλοιπα κεφάλαια που συνθέτουν το παρόν σύγγραμμα.

Προαπαιτούμενη γνώση

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο είναι αυτόνομο, αφού επιχειρεί να δώσει τη συνολική εικόνα του τεχνολογικού οικοσυστήματος της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης. Προηγούμενη γνώση στα θέματα της ψηφιακής ανάλυσης και επεξεργασίας του σήματος, του ραδιοηλεκτρικού σήματος, των ψηφιακών επικοινωνιών αλλά και της αναλογικής τηλεόρασης διευκολύνουν την κατανόηση του περιεχομένου του συγγράμματος.

1.1 Εισαγωγή

Η ψηφιακή τηλεόραση είναι μια συναρπαστική θεματική περιοχή η οποία αποτελεί το πεδίο συνάντησης των τηλεπικοινωνιών, της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος, των πολυμέσων και πλέον και των δικτύων δεδομένων. Τα πρότυπα και οι τεχνολογίες στα οποία βασίζεται η τηλεόραση παραδοσιακά διακρίνονται από σταθερότητα και συνέχεια, ωστόσο η πρόσφατη μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή τεχνολογία τα ενίσχυσε και τα μετασχημάτισε σε σημαντικό βαθμό.

Στο πλαίσιο του προτεινόμενου βιβλίου θα προσπαθήσουμε να δώσουμε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση εξετάζοντας τα βασικά σημεία του οικοσυστήματος της ψηφιακής τηλεόρασης. Συγκεκριμένα, θα περιγράψουμε:

- τις βασικές αρχές και απαιτήσεις της ψηφιακής τηλεόρασης, καθώς και τις προκλήσεις και τις ευκαιρίες που δημιουργούνται κατά τη μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή.
- το πολυμεσικό περιεχόμενο και συγκεκριμένα τη δημιουργία, τη συμπίεση και την επεξεργασία του βίντεο και του ήχου.
- τη δημιουργία των πακέτων δεδομένων (πακετοποίηση των δεδομένων) με χρήση των συρμών μεταφοράς, καθώς και τη διαδικασία λήψης του βασικού σήματος μέσω των στοιχειωδών ροών.
- την προληπτική διόρθωση σφαλμάτων όπου μετέχουν οι βαθμίδες του εξωτερικού και εσωτερικού κωδικοποιητή και διεμπλοκέα.
- τη διαμόρφωση του ψηφιακού σήματος και τη μετάδοση αυτού.
- τη διαδικτυακή τηλεόραση, δηλαδή τη μετάδοση του τηλεοπτικού σήματος μέσω δικτύων δεδομένων (Internet Protocol TV, IPTV).
- τις συσκευές αναπαραγωγής του τηλεοπτικού σήματος, δηλαδή τους τηλεοπτικούς δέκτες, εξετάζοντας τις κοινές αρχές των αναλογικών όσο και των ψηφιακών, καθώς και τις βασικές αρχές της ψηφιακής τεχνολογίας.
- τις διαφαινόμενες νέες εξελίξεις στην περιοχή της παροχής υπηρεσιών προστιθέμενης αξίας, της κωδικοποίησης και συμπίεσης, και της μετάδοσης υψηλής ποιότητας ή και στερεοσκοπικού σήματος.

Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές τεχνολογικές περιοχές, που εντάσσονται στη θεματική περιοχή της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης.

1.2 Τεχνολογικές Περιοχές

Οι βασικές τεχνολογικές περιοχές, τις οποίες θα εξετάσουμε, ακολουθούν τη διαδρομή από τη δημιουργία του σήματος, την κωδικοποίηση και συμπίεσή του, τη διαμόρφωση και αποστολή του έως και τη λήψη και την επεξεργασία του από τον δέκτη. Όπως θα δούμε και στη συνέχεια, αυτές οι περιοχές διαμορφώνουν και τα βασικά κεφάλαια του συγγράμματος.

Παραγωγή Τηλεοπτικού Σήματος: Το τηλεοπτικό σήμα αποτελείται από το σήμα βίντεο, το σήμα ήχου καθώς και τα δεδομένα που αφορούν τη δομή του σήματος και τις επιπλέον υπηρεσίες. Το βίντεο παίζει τον σημαντικότερο ρόλο όσον αφορά στις απαιτήσεις σε εύρος ζώνης. Το βίντεο αποτελείται από μια αλληλουχία εικόνων οι οποίες αποτελούνται από στοιχειώδη στοιχεία (εικονοστοιχεία ή pixel-pictureelement), το πλήθος των οποίων ανά μονάδα επιφάνειας καθορίζει την ανάλυση (resolution). Η ανάλυση προκύπτει από το γινόμενο του πλήθους των γραμμών επί των στηλών της εικόνας.

Για την αναπαράσταση του σήματος βίντεο κατά τη δημιουργία του, αλλά και την αναπαραγωγή του στην τηλεοπτική συσκευή, χρησιμοποιείται η αναπαράσταση R, G, B. Ωστόσο, για λόγους συμβατότητας, αλλά και πιο αποτελεσματικής διαχείρισης του σήματος, όσον αφορά την ισορροπία μεταξύ ποιότητας και απαιτήσεων σε εύρος ζώνης, χρησιμοποιούνται και διαφορετικές αναπαραστάσεις.

Συμπίεση σήματος βίντεο: Ο ρυθμός του σήματος βίντεο όπως προκύπτει από την ψηφιοποίηση αυτού είναι πολύ υψηλός για να υποστηριχτεί από τις τρέχουσες τεχνολογίες και υποδομές μετάδοσης. Τόσο στην περίπτωση της τυπικής ευκρίνειας (Standard Definition, SD) όσο και στην υψηλή ευκρίνεια ο απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης είναι πολύ υψηλός (εάν το σήμα δεν έχει υποστεί συμπίεση) και πρέπει να υποβιβαστεί στην τάξη των 2-7 Mbps με τις τρέχουσες τεχνολογίες μετάδοσης.

Η συμπίεση διακρίνεται σε απωλεστική και μη απωλεστική. Στην περίπτωση της μη απωλεστικής συμπίεσης αφαιρείται πλεονάζουσα πληροφορία η οποία ενδέχεται (α) να εμφανίζεται πολλές φορές στη ροή, (β) να αφορά δεδομένα τα οποία δεν περιέχουν χρήσιμη πληροφορία, (γ) να αφορά δεδομένα τα οποία μπορούν να επαναδημιουργηθούν στον δέκτη με τη βοήθεια μαθηματικών υπολογισμών.

Επειδή δεν είναι πάντα εφικτό να πετυχαίνουμε την επιθυμητή συμπίεση, μόνο με μη απωλεστικό τρόπο, είναι απαραίτητοι και οι απωλεστικοί μηχανισμοί συμπίεσης. Βέβαια, στις περιπτώσεις αυτές ο στόχος είναι η πληροφορία η οποία θα χαθεί (και δεν θα είναι, δηλαδή, δυνατό να αναπαραχθεί στον δέκτη) να έχει τη μικρότερη δυνατή επίπτωση στην ποιότητα του περιεχομένου και στη γενικότερη αντίληψη του χρήστη.

Οι μεθοδολογίες και οι αλγόριθμοι συμπίεσης παρουσιάζουν σημαντικές προκλήσεις για αυτό και έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Έχουν μάλιστα επηρεάσει και επηρεαστεί από τα πρότυπα που έχουν κυριαρχήσει στον χώρο της τηλεόρασης.

Συμπίεση Ήχου: Το σήμα του ήχου έχει σημαντικές απαιτήσεις αναφορικά με το εύρος ζώνης (αν και όχι τόσο μεγάλες όσο το σήμα του βίντεο) οπότε απαιτείται συμπίεση και κωδικοποίηση. Η συμπίεση, αντίστοιχα με τη λογική που ακολουθήθηκε στην περίπτωση του βίντεο, στηρίζεται στην αφαίρεση της πλεονάζουσας πληροφορίας, αλλά και της πληροφορίας, η οποία δεν είναι μεν πλεονάζουσα αλλά η απώλειά της δεν γίνεται εύκολα αντιληπτή από τον χρήστη. Έχουμε, δηλαδή, και στην περίπτωση αυτή τόσο μη απωλεστική όσο και απωλεστική συμπίεση.

Οι μέθοδοι συμπίεσης στηρίζονται στο ψυχοακουστικό μοντέλο, το οποίο αξιοποιεί κάποια βασικά χαρακτηριστικά του ανθρώπινου αυτιού, αναφορικά με την ακοή. Το πιο σημαντικό, ίσως, από αυτά είναι η κάλυψη (masking), η οποία συμβαίνει στο πεδίο του χρόνου αλλά και στο πεδίο της συχνότητας. Επιπλέον, στην περίπτωση του ηχητικού σήματος (όπως και σε αυτή του σήματος βίντεο), είναι δυνατή η χρήση του Διακριτού Μετασχηματισμού Συνημιτόνου (Discrete Cosine Transform) με στόχο την περαιτέρω συμπίεση.

Όσον αφορά στα πρότυπα, τόσο για τη συμπίεση του βίντεο και του ήχου εστιάζουμε κυρίως στο MPEG, το οποίο είναι αυτό που έχει επικρατήσει στην Ευρώπη.

Πακετοποίηση Δεδομένων: Αφού πραγματοποιηθεί η κωδικοποίηση του περιεχομένου, ακολουθεί η πακετοποίηση του ώστε να αποσταλεί ή να αποθηκευτεί. Το MPEG παρέχει δύο τέτοιους μηχανισμούς, το Program Stream (Συρμό Προγράμματος) και το Transport Stream (Συρμό Μεταφοράς). Οι μηχανισμοί αυτοί

ενθυλακώνουν τις εξόδους των κωδικοποιητών μαζί με τα δεδομένα προληπτικής διόρθωσης σφαλμάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση τυχόν σφαλμάτων κατά τη μετάδοση.

Ο συρμός προγράμματος χρησιμοποιείται κυρίως στην περίπτωση που έχουμε μειωμένο αριθμό σφαλμάτων, όπως, π.χ., κατά την τοπική αποθήκευση δεδομένων με την εγγραφή ενός CD ή DVD. Οι συρμοί μεταφοράς αξιοποιούνται στην περίπτωση που αναμένουμε σφάλματα (όπως, π.χ., σε μια μετάδοση). Για τον λόγο αυτό οι κανόνες δημιουργίας των συρμών μεταφοράς είναι πιο αυστηροί. Και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιούνται πακέτα, μεταβλητού μήκους στην περίπτωση του συρμού προγράμματος και σταθερού (και συγκεκριμένα στα 188 Bytes) στην περίπτωση του συρμού μεταφοράς.

Κωδικοποίηση Καναλιού: Με τον όρο κωδικοποίηση καναλιού αναφερόμαστε στην εισαγωγή, πριν από τη μετάδοση ή περαιτέρω επεξεργασία, πλεονάζουσας πληροφορίας, η οποία χρησιμοποιείται στον δέκτη, κατά τις αντίστοιχες διαδικασίες αποκωδικοποίησης καναλιού, ώστε να εντοπίσει και εάν είναι δυνατόν να διορθώσει σφάλματα τα οποία έχουν συμβεί κατά τη μετάδοση (ή την οποιαδήποτε επεξεργασία). Ο στόχος είναι να αυξήσουμε την αξιοπιστία του συστήματος και να βελτιώσουμε την ποιότητα του αναπαραγόμενου περιεχομένου στον δέκτη (μέσω της μείωσης των σφαλμάτων που αναπόφευκτα έχουν προκύψει κατά τη μετάδοση). Οι λειτουργίες της κωδικοποίησης καναλιού εντάσσονται στη λογική της προληπτικής διόρθωσης σφαλμάτων (Forward Error Correction, FEC). Χρησιμοποιούνται μάλιστα και σε άλλες περιπτώσεις όπου είναι πιθανή η εμφάνιση σφαλμάτων, είτε εμπλέκεται μετάδοση της πληροφορίας είτε όχι (για παράδειγμα, χρησιμοποιούνται και στην περίπτωση της αποθήκευσης της πληροφορίας).

Οι μηχανισμοί διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα κυρίως με το τμήμα της πληροφορίας όπου εφαρμόζονται, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο προστίθεται η πλεονάζουσα πληροφορία. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι ακόλουθες: οι κώδικες μπλοκ (block code) και οι συνελκτικοί κώδικες (convolutional code). Η σημαντικότερη διαφορά μεταξύ αυτών των κατηγοριών εντοπίζεται στο γεγονός ότι οι πρώτοι χωρίζουν την πληροφορία σε τμήματα, συγκεκριμένου μεγέθους (μπλοκ). Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει στην περίπτωση των συνελκτικών κωδίκων, αφού η κωδικοποίηση και η αποκωδικοποίηση λαμβάνουν χώρα στη συνολική ροή (συνήθως σε επίπεδο bit). Παράλληλα με την ανωτέρω διαφοροποίηση, υπάρχει μία ακόμη, η οποία αφορά τη μνήμη. Συγκεκριμένα, οι συνελκτικοί κωδικοποιητές έχουν κατάσταση (άρα μνήμη), ενώ οι κώδικες μπλοκ όχι. Η απόδοση και των δύο τύπων κωδικοποίησης επηρεάζεται στην περίπτωση που έχουμε ριπές θορύβου. Για την αντιμετώπιση αυτού του χαρακτηριστικού λαμβάνει χώρα ένα ανακάτεμα, αντιμετάθεση ή αλλιώς διεμπλοκή (interleaving) της πληροφορίας, πριν από την αποστολή. Η πληροφορία επανέρχεται στη σωστή σειρά στον αποκωδικοποιητή με τη διαδικασία που ονομάζουμε απεμπλοκή (de-interleaving).

Διαμόρφωση και Μετάδοση: Το τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας του σήματος στον πομπό και το πρώτο στον δέκτη αφορά τη διαμόρφωση και τη μετάδοση. Η μετάδοση εξαρτάται από τον δίαυλο που χρησιμοποιείται: επίγειο, δορυφορικό ή καλωδιακό. Τόσο στην αναλογική όσο και στην ψηφιακή μετάδοση χρησιμοποιείται η μπάνα των VHF (Very High Frequency) και UHF (Ultra High Frequency) στα 45-862 MHz. Στην Ευρώπη τα VHF κανάλια έχουν εύρος ζώνης 7 MHz, ενώ τα UHF έχουν εύρος ζώνης 8 MHz.

Στην αναλογική μετάδοση, ξεκινώντας από την ασπρόμαυρη τηλεόραση, το σήμα αποτελείται από τη φωτεινότητα και τον ήχο. Στην έγχρωμη το σήμα ενισχύεται με το χρώμα (τις χρωμοδιαφορές). Τα σήματα διαμορφώνονται ξεχωριστά και αποστέλλεται το συνολικό σήμα. Η ψηφιακή διαμόρφωση ξεκινά με την αντιστοίχιση των bits σε σύμβολα ανάλογα με το είδος της διαμόρφωσης. Το σύστημα διαμόρφωσης συνδυάζει το OFDM με τις ψηφιακές διαμορφώσεις QPSK/QAM. Όπως θα δούμε, το OFDM χρησιμοποιεί έναν μεγάλο αριθμό φερουσών, στις οποίες διαχωρίζεται η πληροφορία, και κάθε φέρουσα διαμορφώνεται χωριστά.

Διαδικτυακή Τηλεόραση – IPTV: Η Τηλεόραση μέσω του Διαδικτύου (Internet Protocol Television, IPTV) είναι μια αμφίδρομη, αλληλεπιδραστική, πολυμεσική δικτυακή υπηρεσία, μέσω της οποίας μεταδίδεται το τηλεοπτικό περιεχόμενο συμπεριλαμβανομένων του βίντεο, του ήχου, του κειμένου, των γραφικών και των δεδομένων. Το IPTV διατίθεται μέσω του τηλεπικοινωνιακού δικτύου μεταγωγής πακέτου (του Internet). Η υπηρεσία αυτή μεταδίδεται μέσω διαχειριζόμενων δικτύων δεδομένων, τα οποία παρέχουν ελεγχόμενη ποιότητα υπηρεσίας, δυνατότητες αλληλεπίδρασης, ασφάλεια και αξιοπιστία. Με την εισαγωγή του IPTV οι πάροχοι περιεχομένου και υπηρεσιών είναι σε θέση να εκμεταλλευτούν τις αυξημένες δυνατότητες του διαδικτύου.

Τηλεοπτικός Δέκτης: Η διαδικασία της αναπαραγωγής του τηλεοπτικού σήματος περιλαμβάνει την επεξεργασία των σημάτων ήχου και βίντεο, καθώς και την οδήγηση της συσκευής απεικόνισης. Μπορούμε να διακρίνουμε τις δύο βασικές κατηγορίες, τον αναλογικό τηλεοπτικό δέκτη και τον ψηφιακό, με βάση τον τύπο του τηλεοπτικού σήματος που λαμβάνεται και επεξεργάζεται ο δέκτης.

Στην περίπτωση της αναλογικής τηλεόρασης, η επεξεργασία του βίντεο περιλαμβάνει τον διαχωρισμό της φωτεινότητας από τις χρωματικές συνιστώσες. Τα σήματα RGB στη συνέχεια υφίστανται επεξεργασία ανάλογα με το αν προέρχονται από προοδευτική ή διαπλεγμένη σάρωση. Το ψηφιακό βίντεο τροφοδοτείται στη συσκευή μετατροπής της μορφής του βίντεο και οδηγείται στη συσκευή απεικόνισης. Ο ήχος στην περίπτωση της αναλογικής τηλεόρασης λαμβάνεται από το σύνθετο σήμα με φιλτράρισμα ακουστικών συχνοτήτων και αποδιαμορφώνεται από τον ανιχνευτή ήχου. Στην περίπτωση της ψηφιακής λήψης ο στερεοφωνικός ήχος αποτελεί, θα δούμε, τμήμα της ροής μεταφοράς.

Επικείμενες Εξελίξεις: Η περιοχή της τηλεόρασης εξελίσσεται με σχετικά αργό ρυθμό (σε σχέση με τον αντίστοιχο ρυθμό του διαδικτύου ή των κινητών τηλεπικοινωνιών, για παράδειγμα). Αυτό, βέβαια, δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχουν ζυμώσεις και αναμενόμενες εξελίξεις. Επιχειρούμε να εξετάσουμε κάποιες εξ αυτών. Αρχικά εξετάζουμε την παροχή υπηρεσιών προστιθέμενης αξίας, οι οποίες παρέχονται παράλληλα με το τηλεοπτικό σήμα. Η παροχή υπηρεσιών υπήρξε ένα από τα πεδία τα οποία κατά καιρούς έχουν κερδίσει το ενδιαφέρον, ωστόσο έχουν μείνει κλειστά τόσο από την άποψη των τεχνολογιών όσο και από τους ρόλους που εμπλέκονται σε σχετικά σενάρια. Στη συνέχεια εξετάζουμε την περιοχή του τηλεοπτικού σήματος, περιγράφοντας κάποια από τα χαρακτηριστικά του σήματος πολύ υψηλής ευκρίνειας και του τρισδιάστατου σήματος. Τέλος, η χρήση των τελευταίων τεχνολογιών και αλγορίθμων έχει ενισχύσει την απόδοση της κωδικοποίησης.

1.3 Δομή Συγγράμματος και Βασικές Πηγές

Στο υποκεφάλαιο αυτό αναλύουμε συνοπτικά τη δομή του συγγράμματος και τις πηγές από τις οποίες έχει αντληθεί υλικό.

1.3.1 Δομή Συγγράμματος

Η δομή του Συγγράμματος ορίζεται από τα κεφάλαια που αντιστοιχούν στις προαναφερθείσες θεματικές περιοχές. Συγκεκριμένα, έχουμε τα επόμενα κεφάλαια.

Το 2ο κεφάλαιο καταπιάνεται με τη δημιουργία του τηλεοπτικού σήματος εστιάζοντας στο σήμα του βίντεο. Εξετάζουμε τους τρόπους αναπαράστασης της πληροφορίας που αφορά τα χρώματα σε μια εικόνα, τη μετατροπή μεταξύ ισοδύναμων τρόπων αναπαράστασης βίντεο, τη διαχείριση της υποδειγματοληψίας χρώματος και τη συσχέτιση με χαρακτηριστικά του τηλεοπτικού σήματος.

Στο 3ο κεφάλαιο εξετάζουμε τους μηχανισμούς συμπίεσης που χρησιμοποιούνται για το σήμα του βίντεο. Συγκεκριμένα, επεξηγούνται μηχανισμοί συμπίεσης τόσο απωλεστικοί όσο και μη απωλεστικοί και επιχειρείται να επεξηγηθούν επαρκώς οι τεχνικές λεπτομέρειες της λειτουργίας αυτών των μηχανισμών. Όσον αφορά τα πρότυπα, δίνεται έμφαση στους μηχανισμούς του MPEG, το οποίο αποτελεί και το πλέον διαδεδομένο πρότυπο στην περιοχή.

Στο 4ο κεφάλαιο εξετάζουμε την ψηφιοποίηση του ήχου (δειγματοληψία και κβαντισμό), την αφαίρεση της πλεονάζουσας ή της μη σημαντικής πληροφορίας και στη συνέχεια την κωδικοποίηση του ηχητικού σήματος. Αναφορικά με τα σχετικά πρότυπα, έμφαση δίνεται στο MPEG (στα τμήματα αυτού που αφορούν τον ήχο).

Στο 5ο κεφάλαιο εξετάζουμε τον τρόπο λειτουργίας του συρμού μεταφοράς. Ο συρμός μεταφοράς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση του περιεχομένου (για παράδειγμα, στην επίγεια και τη δορυφορική τηλεόραση), αλλά και για την αποθήκευση αυτού. Ενδείκνυται για περιβάλλοντα στα οποία τα σφάλματα είναι πιθανά, όπως στα συστήματα Ψηφιακής Τηλεόρασης.

Στο 6ο κεφάλαιο εξετάζουμε τους δύο τύπους κωδικοποίησης (μπλοκ και συνελκτικούς), καθώς και τους μηχανισμούς διεμπλοκής για την αντιμετώπιση των ριπών σφαλμάτων. Εξετάζονται, επίσης, οι αντίστροφες διαδικασίες στην πλευρά του δέκτη.

Στο 7ο κεφάλαιο εξετάζουμε τα θέματα της διαμόρφωσης και μετάδοσης, τα οποία αφορούν την επίγεια τηλεόραση. Αρχικά εξετάζουμε την αναλογική μετάδοση, ξεκινώντας από την ασπρόμαυρη τηλεόραση και στη συνέχεια την έγχρωμη. Στη συνέχεια εξετάζονται τα θέματα της ψηφιακής διαμόρφωσης.

Στο 8ο κεφάλαιο εξετάζουμε τη διαδικτυακή τηλεόραση (IPTV) περιγράφοντας τους ρόλους, τη λειτουργικότητα και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της τηλεόρασης μέσω διαδικτύου. Εξετάζονται, επίσης, θέματα δικτυακής φύσεως, χωρίς όμως ανάλυση σε βάθος.

Στο 9ο κεφάλαιο περιγράφουμε τις τεχνολογίες και τις αρχές λειτουργίας που διέπουν τον αναλογικό και τον ψηφιακό δέκτη, εξετάζοντας τις βασικές βαθμίδες που τους αποτελούν. Αναφερόμαστε, επίσης, στις βασικές αρχές λειτουργίες των βαθμίδων της απεικόνισης.

Στο 10ο κεφάλαιο παρουσιάζουμε κάποιες από τις εκτιμώμενες εξελίξεις στο πεδίο της ψηφιακής τηλεόρασης. Μεταξύ αυτών, εξετάζουμε την παροχή υπηρεσιών προστιθέμενης αξίας, οι οποίες παρέχονται παράλληλα με το τηλεοπτικό σήμα, το σήμα πολύ υψηλής ευκρίνειας, καθώς και τους σύγχρονους τρόπους κωδικοποίησης του βίντεο.

1.3.2 Βασικές Πηγές

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφέρουμε μια σειρά πηγών από την ελληνική και την ξένη βιβλιογραφία, οι οποίες εξετάζουν αντίστοιχα θέματα, από την αναλογική αλλά και την ψηφιακή τηλεόραση. Ενδεικτικά αναφέρονται οι επόμενες πηγές: [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].. Σημαντικό, επίσης, ρόλο παίζουν τα πρότυπα τα οποία χρησιμοποιούμε σε κάθε κεφάλαιο.

Η ύλη του παρόντος συγγράμματος έχει διδαχτεί επί σειρά ετών στο μάθημα Ψηφιακής Τηλεόρασης στο τμήμα Εκπαιδευτικών Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Ανώτατης Σχολής Παιδαγωγικής και Τεχνολογικής Εκπαίδευσης (ΑΣΠΑΙΤΕ) και οι διδακτικές σημειώσεις του μαθήματος αυτού αποτέλεσαν για το σύνολο των κεφαλαίων το βασικό υλικό συγγραφής [9].



[Παρατίθεται ένα εισαγωγικό βίντεο για τις βασικές λειτουργίες των συστημάτων ευρεκτομής.](#)

Βιβλιογραφία/Αναφορές

1. Κ. Τσαμούταλος και Π. Σαράντης. *Αναλογική και Ψηφιακή Τηλεόραση*. Σταμούλης, 2003.
2. Γ. Σκλαβούνης. *Ραδιοτηλεοπτική Παραγωγή*. Εκδόσεις Παρρίκος και ΣΙΑ, 2000.
3. Π. Βαφειάδης. *Αναλογική-ψηφιακή τηλεόραση και βίντεο*. 7η έκδοση. Π. Βαφειάδης, 2014.
4. K. B. Benson, D. G.Fink. *HDTV τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας*. Τζιόλας, 1993
5. J. Arnold, M. Frater, M. Pickering. *Digital Television: Technology and Standards*. J. Wiley and Sons, 2007.
6. W. Fischer. *Digital Video and Audio Broadcasting Technology*. Springer, 2008.
7. E.P.J. Tozer. *Broadcast Engineer's Reference Book*. Focal Press, 2004.
8. K. Ibrahim. *Newnes Guide to Television and Video Technology*. Newnes, 2007
9. Α. Παπαδάκης. *Ψηφιακή Τηλεόραση: Διδακτικές σημειώσεις για το μάθημα της Ψηφιακής Τηλεόρασης*. ΑΣΠΑΙΤΕ, 2014.

Κεφάλαιο 2 – Παραγωγή Τηλεοπτικού Σήματος

Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζουμε την παραγωγή του τηλεοπτικού σήματος. Εστιάζουμε στο τμήμα του βίντεο το οποίο παίζει και τον καθοριστικό ρόλο στη δημιουργία του τηλεοπτικού σήματος, τόσο από την άποψη του ποσοστού του μεγέθους που αυτό καταλαμβάνει όσο και από την περιπλοκότητα και τις επιλογές που διατίθενται. Το κεφάλαιο αποτελείται από τέσσερις επιμέρους ενότητες: (α) την επεξήγηση του τρόπου αναπαράστασης της πληροφορίας της εικόνας και του βίντεο, (β) τη δημιουργία του σήματος βίντεο στην αναλογική τηλεόραση, (γ) τον τρόπο δημιουργίας του σήματος στην ψηφιακή τηλεόραση και (δ) το σήμα υψηλής ευκρίνειας.

Αναφορικά με την αναπαράσταση του σήματος εικόνας και βίντεο εξετάζουμε τη χρήση της προσθετικής μίξης με χρήση των τριών βασικών χρωμάτων (R, G, B). Επεξηγείται το μέγεθος της φωτεινότητας και οι τρόποι υπολογισμού του, καθώς και κάποιες εναλλακτικές αναπαραστάσεις συμπεριλαμβανομένων της χροιάς, του κορεσμού και της φωτεινότητας, καθώς και αυτής των χρωμοδιαφορών.

Επίσης, εξετάζουμε τρία από τα βασικά χαρακτηριστικά της δημιουργίας του βίντεο στην αναλογική τηλεόραση, συγκεκριμένα τη διαπλεγμένη σάρωση (interlaced scanning), τους παλμούς οριζόντιας και κατακόρυφης επιστροφής (Horizontal και Vertical Blanking Intervals) και τον τρόπο με τον οποίο τα διάφορα συστήματα στην αναλογική τηλεόραση διαχειρίζονται το χρώμα (συγκεκριμένα το αμερικανικό NTSC και τα ευρωπαϊκά PAL και SECAM).

Όσον αφορά το ψηφιακό σήμα, εξετάζουμε τον τρόπο λήψης του και τα στάδια επεξεργασίας που υφίσταται, τα οποία περιλαμβάνουν το φιλτράρισμα, τη δειγματοληψία, καθώς και την υποδειγματοληψία χρώματος. Με βάση αυτά υπολογίζεται ο απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης.

Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με το βίντεο υψηλής ευκρίνειας, όπου γίνεται ανάλογη ανάλυση με αυτή που προηγήθηκε για το σήμα τυπικής ευκρίνειας. Επεξηγούνται οι διαστάσεις που χρησιμοποιούνται και οι ρυθμοί που προκύπτουν. Ένα από τα βασικά συμπεράσματα του παρόντος κεφαλαίου είναι η ανάγκη για συμπίεση, ώστε να γίνει δυνατή η μετάδοση του σήματος, τόσο της τυπικής όσο και της υψηλής ευκρίνειας.

Προαπαιτούμενη γνώση

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο είναι σε μεγάλο βαθμό αυτόνομο, αφού η μεθοδολογία δημιουργίας του σήματος είναι ένα από τα πρώτα βήματα που ακολουθούνται στην πορεία που ακολουθεί το τηλεοπτικό σήμα. Υπάρχει συσχέτιση με το επόμενο κεφάλαιο που αφορά τη συμπίεση του βίντεο.

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό ασχολούμαστε με τη δημιουργία του τηλεοπτικού σήματος βίντεο, όπως αυτό παράγεται από την τηλεοπτική κάμερα (εικονολήπτη), υφίσταται κάποια πρώτα στάδια επεξεργασίας και στη συνέχεια αναπαράγεται στον τηλεοπτικό δέκτη. Το βίντεο αποτελείται από μια αλληλουχία εικόνων, οι οποίες απαρτίζονται από εικονοστοιχεία (picture elements- pixels), το πλήθος των οποίων καθορίζει την ανάλυση (resolution). Η ανάλυση προκύπτει από το γινόμενο του πλήθους των γραμμών επί των στηλών της εικόνας.

Επειδή οι σκηνές διαφοροποιούνται με τον χρόνο, απαιτείται να λαμβάνονται πολλές διαδοχικές εικόνες. Η ταχύτητα με την οποία λαμβάνουμε τις εικόνες ποικίλλει και μετρείται σε πλαίσια ανά δευτερόλεπτο (frames per second, fps).

Για την αναπαράσταση του σήματος βίντεο κατά τη δημιουργία του, αλλά και την αναπαραγωγή του στην τηλεοπτική συσκευή, χρησιμοποιείται η αναπαράσταση RGB (βασικά χρώματα Red, Green, Blue). Ο χώρος περιγραφής χρησιμοποιείται τόσο για τη λήψη του σήματος στον εικονολήπτη όσο και για την αναπαραγωγή αυτού στον δέκτη.

Όπως θα δούμε, για τους σκοπούς της μετάδοσης έχουμε μια μετατροπή από τον χώρο RGB σε έναν άλλο ισοδύναμο τρόπο αναπαράστασης, ο οποίος βασίζεται στη φωτεινότητα και τα μεγέθη που ονομάζουμε χρωμοδιαφορές (Y,Cb, Cr). Στη συνέχεια πραγματοποιείται η αντίστροφη μετατροπή σε RGB για την αναπαραγωγή του σήματος στη συσκευή του δέκτη.

Οι στόχοι του κεφαλαίου περιλαμβάνουν την κατανόηση των τρόπων αναπαράστασης της πληροφορίας που αφορά τα χρώματα σε μια εικόνα και κατ' επέκταση στο βίντεο, τη μετατροπή μεταξύ ισοδύναμων τρόπων αναπαράστασης εικόνων και βίντεο, τη διαχείριση της υποδειγματοληψίας χρώματος και τη συσχέτιση με τα χαρακτηριστικά του τηλεοπτικού σήματος. Επίσης, συζητάμε τις απαιτήσεις σε εύρος ζώνης και τον τρόπο που αυτές σχετίζονται με τις επιλογές που αφορούν το βίντεο.

2.2 Περιγραφή Εικόνας

2.2.1. Αναπαράσταση Οπτικής Πληροφορίας

2.2.1.1 Τριχρωματική Όραση

Το βασικό χαρακτηριστικό της αναπαράστασης της οπτικής πληροφορίας, στο οποίο βασίζεται η θεωρία της τριχρωματικής όρασης είναι η δυνατότητα παραγωγής οποιουδήποτε χρώματος με μίξη τριών φασματικών χρωμάτων, τα οποία ονομάζουμε κύρια χρώματα και τα οποία είναι το κόκκινο (R), το πράσινο (G) και το μπλε (B). Ο χώρος αναπαράστασης RGB χρησιμοποιεί το ποσοστό συμμετοχής των τριών αυτών βασικών χρωμάτων για την περιγραφή οποιουδήποτε συνδυασμού.

Η προσθετική μίξη συνδυάζει τα παραπάνω πρωτεύοντα χρώματα (κόκκινο, πράσινο και μπλε) ώστε να δώσει τους επιθυμητούς συνδυασμούς. Η αφαιρετική μίξη ξεκινάει από το λευκό, το οποίο αποτελείται από όλα τα χρώματα στο μέγιστο ποσοστό και αφαιρεί (απορρίπτει) κάποια από αυτά. Έτσι, αυτά που παραμένουν, δημιουργούν τον επιθυμητό χρωματικό συνδυασμό. Στην αφαιρετική μίξη ως πρωτεύοντα χρώματα θεωρούνται το κυανό (cyan), το πορφυρό (magenta) και το κίτρινο (yellow). Τα χρώματα αυτά προκύπτουν από τη μίξη δύο από τα πρωτεύοντα χρώματα του χώρου RGB. Συγκεκριμένα:

- Το κυανό από το πράσινο και το μπλε.
- Το πορφυρό από το κόκκινο και το μπλε.
- Το κίτρινο από το πράσινο και το κόκκινο.

Στα συστήματα έγχρωμης τηλεόρασης χρησιμοποιείται η προσθετική μίξη των βασικών χρωμάτων. Παρόλο που η μελέτη της χρωματομετρίας ξεφεύγει από τους στόχους του παρόντος συγγράμματος, αξίζει να αναφερθεί ότι τα φυσικά (μονοχρωματικά) βασικά χρώματα R, G, B δεν μπορούν να δώσουν με προσθετική μίξη όλα τα χρώματα, για τον λόγο, δε, αυτό χρησιμοποιούνται επιπλέον συνδυασμοί (οι οποίοι παίζουν τον ρόλο των τεχνητών βασικών χρωμάτων).

Για παράδειγμα, αναφέρουμε ότι το κίτρινο χρησιμοποιείται ως ένα επιπλέον βασικό χρώμα για την υποστήριξη περισσότερων συνδυασμών, χωρίς όμως και αυτή η προσθήκη να επιλύει όλες τις δυσκολίες. Πλέον, υπάρχουν τεχνολογίες οι οποίες αξιοποιούν 5 ή και 6 βασικά χρώματα για την κατασκευή βαθμίδων

απεικόνισης υψηλής ποιότητας (10, 11). Στη συνέχεια της ανάλυσής μας εξετάζουμε το πλέον καθιερωμένο σενάριο της υποστήριξης τριών βασικών χρωμάτων, αυτών δηλαδή στα οποία αναφερθήκαμε αρχικά (του κόκκινου, του πράσινου και του μπλε) (12, 13).

Μια άλλη παράμετρος που επηρεάζει την ποιότητα της απεικόνισης, βασίζεται στα διαθέσιμα επίπεδα κβαντισμού για την αναπαράσταση των ποσοστών αυτών. Από το πλήθος των bits που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση, εξαρτώνται τα αντίστοιχα εύρη τιμών. Για αναπαράσταση 8 bits, η οποία αποτελεί και την πιο τυπική επιλογή, το εύρος είναι από το 0 έως το 255 (2^8-1), ενώ για 10 bits το εύρος κυμαίνεται από το 0 έως το 1.024 ($2^{10}-1$).

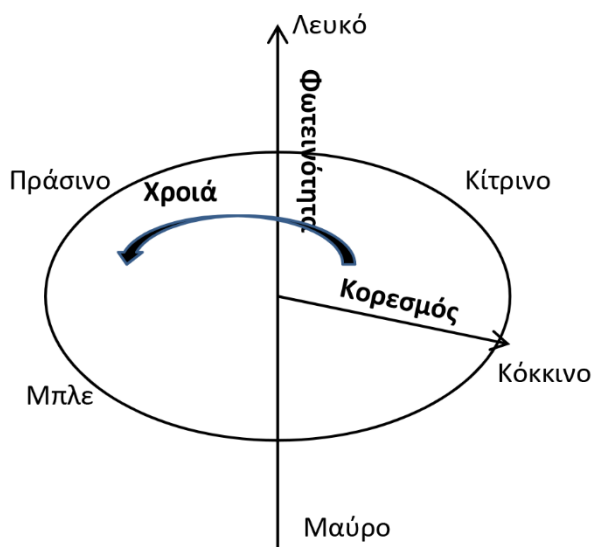
Όπως θα συζητήσουμε και στη συνέχεια, η αναπαράσταση με τη χρήση των βασικών χρωμάτων είναι μια λύση η οποία εξυπηρετεί τις ανάγκες κυρίως στον πομπό και τον δέκτη (όσον αφορά τις τηλεοπτικές υπηρεσίες). Δεν εξυπηρετεί σε πολύ καλό βαθμό τους σκοπούς της μετάδοσης. Για τον σκοπό αυτό, θα περιγράψουμε επιπλέον τρόπους περιγραφής της χρωματικής πληροφορίας.

2.2.1.2 Φωτεινότητα και Χρωμοδιαφορές

Ένας εναλλακτικός (ισοδύναμος) τρόπος αναπαράστασης της χρωματικής πληροφορίας είναι η ανάλυση του χρώματος στη χροιά (hue), τον κορεσμό (saturation) και τη φωτεινότητα (luminance). Εξηγούμε τη σημασία αυτών των μεγεθών ως εξής:

- Η χροιά αντιπροσωπεύει το ίδιο το χρώμα (το είδος δηλαδή του χρώματος) και μετράται ως γωνία, ξεκινώντας από τον άξονα των θετικών πραγματικών αριθμών (με φορά αντίθετη αυτής της φοράς του ρολογιού).
- Ο κορεσμός αφορά την καθαρότητα του χρώματος και μετράται ως το μέτρο της ακτίνας. Ο συνδυασμός χροιάς και κορεσμού συνιστούν τη χρωμικότητα (chrominance).
- Η φωτεινότητα μεταβάλλεται από το 0 (μαύρο) ως το 1 (λευκό) και αναπαρίσταται στο σχήμα ως το μέτρο στον κατακόρυφο άξονα.

Η γραφική αναπαράσταση αυτών των μεγεθών δίνεται στο επόμενο σχήμα, όπου παρουσιάζονται η χροιά ως γωνία, ο κορεσμός ως το μέτρο του διανύσματος (από την αρχή των αξόνων μέχρι το σημείο που ορίζεται από τη χρωμικότητα) και η φωτεινότητα ως ύψος.



Εικόνα 2.1 Αναπαράσταση χρωμάτων με χρήση χροιάς, κορεσμού και φωτεινότητας.

Για τον υπολογισμό της φωτεινότητας (Y) επιμερίζουμε το ποσοστό με το οποίο συνεισφέρουν τα (τρία) βασικά χρώματα στον υπολογισμό της φωτεινότητας. Εξετάζουμε τους συντελεστές με τους οποίους κάθε βασικό χρώμα συνεισφέρει στη φωτεινότητα. Οι συντελεστές αυτοί έχουν προκύψει από πειραματικές

μετρήσεις της ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού στα συγκεκριμένα χρώματα και έχουν προτυποποιηθεί [14]. Μας δίνουν τις επόμενες σχέσεις:

$$Y=0,299R+0,587G+0,114B \quad (1)$$

Η, σε πιο απλοποιημένη, προσεγγιστική μορφή:

$$Y=0,30R+0,59G+0,11B \quad (2)$$

Η ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού είναι πολύ πιο έντονη στο σήμα της φωτεινότητας σε σχέση με αυτό των χρωμοδιαφορών, το οποίο σημαίνει, όπως θα δούμε πιο κάτω, ότι μπορεί να δοθεί έμφαση στην αναπαράσταση αυτού (όσον αφορά την ακρίβεια της αναπαράστασης) σε σχέση με την πληροφορία που αφορά τη χρωμικότητα.

Επιπλέον, το μέγεθος της φωτεινότητας συνέχισε να χρησιμοποιείται, με την έλευση της έγχρωμης τηλεόρασης (και συγκεκριμένα κατά τη μετάβαση από το ασπρόμαυρο σήμα στο έγχρωμο), ώστε να εξασφαλιστεί η συμβατότητα παλαιότερων ασπρόμαυρων δεκτών με τα νέα (την εποχή εκείνη) συστήματα της έγχρωμης τηλεόρασης.

Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται η μετατροπή της περιγραφής του σήματος της εικόνας από τον χώρο των τριών βασικών χρωμάτων RGB σε μια ισοδύναμη αναπαράσταση, η οποία περιέχει τη φωτεινότητα (Y). Οι αναπαραστάσεις πρέπει να είναι ισοδύναμες (στην πραγματικότητα να αποτελούνται από τρεις ανεξάρτητες μεταβλητές) και η μετάβαση από τη μία στην άλλη να μπορεί να είναι αμφίδρομη.

Για να έχουμε ισοδυναμία στην περιγραφή πρέπει να χρησιμοποιήσουμε δύο ακόμη (ανεξάρτητα μεταξύ τους) μεγέθη, τα οποία αφορούν το χρώμα. Η χρήση της χροιάς (ως γωνίας) και του κορεσμού δεν εξυπηρετεί για τη μετάδοση της πληροφορίας του χρώματος, μεταξύ άλλων και λόγω της πολυπλοκότητας του μετασχηματισμού από τη μορφή RGB στη μορφή (χροιάς, κορεσμού και φωτεινότητας). Τα κατάλληλα μεγέθη βασίζονται στις χρωμοδιαφορές.

Ως χρωμοδιαφορές ορίζουμε τη διαφορά της φωτεινότητας από την τιμή της συνιστώσας του εκάστοτε χρώματος (συγκεκριμένα του μπλε και του κόκκινου). Ας υποθέσουμε ότι συμβολίζουμε τις κανονικοποιημένες αναλογίες στα τρία βασικά χρώματα, ως R, G, B, τη φωτεινότητα Y και τις χρωμοδιαφορές Cr, Cg και Cb. Η χρωμοδιαφορά του κόκκινου προκύπτει ως η διαφορά της φωτεινότητας από την αναλογία του κόκκινου:

$$R-Y=R-(0,30R+0,59G+0,11B)=0,70R-0,59G-0,11B \quad (3)$$

Αντίστοιχα για τη χρωμοδιαφορά του πράσινου:

$$G-Y=G-(0,30R+0,59G+0,11B)=-0,30R+0,41G-0,11B \quad (4)$$

Η δε χρωμοδιαφορά του μπλε δίνεται από την επόμενη σχέση:

$$B-Y=B-(0,30R+0,59G+0,11B)=-0,30R-0,59G+0,89B \quad (5)$$

Μπορούμε να υπολογίσουμε τιμές για τους βασικούς συνδυασμούς χρωμάτων, όπως φαίνεται στον επόμενο πίνακα:

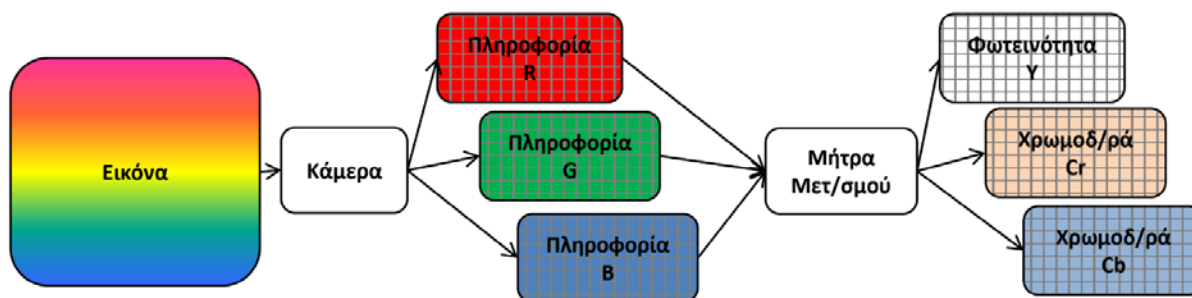
Χρώμα	R	G	B	Y	R-Y	G-Y	B-Y
Μαύρο	0	0	0	0	0	0	0
Μπλε	0	0	1	0,11	-0,11	-0,11	0,89
Πράσινο	0	1	0	0,59	-0,59	0,41	-0,59
Γαλανό	0	1	1	0,70	-0,70	0,30	0,30
Κόκκινο	1	0	0	0,30	0,70	-0,30	-0,30
Πορφυρό	1	0	1	0,41	0,59	-0,41	0,59
Κίτρινο	1	1	0	0,89	0,11	0,11	-0,89
Λευκό	1	1	1	1	0	0	0

Πίνακας 2.1 Υπολογισμός φωτεινότητας και χρωμοδιαφορών.

Παρατηρούμε ότι τη μέγιστη τιμή της φωτεινότητας έχουμε στην περίπτωση του λευκού (η τιμή είναι μονάδα) και, όπως αναμέναμε, ελάχιστη στην περίπτωση του μαύρου (όπου η τιμή γίνεται μηδενική). Είναι ευνόητο ότι εκ των τριών χρωμοδιαφορών (Cr, Cg και Cb) χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε δύο εξ αυτών (αφού με τη βοήθεια και της φωτεινότητας θα έχουμε πλήρη περιγραφή των χρωμάτων, έχουμε δηλαδή σύστημα με τρεις ανεξάρτητες μεταβλητές).

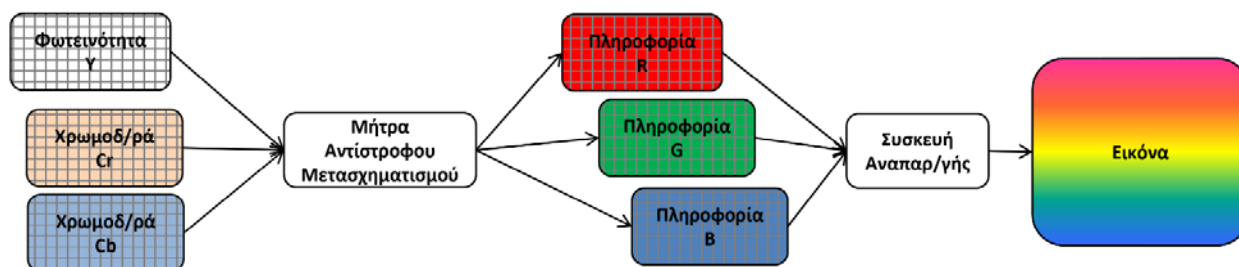
Το επόμενο, λοιπόν, ερώτημα το οποίο τίθεται αφορά την επιλογή του ζευγαριού των χρωμοδιαφορών οι οποίες θα συνδυαστούν με τη φωτεινότητα για την περιγραφή του χρώματος. Παρατηρώντας τις τιμές που προκύπτουν για τους βασικούς συνδυασμούς στον παραπάνω πίνακα, βλέπουμε ότι οι τιμές των χρωμοδιαφορών Cb και Cr είναι συστηματικά μεγαλύτερες ή ίσες από τις τιμές της χρωμοδιαφοράς Cg. Αυτό σημαίνει ότι οι τιμές τους θα είναι λιγότερο ευάλωτες στον αναπόφευκτο θόρυβο και τα σφάλματα που θα επηρεάσουν την περιγραφή και τη μετάδοσή τους. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο επιλέγονται οι χρωμοδιαφορές Cb και Cr. Έτσι, με τη βοήθεια αυτών θεωρούμε τον χώρο που αποτελείται από τη φωτεινότητα και τις δύο χρωμοδιαφορές, στον οποίο θα αναφερόμαστε ως YCbCr.

Στα δύο επόμενα σχήματα παρουσιάζονται οι διαδικασίες μετατροπής από τον χώρο περιγραφής RGB στον χώρο YCbCr, η οποία γίνεται στην περιοχή του εικονολήπτη (κάμερα) και η μετατροπή από το YCbCr στον χώρο RGB, η οποία γίνεται κατά την αναπαραγωγή του περιεχομένου, στην περιοχή δηλαδή του τηλεοπτικού δέκτη.



Εικόνα 2.2 Μετατροπή χρωματικής πληροφορίας από τον χώρο RGB στον χώρο YCbCr.

Η διαδικασία επαναφοράς της πληροφορίας από τη μορφή YCbCr στον χώρο των βασικών χρωμάτων, RGB, παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 2.3 Επαναφορά πληροφορίας από τον χώρο YCbCr στον χώρο RGB.

Στο αναλογικό βίντεο, μπορούμε είτε να επιλέξουμε να παραμείνουμε σε αυτό το επίπεδο, των τριών διακριτών σημάτων, είτε να δημιουργήσουμε σύνθετα σήματα (συνδυάζοντας κάποια εξ αυτών). Αυτό μπορεί να γίνει παράγοντας ένα σήμα χρώματος από το Cb και το Cr ή και ένα σύνθετο σήμα με πληροφορίες φωτεινότητας και χρώματος που είναι το σύνθετο σήμα (Composite video).

2.3 Δημιουργία Σήματος στην Αναλογική Τηλεόραση

Όπως συζητήσαμε στην προηγούμενη ενότητα, η έξοδος μιας μηχανής λήψης (εικονολήπτη) είναι ένα σήμα σε μορφή RGB το οποίο περιγράφει την ένταση των τριών βασικών χρωμάτων. Με δεδομένο ότι το ανθρώπινο μάτι είναι εξαιρετικά ευαίσθητο στις μεταβολές της έντασης και όχι στη συχνότητα των ερεθισμάτων (δηλαδή είναι περισσότερο ευαίσθητο στην φωτεινότητα σε σχέση με τα χρώματα) αυτό που μας ενδιαφέρει είναι να μεταφέρουμε όσο το δυνατόν καλύτερα την πληροφορία της φωτεινότητας (την οποία συμβολίζουμε με το γράμμα Y).

Το σήμα φωτεινότητας, όπως είδαμε παραπάνω, παράγεται από απλές μαθηματικές πράξεις μεταξύ των τριών χρωμάτων. Στην κωδικοποίηση αυτή παράγονται τρία σήματα, της φωτεινότητας (Y) και οι χρωμοδιαφορές του κόκκινου και του μπλε (Cr και Cb αντιστοίχως).

Ο ρυθμός δεδομένων (άρα και το εύρος ζώνης) του βίντεο εξαρτάται από δύο παραμέτρους: (α) την ανάλυση κάθε εικόνας και (β) τη συχνότητα με την οποία λαμβάνονται οι εικόνες. Η πρώτη παράμετρος σχετίζεται με το πλήθος των γραμμών κάθε εικόνας και των δειγμάτων που λαμβάνονται εντός κάθε γραμμής.

Παγκοσμίως έχουν επικρατήσει δύο συστήματα: το πρώτο έχει 625 γραμμές ανά εικόνα, το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως στην Ευρώπη και το δεύτερο έχει 525 γραμμές ανά εικόνα, το οποίο χρησιμοποιείται κατά βάση στην Αμερική. Αναφορικά με τη συχνότητα λήψης εικόνων, έχουμε, στην αναλογική τηλεόραση, δύο τιμές, τα 25 και τα 30 Hz (25 και 30 εικόνες το δευτερόλεπτο), αντίστοιχα προς τις τιμές των γραμμών ανά εικόνα.

Στην ενότητα αυτή θα εξετάσουμε τρία από τα βασικά χαρακτηριστικά της δημιουργίας του βίντεο στην αναλογική τηλεόραση, συγκεκριμένα τη διαπλεγμένη σάρωση (interlaced scanning), τους παλμούς οριζόντιας και κατακόρυφης επιστροφής και τον τρόπο με τον οποίο τα διάφορα συστήματα στην αναλογική τηλεόραση διαχειρίζονται το χρώμα (1).

2.3.1 Διαπλεγμένη Σάρωση

Κατά τις πρώτες φάσεις της αναλογικής τηλεόρασης (και για μακρό χρονικό διάστημα) τόσο τα συστήματα δημιουργίας (εικονολήπτης), όσο και τα συστήματα αναπαραγωγής σήματος (τηλεοπτικός δέκτης) βασίστηκαν στην τεχνολογία του καθοδικού σωλήνα (Cathode Ray Tube, CRT). Στα συστήματα αυτά και συγκεκριμένα στον εικονολήπτη χρησιμοποιείται δέσμη ηλεκτρονίων η οποία μέσω της σάρωσης της επιφάνειας της εικόνας (εκεί όπου προβάλλεται το είδωλο) εξάγει την πληροφορία αρχικά της φωτεινότητας (στην περίπτωση αρχικά της ασπρόμαυρης τηλεόρασης) και στη συνέχεια (με την έλευση της έγχρωμης τηλεόρασης) και των χρωμάτων.

Ομοίως και στην πλευρά του δέκτη, με τη χρήση των τηλεοράσεων καθοδικού σωλήνα, η ηλεκτρονική δέσμη του δέκτη χρησιμοποιήθηκε (στην περίπτωση των τηλεοράσεων με τεχνολογία καθοδικού σωλήνα) για την αναπαράσταση των εικόνων μέσω της διέγερσης της επιφάνειας του καθοδικού σωλήνα. Περισσότερες λεπτομέρειες θα δούμε στο σχετικό κεφάλαιο που ασχολείται με τους δέκτες.

Και στις δύο περιπτώσεις, πάντως, η δέσμη ηλεκτρονίων χρειάζεται κάποιο χρονικό διάστημα για να επιστρέφει από δεξιά προς τα αριστερά, για όλες τις γραμμές μιας εικόνας και από το κάτω προς το επάνω μέρος όταν ολοκληρωθεί η προβολή μιας εικόνας. Ο εικονολήπτης (κάμερα) σαρώνει την επιφάνεια της εικόνας με συγκεκριμένο τρόπο ο οποίος πρέπει να είναι κοινός στον πομπό και τον δέκτη. Ο σχετικά χαμηλός ρυθμός ανανέωσης των εικόνων, 25 (ή 30) εικόνες ανά δευτερόλεπτο υποβάθμιζαν την ποιότητα της εικόνας (τρεμόσβημα της εικόνας), ιδίως στα σημεία μεγάλης φωτεινότητας αυτής.

Για να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο, επινοήθηκαν διάφορες τεχνικές λύσεις. Η πρώτη και πιο προφανής λύση ήταν να αυξηθεί (π.χ., διπλασιαστεί) ο ρυθμός ανανέωσης των εικόνων. Μια τέτοια λύση, ωστόσο, θα διπλασίαζε το πλήθος των δεδομένων που αποστέλλονται από τον πομπό στον δέκτη άρα και το απαιτούμενο εύρος ζώνης. Το γεγονός αυτό κατέστησε τη συγκεκριμένη λύση μη εφικτή (κυρίως λόγω του περιορισμένου εύρους ζώνης με τα τότε τεχνικά μέσα).

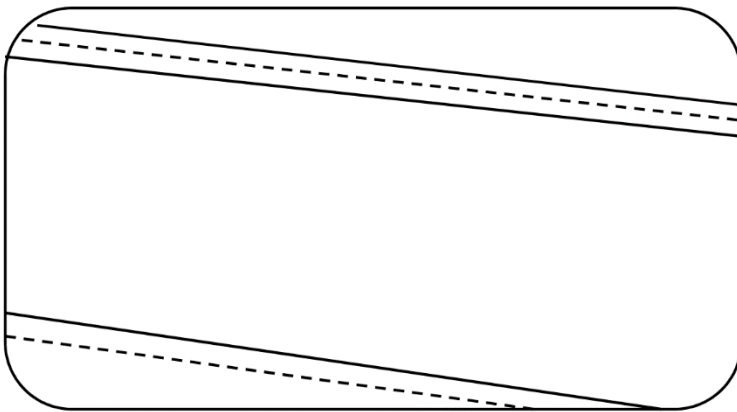
Αντί αυτής χρησιμοποιήθηκε το τέχνασμα της διαπλεγμένης σάρωσης (interlaced scanning) όπως παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα. Συγκεκριμένα, η σάρωση της εικόνας γίνεται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση η δέσμη σαρώνει τις περιττές γραμμές και αφού αυτές ολοκληρώνονται (από το πάνω μέρος της οθόνης μέχρι το κάτω) η σάρωση συνεχίζεται (ως δεύτερη φάση) στις άρτιες γραμμές. Αυτό σημαίνει ότι κάθε πλαίσιο (frame) χωρίζεται σε δύο πεδία (fields). Το πρώτο πεδίο περιλαμβάνει τις περιττές γραμμές (περιττό πεδίο) και το δεύτερο πεδίο περιλαμβάνει τις άρτιες γραμμές (άρτιο πεδίο).

Με αυτόν τον τρόπο της διαπλεγμένης σάρωσης, ο ρυθμός μετάδοσης των πεδίων είναι διπλάσιος από εκείνον των πλαισίων. Στην περίπτωση που είχαμε 25 πλαίσια το δευτερόλεπτο (25Hz), ο αριθμός πεδίων γίνεται 50 πεδία το δευτερόλεπτο, ενώ αντίστοιχα στην περίπτωση των 30 πλαισίων ανά δευτερόλεπτο (30Hz), ο ρυθμός πεδίων γίνεται 60 πεδία ανά δευτερόλεπτο (60 Hz).

Ισχύει δηλαδή η επόμενη σχέση που συνδέει τον ρυθμό μετάδοσης πεδίων με τον ρυθμό μετάδοσης πλαισίων:

$$\text{Ρυθμός μετάδοσης πεδίων} = 2 * \text{ρυθμός μετάδοσης πλαισίων} \quad (7)$$

Στο επόμενο σχήμα, το ένα πεδίο αποτελείται από τις διακεκομμένες γραμμές, ενώ το άλλο από τις συνεχείς γραμμές.



Εικόνα 2.4 Διαπλεγμένη σάρωση.

Παρόλο που η διαπλεγμένη σάρωση (interlaced scanning) αποτελεί σχεδόν καθολικό κανόνα στην αναλογική τηλεόραση, στην ψηφιακή τηλεόραση υποστηρίζεται και η προοδευτική σάρωση (progressive scanning), κυρίως στις περιπτώσεις υψηλής ευκρίνειας, λόγω αφενός των ενισχυμένων δυνατοτήτων του εμπλεκόμενου υλικού αλλά και των βελτιωμένων μεθόδων επικοινωνίας.

2.3.2 Παλμοί Οριζόντιας και Κατακόρυφης Επιστροφής

Το οπτικό σήμα στην αναλογική τηλεόραση δεν περιλαμβάνει μόνο τη χρήσιμη πληροφορία (με τον όρο «χρήσιμη» πληροφορία εννοούμε την πληροφορία που αφορά τις εικόνες που παρουσιάζονται και αποτελούν το βίντεο). Το γεγονός αυτό οφείλεται στους τεχνικούς περιορισμούς στις συσκευές δημιουργίας του σήματος (εικονολήπτης, κάμερα) αλλά και αναπαραγωγής του σήματος (τηλεοπτικό δέκτη), οι οποίες, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, στις πρώτες φάσεις της αναλογικής τηλεόρασης (και για μεγάλο χρονικό διάστημα) βασίστηκαν στην τεχνολογία του καθοδικού σωλήνα.

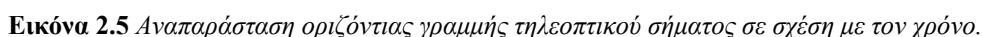
Έτσι λόγω των περιορισμών του υλικού των συσκευών καθοδικού σωλήνα, υπήρχε η ανάγκη να διακόπτεται η εκπεμπόμενη δέσμη ηλεκτρονίων στον καθοδικό σωλήνα: (α) κατά την επιστροφή της δέσμης οριζοντίως (δηλαδή μόλις ολοκληρωθεί η σάρωση μιας γραμμής), οπότε έχουμε το διάστημα (ή τον παλμό) οριζόντιας επιστροφής ή αμαύρωσης (Horizontal Blanking Interval, HBI) και (β) κατά την επιστροφή της δέσμης κατακόρυφα, δηλαδή μόλις ολοκληρωθεί η εμφάνιση ενός πλαισίου ή συνθηθέστερα πεδίου, λόγω του

Οι παλμοί επιστροφής ή αμαύρωσης είναι, λοιπόν, των επόμενων δύο κατηγοριών:

- Μια ενδεικτική αναπαράσταση του σήματος βίντεο κατά τη διάρκεια μιας οριζόντιας γραμμής απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα. Κάθε οριζόντια γραμμή αντιστοιχεί σε 64 μs . Η τιμή αυτή προκύπτει θεωρώντας 625 γραμμές ανά πλαίσιο και 25 πλαίσια το δευτερόλεπτο.

Η έναρξη κάθε οριζόντιας γραμμής περιλαμβάνει έναν οριζόντιο παλμό επιστροφής. Ο οριζόντιος παλμός διαρκεί περίπου 12 μs (συγκεκριμένα 12,05 μs). Το χρονικό διάστημα του ενεργού σήματος (δηλαδή της πληροφορίας που αφορά την εικόνα) είναι 52 μs . Εντός του οριζόντιου παλμού επιστροφής υπάρχει ο παλμός συγχρονισμού, ο οποίος διαρκεί 4,7 μs .

Αναφορικά με τις σχετικές τιμές του σήματος βίντεο, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το μαύρο αντιστοιχεί στα 0 V, το λευκό στα 700 mV και ο παλμός συγχρονισμού στα -300 mV. Άρα το σήμα της φωτεινότητας λαμβάνει τιμές μεταξύ των 0V (αντιστοιχεί στο μαύρο) και των 700 mV (τιμή η οποία αντιστοιχεί στο λευκό).



Με βάση τα παραπάνω οι παλμοί HBI και VBI αντιστοιχούν (χρονικά) στο 18% και το 7% του συνολικά εκπεμπόμενου σήματος, το οποίο σημαίνει ότι 25% περίπου του χρόνου δεν μεταδίδεται σήμα βίντεο.

$$12 \mu s / 64 \mu s = 18.75\%$$

$$50 / 625 = 8 \%$$

(9)

Λόγω της μη μετάδοσης σήματος κατά τα διαστήματα αυτά, υπήρχε η δυνατότητα εκμετάλλευσης του εμπλεκόμενου εύρους ζώνης μέσω της εισαγωγής:

- Παλμών συγχρονισμού (εντός του παλμού οριζόντιας αμαύρωσης) και ενός μικρού δείγματος της φέρουσας μέσω της οποίας μεταδίδεται η πληροφορία των χρωμάτων (χρωμοφέρουσα). Το δείγμα αυτό ονομάζεται σήμα burst και είναι απαραίτητο για τη σύγχρονη αποδιαμόρφωση του σήματος των χρωμοδιαφορών.
- Της υπηρεσίας Teletext (εντός του παλμού κατακόρυφης αμαύρωσης)

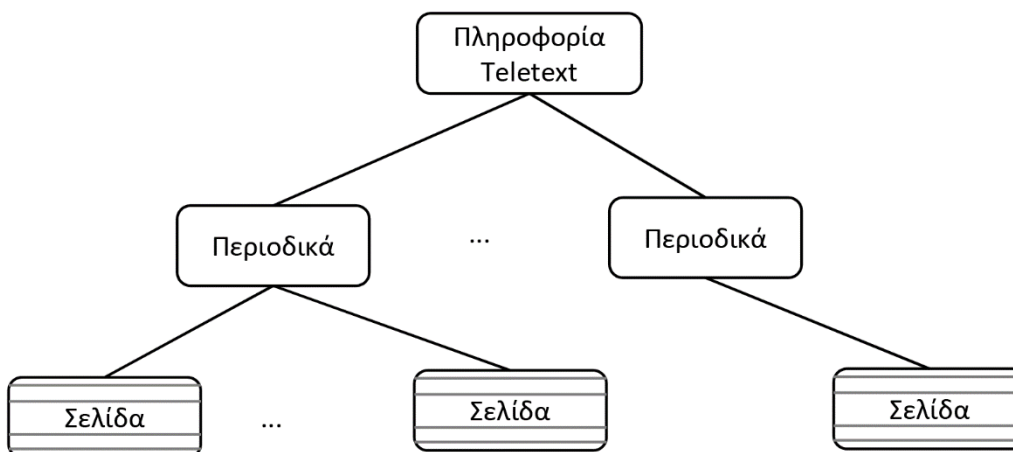
Ας εξετάσουμε με λίγο μεγαλύτερη ανάλυση το περιεχόμενο του Κατακόρυφου Παλμού Αμαύρωσης, αφού αυτό είναι που έχει και μεγαλύτερη συνεχόμενη διάρκεια και επιτρέπει ευκολότερα τη μετάδοση δεδομένων.

2.3.2.1 Δεδομένα εντός του Παλμού Κατακόρυφης Επιστροφής

Από την πρώτη περίοδο της αναλογικής τηλεόρασης έγινε προσπάθεια καλύτερης εκμετάλλευσης του χρονικού διαστήματος το οποίο αντιστοιχεί στον κατακόρυφο παλμό επιστροφής (ή αμαύρωσης). Αρχικά ο παλμός αυτός είχε χρησιμοποιηθεί για την εισαγωγή σημάτων ελέγχου κατακόρυφου παλμού αμαύρωσης (Vertical Insertion Test Signals, VITS) με τα οποία μπορούσε να γίνει έλεγχος της ποιότητας του σήματος. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια του κατακόρυφου παλμού αμαύρωσης γινόταν η μετάδοση της υπηρεσίας του Teletext.

Το Teletext είναι μια υπηρεσία μετάδοσης δεδομένων, η οποία χρησιμοποιήθηκε κατά κόρον και σχεδόν σε αποκλειστικότητα στην αναλογική τηλεόραση. Ο ρυθμός μετάδοσης προσεγγίζει τα 6,9 Mbit/s κατά τη διάρκεια των παλμών κατακόρυφης αμαύρωσης, με χαμηλότερο ρυθμό στη διάρκεια του συνολικού σήματος. Το σήμα του Teletext αποτελείται από περιοδικά (magazines). Τα περιοδικά αποτελούνται από σελίδες (pages) και κάθε σελίδα από γραμμές (lines). Κάθε σελίδα έχει 24 γραμμές (lines) και σε κάθε γραμμή μπορεί να υπάρχουν 40 χαρακτήρες. Ενδεικτικά, μια σελίδα Teletext μπορεί να μεταδοθεί κατά τη διάρκεια ενός κατακόρυφου παλμού αμαύρωσης, εφόσον το σύνολο του παλμού χρησιμοποιηθεί για τον σκοπό αυτό.

Η δένδροειδής δομή της πληροφορίας εντός της υπηρεσίας Teletext, με χρήση των περιοδικών και των σελίδων, απεικονίζεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 2.6 Δόμηση πληροφορίας Teletext.

Η πληροφορία μεταδίδεται με κωδικοποίηση NRZ (non-return-to-zero). Κάθε γραμμή ξεκινά με μια λέξη των 16 bits αποτελούμενη από εναλλαγές 1 και 0 για να επιτευχθεί συγχρονισμός. Στη συνέχεια υπάρχει η κωδική λέξη 0xE4 η οποία σηματοδοτεί την έναρξη των δεδομένων του Teletext. Κατόπιν δίνονται πληροφορίες για το περιοδικό, τη σελίδα, τη γραμμή και μετά μεταδίδονται οι 40 χαρακτήρες της γραμμής. Επίσης υπάρχει και προστασία από τα σφάλματα με άρτια ισοτιμία.

Η ανάγκη για την ύπαρξη των παλμών οριζόντιου και κατακόρυφου συγχρονισμού, έπαψε να υφίσταται αρχικά από την πλευρά της δημιουργίας του σήματος (με τη χρήση των συσκευών τύπου CCD – Charged Couple Devices) αλλά και στην πλευρά της αναπαραγωγής του τηλεοπτικού σήματος, δηλαδή στον τηλεοπτικό δέκτη, με την έλευση των επίπεδων συσκευών. Παρά, όμως, το γεγονός αυτό, το χρονικό διάστημα «αμαύρωσης» συνεχίζει να υφίσταται και στο ψηφιοποιημένο σήμα.

2.3.3 Συστήματα Διαχείρισης Χρώματος

Ως γνωστόν, η μετάβαση από την ασπρόμαυρη τηλεόραση στην έγχρωμη τηλεόραση δημιούργησε αρκετές τεχνικές προκλήσεις, με κυριότερη την εισαγωγή της πληροφορίας του χρώματος στο σήμα το οποίο δημιουργείται από τη συσκευή λήψης, μεταδίδεται μέσω του τηλεπικοινωνιακού διαύλου και αναπαράγεται στον δέκτη. Η εισαγωγή αυτή έπρεπε να γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξασφαλίζεται η συμβατότητα με την προηγούμενη τεχνολογία.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η γνώση για το ανθρώπινο σύστημα όρασης, το οποίο είναι πολύ πιο ευαίσθητο στη διαφοροποίηση των τιμών της φωτεινότητας σε σχέση με τις διαφοροποιήσεις στις τιμές των χρωμάτων. Αυτό σημαίνει ότι χρειάζεται να δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στο σήμα της φωτεινότητας αφού είναι και πιο σημαντικό αναφορικά με την αντίληψη μιας εικόνας (από τον ανθρώπινο οφθαλμό).

Στην αναλογική τηλεόραση έχουν χρησιμοποιηθεί τρία συστήματα διαχείρισης των χρωμάτων, το πρώτο χρησιμοποιήθηκε στην Αμερική και τα άλλα δύο στην Ευρώπη. Αυτά είναι τα εξής:

- NTSC (National Television Systems Committee)
- PAL (Phase Alternation per Line)
- SECAM (Séquentiel couleur à mémoire, Sequential Color with Memory)

Και στα τρία συστήματα χρησιμοποιείται το σήμα της φωτεινότητας, Y. Το σήμα της φωτεινότητας Y μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας σε έναν ασπρόμαυρο δέκτη και αυτό εξασφαλίζει συμβατότητα προς τα πίσω. Αυτό ήταν ένα σημαντικό χαρακτηριστικό, δεδομένης της επένδυσης που είχε γίνει από τους χρήστες εκείνη την περίοδο σε ασπρόμαυρους δέκτες.

Η ενσωμάτωση της πληροφορίας του χρώματος στο σήμα CVBS (Composite Video Blanking and Synchronization) έπρεπε να γίνει με τις ελάχιστες δυνατές επιδράσεις στους υπάρχοντες δέκτες. Για τον σκοπό αυτό το σήμα του χρώματος μεταδίδεται παράλληλα με αυτό της φωτεινότητας. Εν γένει υπάρχει διαφοροποίηση στο φάσμα που αφιερώνεται στο σήμα φωτεινότητας και αυτού των χρωμαδιαφορών.

Συγκεκριμένα, στο ευρωπαϊκό τηλεοπτικό σύστημα PAL, το εύρος ζώνης του σήματος Y είναι περί τα 5,5 MHz, τα δε σήματα U, V είχαν εύρος ζώνης περί τα 1,3 MHz. Αντίστοιχη διαφοροποίηση στο εύρος ζώνης υπάρχει και στο αναλογικό σύστημα στις ΗΠΑ, το NTSC με τα σήματα της φωτεινότητας και των χρωμοδιαφορών I και Q.

Το βασικό σημείο διαφοροποίησης των συστημάτων έγχρωμης τηλεόρασης είναι ο τρόπος που προκύπτουν τα σήματα αυτά. Στην περίπτωση του NTSC τα σήματα χρώματος ονομάζονται I και Q και υπολογίζονται με βάση τις επόμενες σχέσεις.

$$\begin{aligned} I &= -0,27 (B-Y) + 0,74 (R-Y) \\ Q &= 0,41 (B - Y) + 0,48 (R-Y) \end{aligned} \quad (10)$$

Στην περίπτωση του PAL τα σήματα χρώματος ονομάζονται U και V και υπολογίζονται με βάση τις επόμενες σχέσεις.

$$U = 0,49 (B-Y)$$

$$V = 0,88 (R-Y) \quad (11)$$

Στην περίπτωση του SECAM τα σήματα χρώματος ονομάζονται D_R και D_B και υπολογίζονται με βάση τις επόμενες σχέσεις.

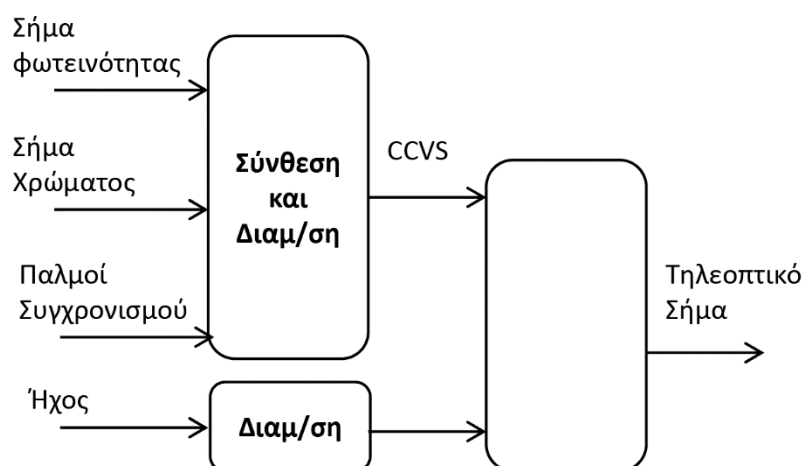
$$\begin{aligned} D_R &= -1,9 (R-Y) \\ D_B &= 1,5 (R-Y) \end{aligned} \quad (12)$$

Παρατηρούμε ότι και στις τρεις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται οι χρωμοδιαφορές C_b και C_r . Τα σήματα των χρωμάτων διαμορφώνονται από έναν IQ διαμορφωτή (NTSC και PAL) ή με διαμόρφωση συχνότητας (SECAM). Στην περίπτωση του PAL η συχνότητα της IQ διαμόρφωσης είναι:

$$f_{SC} = 283,75 f_H + 25 \text{ Hz} = 4,43 \text{ MHz} \quad (13)$$

Στο σύστημα SECAM, το σήμα των χρωμοδιαφορών διαμορφώνεται κατά συχνότητα (frequency modulation) από δύο διαφορετικά φέροντα. Ανά γραμμή χρησιμοποιείται διαφορετικό φέρον. Το SECAM πλεονεκτεί σε σχέση με το PAL λόγω της μικρότερης ευαισθησίας που επιδεικνύει σε αλλαγές φάσης ανά γραμμή της εικόνας, αφού εμποδίζει με αυτόν τον τρόπο την αλλαγή του χρώματος λόγω διαφοράς φάσης κατά τη μετάδοση.

Το σύνθετο (composite) σήμα βίντεο και για τις τρεις τεχνολογίες διαχείρισης του χρώματος (PAL, NTSC και SECAM) προκύπτει από τη σύνθεση του σήματος φωτεινότητας, της πληροφορίας συγχρονισμού και των σημάτων χρώματος. Το προκύπτον σήμα ονομάζεται CCVS (Composite Color, Video Synchronization). Η σύνθεση αυτή παρίσταται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 2.7 Δημιουργία σήματος στην αναλογική τηλεόραση.

Στην επόμενη ενότητα θα καταπιαστούμε με τη δημιουργία του ψηφιακού σήματος, το οποίο περιγράφεται ως δυαδική ακολουθία, η οποία αποτελείται από τα τρία διακριτά σήματα τα οποία τελικά συνενώνονται.

2.4 Δημιουργία Ψηφιακού Σήματος

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε τον μηχανισμό δημιουργίας του ψηφιακού σήματος. Θα εστιάσουμε στην αρχική του μορφή, χωρίς, δηλαδή, να έχει υποστεί κάποια συμπίεση. Ο μηχανισμός βασίζεται στο πρότυπο ITU-BT R601 (*Studio Encoding Parameters of Digital Television for Standard 4:3 and wide screen 16:9 aspect ratios*) (15).

Όπως φαίνεται και από τον τίτλο του σχετικού προτύπου, το σήμα που δημιουργείται και αξιοποιείται κατά βάση εντός του στούντιο δεν είναι κατάλληλο (κυρίως λόγω της μεγάλου ρυθμού μετάδοσης που θα απαιτούσε) για μετάδοση. Η πρώτη έκδοση του προτύπου δημιουργήθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1980 και έκτοτε κατάφερε να συγκεράσει διαφορετικές κατευθύνσεις που είχαν ξεκινήσει να δημιουργούνται σε διαφορετικές χώρες αναφορικά με τη μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή τηλεόραση. Συγκεκριμένα, τη δυνατότητα λήψης και αναπαραγωγής βίντεο σε διαπλεγμένη (interlaced) μορφή, με διαδοχική αποστολή των πεδίων, χρήση του τρόπου χρωματικής αναπαράστασης και δειγματοληψία του σήματος φωτεινότητας με συχνότητα 13,5 MHz.

Ως επέκταση αυτού, το BT.656 περιγράφει ένα ψηφιακό πρωτόκολλο βίντεο για τη μετάδοση μη συμπίεσμένου σήματος PAL ή NTSC κανονικής ευκρίνειας (625 και 525 γραμμές αντίστοιχα). Βασίζεται στην κωδικοποίηση τύπου 4:2:2 με τις παραμέτρους οι οποίες ορίζονται στο πρότυπο ITU-RBT.601 (12).

Το πρώτο βήμα στη δημιουργία του ψηφιακού σήματος είναι η λήψη των τιμών των βασικών χρωματικών συνιστωσών κόκκινου, πράσινου και μπλε (Red, Green, Blue) ως τριών διακριτών σημάτων τα οποία συμβολίζουμε με την επόμενη τριάδα συμβόλων (R, G, B). Αρχικά τα σήματα υφίστανται διόρθωση γάμμα. Η διαδικασία αυτή αφορά την αντιστοίχιση της φωτεινότητας στην τάση μέσω μιας εκθετικής σχέσης σύμφωνα με τις προδιαγραφές του CCIR Rec.709 (16). Το συγκεκριμένο πρότυπο ασχολείται με τις παραμέτρους που αφορούν το βίντεο τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας με λόγο διαστάσεων 16:9.

Στο σύστημα προβολής (τηλεοπτικό δέκτη) λαμβάνει χώρα η διόρθωση γάμμα ώστε η σχέση τάσης σήματος βίντεο και φωτεινότητας να γίνει ξανά γραμμική. Η διόρθωση γάμμα γίνεται με μια συνάρτηση στην ανεξάρτητη μεταβλητή της οποίας ο εκθέτης είναι ο αντίστροφος του εκθέτη που χρησιμοποιήθηκε στην αντίστροφη διόρθωση γάμμα, δηλαδή $(1/0,45=2,2)$.

Στη συνέχεια τα τρία αυτά σήματα υφίστανται επεξεργασία ώστε να δώσουν το σήμα φωτεινότητας Y και τα σήματα χρωμικότητας, δηλαδή τις χρωμοδιαφορές Cb και Cr.

$$\begin{aligned} Y &= 0,299 R + 0,587 G + 0,114 B \\ Cb &= R - Y = 0,701R - 0,587G - 0,114B \\ Cr &= B - Y = -0,299R - 0,587G + 0,886B \end{aligned} \quad (14)$$

Οι τιμές της μεταβλητής Y έχουν εύρος τιμών από 0 έως 1,0, ενώ η χρωμοδιαφορά Cr από -0,701 έως +0,701 και της Cb από -0,886 έως +0,886. Για να αντιστοιχιστούν τα εύρη των τιμών στην μονάδα, γίνεται κλιμάκωση των τιμών και οι χρωμοδιαφορές κυμαίνονται στο διάστημα -0,5 έως και 0,5.

$$\begin{aligned} Cb &= 0,56 \cdot (B - Y) \\ Cr &= 0,71 \cdot (R - Y) \end{aligned} \quad (15)$$

Στο σημείο αυτό θεωρούμε ότι έχουμε την αρχική μορφή του ψηφιακού σήματος, το οποίο περιλαμβάνει τη φωτεινότητα και τις χρωμοδιαφορές.

2.4.1 Φιλτράρισμα και Δειγματοληψία

Το σήμα στη συνέχεια φιλτράρεται με χρήση φίλτρου χαμηλών συχνοτήτων. Συγκεκριμένα, το σήμα της φωτεινότητας υφίσταται φιλτράρισμα στα 5,75 MHz, ενώ τα σήματα των χρωμοδιαφορών στα 2,75 MHz με χρήση φίλτρων χαμηλών συχνοτήτων. Υπενθυμίζεται ότι ανάλογος περιορισμός – φιλτράρισμα υφίσταται το σήμα των χρωμάτων και στην αναλογική τηλεόραση.

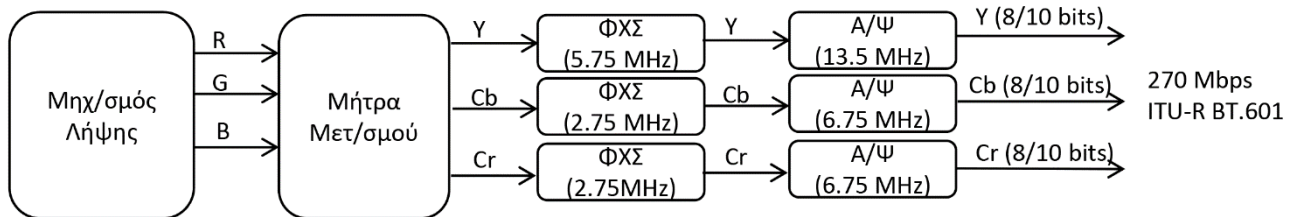
Τα σήματα Y, Cb, Cr μετατρέπονται στη συνέχεια σε σήματα διακριτού χρόνου, με χρήση δειγματοληψίας. Οι συχνότητες δειγματοληψίας για τα σήματα πρέπει να υπερβαίνουν το διπλάσιο της μέγιστης συνιστώσας συχνότητας (σύμφωνα και με το φιλτράρισμα που έχουν υποστεί) ώστε να ικανοποιούν το θεώρημα του Shannon και εμφανίζονται στον επόμενο πίνακα.

Παρατηρούμε ότι η συχνότητα δειγματοληψίας της φωτεινότητας είναι η διπλάσια από αυτή των χρωμοδιαφορών, με αποτέλεσμα το πλήθος των δειγμάτων που αφορούν τη φωτεινότητα να ισούται με το πλήθος των δειγμάτων που αφορούν τις χρωμοδιαφορές.

Σήμα	Συχνότητα Δειγματοληψίας (MHz)
Y	13,5
Cb	6,75
Cr	6,75

Πίνακας 2.2 Συχνότητες δειγματοληψίας φωτεινότητας και χρωμοδιαφορών.

Η διαδικασία που ακολουθείται παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα. Οι βαθμίδες που συνθέτουν το σύστημα είναι ο μηχανισμός δημιουργίας των σημάτων R, G, B, η μήτρα μετασχηματισμού σε Y, Cb, Cr, τα Φίλτρα Χαμηλών Συχνοτήτων (ΦΧΣ) και το σύστημα δειγματοληψίας (αναλογικό σε ψηφιακό) το οποίο πραγματοποιεί τη δειγματοληψία και στη συνέχεια τον κβαντισμό με 8 ή 10 bits.



Εικόνα 2.8 Δημιουργία σήματος στην ψηφιακή τηλεόραση.

Παρατηρούμε ότι η δειγματοληψία δίνει ρυθμό ο οποίος υπολογίζεται στα 270 Mbps (στην περίπτωση της χρήσης 10 bits ανά δείγμα). Η χρήση 8 bits δίνει έναν αντίστοιχο ρυθμό στα 216 Mbps. Περισσότερες λεπτομέρειες για τον κβαντισμό του σήματος, δίνονται στην επόμενη ενότητα.

2.4.2 Κβαντισμός

Το επόμενο βήμα στην επεξεργασία του σήματος είναι ο κβαντισμός του, ο οποίος πραγματοποιείται αντιστοιχίζοντας κάθε δείγμα σε ακολουθία bits. Ο κβαντισμός των σημάτων της φωτεινότητας και των χρωμοδιαφορών πραγματοποιείται με χρήση κατ' ελάχιστον οκτώ bits για τη φωτεινότητα και τεσσάρων bits για τις χρωμοδιαφορές. Οι συνήθεις τιμές είναι τα 8 ή τα 10 bits και για τα τρία μεγέθη. Στην περίπτωση που έχουμε ομοιόμορφο κβαντισμό με χρήση 8 και 10 bits, θα έχουμε 2^8 και 2^{10} επίπεδα κβαντισμού. Το πλήθος των τιμών είναι αντίστοιχα 256 και 1.024.

Το πλήθος των bits που επιλέγουμε για τον κβαντισμό σχετίζεται με την ποιότητα του κβαντισμού και συγκεκριμένα τον λόγο του σήματος προς τον θόρυβο κβαντισμού (Signal to Quantization Noise Ratio, SQNR). Το SQNR σχετίζεται με την προσέγγιση (στρογγυλοποίηση) που πραγματοποιείται και εξαρτάται από το πλήθος των διαθέσιμων επιπέδων. Στην ουσία αφορά τη διαφορά μεταξύ της πραγματικής τιμής του αναλογικού σήματος και της κοντινότερης κβαντισμένης τιμής. Η στρογγυλοποίηση αυτή αφορά το σφάλμα κβαντισμού (ή, αλλιώς, τον θόρυβο κβαντισμού).

Μιας και το σφάλμα κβαντισμού είναι κατά μέγιστο το ήμισυ του διαστήματος κβαντισμού, μπορούμε να το υπολογίσουμε με χρήση του πλήθους των bits έστω N. Συγκεκριμένα, έστω ότι η μέγιστη τιμή είναι $2^{N-1} - 1$ ($\sim 2^{N-1}$) και στα αρνητικά (κατ' απόλυτη τιμή): -2^{N-1} . Η τιμή του SQNR μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$SQNR = 20 \log 2^{(N-1)/(1/2)} = 20 \cdot N \cdot \log 2 = 6.02N \text{ (dB)}$$

(16)

Ο ρυθμός μετάδοσης για δειγματοληψία με ρυθμούς 13,5 MHz και 6,75MHz αντίστοιχα και κβαντισμό (α) με χρήση 8 bits και για τις τρεις προκύπτουσες συνιστώσες και (β) 10 bits για τις τρεις συνιστώσες προκύπτει από τις επόμενες σχέσεις. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε κβαντισμό με χρήση 8 bits:

$$\begin{aligned} Y: 13,5 \text{ MHz} * 8 \text{ bits / sample} &= 108 \text{ Mbps} \\ Cb: 6,75 \text{ MHz} * 8 \text{ bits / sample} &= 54 \text{ Mbps} \\ Cr: 6,75 \text{ MHz} * 8 \text{ bits / sample} &= 54 \text{ Mbps} \end{aligned}$$

(17)

Οι επιμέρους ρυθμοί αθροίζονται στα 216 Mbps. Στη δεύτερη περίπτωση όπου ο κβαντισμός γίνεται με χρήση 10 bits έχουμε τους επόμενους επιμέρους ρυθμούς:

$$\begin{aligned} Y: 13,5 \text{ MHz} * 10 \text{ bits / sample} &= 135 \text{ Mbps} \\ Cb: 6,75 \text{ MHz} * 10 \text{ bits / sample} &= 67,5 \text{ Mbps} \\ Cr: 6,75 \text{ MHz} * 10 \text{ bits / sample} &= 67,5 \text{ Mbps} \end{aligned}$$

(18)

Αθροιζόμενοι οι παραπάνω ρυθμοί μάς δίνουν συνολικά ρυθμό των 270 Mbps, όπως είδαμε και στην προηγούμενη ενότητα. Μετά τον κβαντισμό τα δείγματα φωτεινότητας και χρωμοδιαφορών πολυπλέκονται, όπως περιγράφονται στην επόμενη ενότητα.

2.4.3 Υποδειγματοληψία Χρώματος

Η εναλλαγή δειγμάτων φωτεινότητας και χρωμοδιαφορών στο σήμα βίντεο είναι ως εξής: Y, Cb, Y, Cr, Y, ... Η αλληλουχία αυτή ονομάζεται 4:2:2 και στην ουσία πρόκειται για μια τεχνική που παραπέμπει στην υποδειγματοληψία του χρώματος, η οποία εκμεταλλεύεται κάποια από τα χαρακτηριστικά του ανθρώπινου συστήματος όρασης. Συγκεκριμένα, λόγω της αυξημένης ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού στη φωτεινότητα, σε σχέση με την ευαισθησία του στα χρώματα και δεδομένης της ανάγκης για συμπίεση του σήματος (άρα και υποβιβασμού του απαραίτητου εύρους ζώνης για τη μετάδοσή του) μπορούμε να λαμβάνουμε λιγότερα δείγματα χρωματικής πληροφορίας σε σχέση με τα δείγματα τα οποία αφορούν τη φωτεινότητα.

Αυτό, ούτως ή άλλως, το είδαμε και στην προηγούμενη ενότητα όπου χρησιμοποιήσαμε διαφορετικούς ρυθμούς δειγματοληψίας για τη φωτεινότητα και τη χρωμικότητα. Αυτός ο μηχανισμός ονομάζεται *υποδειγματοληψία χρώματος*. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, κατά τη δημιουργία του σήματος έχουμε εναλλαγή δειγμάτων φωτεινότητας και χρωμοδιαφορών με βάση το πρότυπο που παρουσιάστηκε παραπάνω (δηλαδή Y, Cb, Y, Cr, Y, ...).

Ωστόσο, αυτή δεν είναι η μόνη περίπτωση όπου μπορούμε να έχουμε διαφοροποίηση στον ρυθμό λήψης δειγμάτων του σήματος φωτεινότητας και χρωμοδιαφορών. Είναι δυνατό να υπάρξουν πολλές περιπτώσεις και συνδυασμοί. Χρειάζεται για αυτόν τον λόγο ένας τρόπος περιγραφής αυτής της υποδειγματοληψίας.

Για την περιγραφή, αρκεί να δώσουμε (αναλογικά) τους ρυθμούς με τους οποίους πραγματοποιείται η δειγματοληψία της φωτεινότητας και του χρώματος. Συνήθως χρησιμοποιείται ο εξής συμβολισμός:

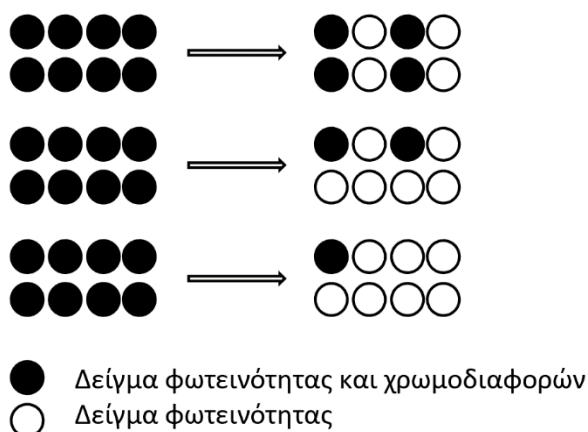
$$J:a:b$$

(19)

Η περιγραφή αυτή αποτελείται από τρεις ακεραίους, π.χ. 4:2:0, οι οποίοι ερμηνεύονται ως εξής: Ο πρώτος ακεραίος μας δίνει το πόσα δείγματα (φωτεινότητας) παίρνουμε οριζόντια σαν αναφορά, συνήθως 4. Ο δεύτερος ακεραίος a μας δείχνει πόσα δείγματα χρωμικότητας έχουμε στα πρώτα J (οριζόντια) δείγματα, ενώ ο τρίτος ακεραίος, b, μας δείχνει πόσα δείγματα χρωμικότητας έχουμε στα επόμενα J (οριζόντια, της

επόμενης γραμμής) δείγματα. Η υποδειγματοληψία χρώματος πραγματοποιείται ξεκινώντας από τη μορφή 4:4:4 (η οποία έχει ισόποσα δείγματα φωτεινότητας και κάθε συνιστώσας της χρωμικότητας).

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζονται τρία σενάρια υποδειγματοληψίας χρώματος, ξεκινώντας κάθε φορά από το πλήρες 4:4:4.



Εικόνα 2.9 Υποδειγματοληψία χρώματος από 4:4:4 σε 4:2:2, 4:2:0 και 4:1:0.

Όπως είναι ευνόητο η υποδειγματοληψία του χρώματος χαμηλώνει τις απαιτήσεις αναφορικά με τον ρυθμό μετάδοσης. Ας υπολογίσουμε ξανά τον ρυθμό θεωρώντας ότι έχουμε πραγματοποιήσει υποδειγματοληψία χρώματος της μορφής 4:2:0. Θεωρούμε ότι η κβάντιση γίνεται με χρήση 8 bits για τις τρεις συνιστώσες (φωτεινότητα και χρωμοδιαφορές).

$$\begin{aligned} Y: & 13,5 \text{ MHz} * 8 \text{ bits / sample} = 108 \text{ Mbps} \\ Cb: & (1/4) * 6,75 \text{ MHz} * 8 \text{ bits / sample} = 13,5 \text{ Mbps} \\ Cr: & (1/4) * 6,75 \text{ MHz} * 8 \text{ bits / sample} = 13,5 \text{ Mbps} \end{aligned}$$

(20)

Οι επιμέρους ροές αθροίζονται συνολικά στα 135 Mbps, οπότε και παρατηρούμε μείωση σε σχέση με τον αρχικό ρυθμό.

2.4.4 Δομή Βίντεο

Πλέον με την πρακτική κατάργηση (ή τον σημαντικό περιορισμό) της χρήσης συσκευών καθοδικού σωλήνα τόσο κατά τη δημιουργία του σήματος όσο και κατά την αναπαραγωγή του, η ύπαρξη των παλμών κατακόρυφης και οριζόντιας αμαύρωσης δεν είναι απαραίτητη από τις συσκευές που διαχειρίζονται το βίντεο. Επισημαίνεται, μάλιστα, ότι αυτό συνέβη πρώτα στην πλευρά του εικονολήπτη (όπου και ο εξοπλισμός είναι πιο εξελιγμένος) και στη συνέχεια στην πλευρά του δέκτη.

Στο ψηφιακό βίντεο, η έναρξη και το πέρας του ενεργού τμήματος σηματοδοτείται από ειδικές λέξεις που λειτουργούν ως σημεία έναρξης και ολοκλήρωσης του ενεργού βίντεο. Συγκεκριμένα, αυτές είναι οι Έναρξη του Ενεργού βίντεο και το Πέρας του Ενεργού Βίντεο (SAV και EAV, Start of Active Video και End of Active Video αντίστοιχα).

Παρ' όλα αυτά το σχετικό χρονικό διάστημα *οριζόντιου παλμού αμαύρωσης* εξακολουθεί να υπάρχει και συγκεκριμένα βρίσκεται μεταξύ των σημείων έναρξης και λήξης (EAV και του SAV). Στο τμήμα αυτό δεν περιέχεται πληροφορία η οποία να είναι χρήσιμη για το βίντεο, δεν περιέχεται δηλαδή ο παλμός συγχρονισμού. Δυστυχώς για την εκμετάλλευση του σχετικού εύρους ζώνης, είναι δυνατή η αξιοποίηση αυτών των χρονικών διαστημάτων, π.χ., αποστολή του σήματος του ήχου. Αυτό όμως στην περίπτωση της ψηφιακής τηλεόρασης δεν γίνεται, αφού όπως θα συζητήσουμε στη συνέχεια, ο ήχος μεταδίδεται με ξεχωριστές ροές.

Τα σημεία SAV και EAV αντιστοιχούν σε συνδυασμό τεσσάρων λέξεων των 8 ή 10 bits, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Η πρώτη λέξη αποτελείται μόνο από ένα (1), οι δύο επόμενες έχουν μόνο

μηδενικά, η τέταρτη λέξη είναι που περιέχει τις πληροφορίες για το σχετικό πεδίο ή το διάστημα κατακόρυφης αμαύρωσης. Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό του σημείου έναρξης ενός πλαισίου, πεδίου ή περιοχής εικόνας στην κατακόρυφη κατεύθυνση.

- Το πρώτο bit είναι πάντα 1.
- Το δεύτερο bit δίνει πληροφορίες για το πεδίο (εάν είναι 0, τότε αφορά γραμμή του πρώτου πεδίου, σε σχέση με τη διαπλεγμένη σάρωση, ενώ εάν είναι 1 τότε είναι γραμμή του δεύτερου πεδίου).
- Το επόμενο bit δείχνει το ενεργό βίντεο στην κατακόρυφη κατεύθυνση (εάν είναι 0, τότε η περιοχή ανήκει στην ενεργό περιοχή, εάν είναι 1 τότε η περιοχή ανήκει στον κατακόρυφο παλμό αμαύρωσης).
- Το τέταρτο bit σε περίπτωση κβαντισμού με 8 bits (ή το έκτο εάν στον κβαντισμό χρησιμοποιούνται 10 bits) δίνει την κωδικοποίηση για τον διαχωρισμό των SAV και EAV. Στην περίπτωση του 0, έχουμε SAV, ενώ στην περίπτωση του 1 έχουμε EAV.
- Υπάρχουν επίσης bits τα οποία χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο σφαλμάτων.

Σημειώνεται ότι ούτε το σήμα της φωτεινότητας ούτε αυτό των χρωμοδιαφορών εκμεταλλεύεται το πλήρες σύνολο των επιπέδων κβαντισμού. Χρησιμοποιείται μόνο ένα υποσύνολο από 220 επίπεδα με τη στάθμη του μαύρου να αντιστοιχεί στο 16 και του λευκού στη στάθμη 235 (οι τιμές για κβαντισμό 10 bits είναι από το 64 έως και το 940). Αντίστοιχα το σήμα χρωμοδιαφορών έχει εύρος τιμών από το 16 έως το 240 (για κβαντισμό 8 bits) και από την τιμή 64 έως την 960 (για κβαντισμό 10 bits). Οι υπόλοιπες τιμές αξιοποιούνται για θέματα συγχρονισμού.

Τα χαρακτηριστικά του σήματος συνοψίζονται στον επόμενο πίνακα (και για τις δύο περιπτώσεις θεωρούμε ότι για τα δείγματα των χρωμοδιαφορών έχουμε το πρότυπο 4:2:2).

Παράμετρος	Σύστημα 625 γραμμών 25 πλαίσια / δευτερόλεπτο (50 πεδία / δευτερόλεπτο)	Σύστημα 525 γραμμών 30 πλαίσια / δευτερόλεπτο (60 πεδία / δευτερόλεπτο)
Δείγματα φωτεινότητας ανά γραμμή	864	858
Δείγματα χρωμοδιαφορών ανά γραμμή	432	429
Δομή	Ορθογωνική δομή γραμμής, πεδίου και πλαισίου. Τα δείγματα των χρωμοδιαφορών παρατίθενται μαζί με τα δείγματα φωτεινότητας περιττού αριθμού (1ο, 3ο κ.λπ.).	
Ρυθμός δειγματοληψίας φωτεινότητας	13,5 MHz	
Ρυθμός δειγματοληψίας χρωμοδιαφορών	6,75 MHz	
Κωδικοποίηση	Ομοιόμορφη κωδικοποίηση τύπου PCM με χρήση 8 ή 10 bits (με προτιμητέα την τιμή των 10 bits) για το σήμα της φωτεινότητας και των χρωμοδιαφορών.	
Πλήθος δειγμάτων φωτεινότητας ανά ενεργή ψηφιακή γραμμή	720	
Πλήθος δειγμάτων χρωμοδιαφορών ανά ενεργή ψηφιακή γραμμή	360	
Αντιστοίχιση επιπέδου τιμών σήματος φωτεινότητας και επιπέδων κβαντισμού	220 επίπεδα κβαντισμού, με εκκίνηση το 16 και το λευκό να αντιστοιχεί στο 235.	
Αντιστοίχιση επιπέδου τιμών σημάτων χρωμοδιαφορών και επιπέδων κβαντισμού	225 επίπεδα κβαντισμού, περί την κεντρική τιμή, με το μηδενικό σήμα να αντιστοιχεί στην τιμή 128.	

Πίνακας 2.3 Χαρακτηριστικά δειγματοληψίας και κβαντισμού τηλεοπτικού σήματος κατά το πρότυπο ITU-BT R.601 .

Το σήμα που προκύπτει με αυτήν τη διαδικασία αποτελεί και το σήμα εισόδου για τις βαθμίδες συμπίεσης που ακολουθούν.

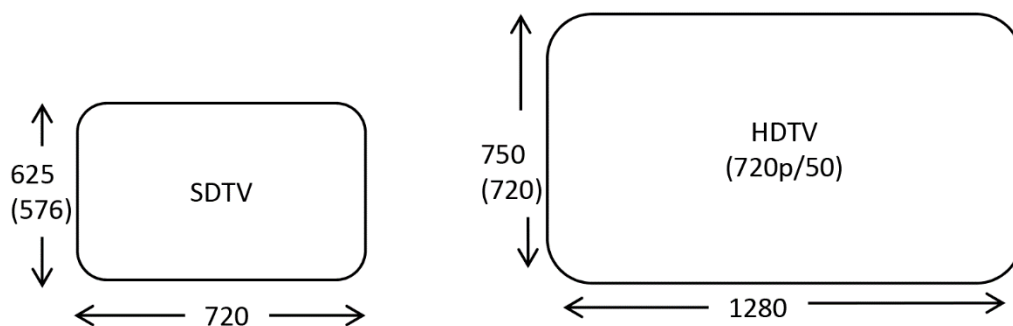
2.5 Σήμα Υψηλής Ευκρίνειας

Το τηλεοπτικό σήμα τυπικής ευκρίνειας (Standard Definition Television, SDTV) εξακολουθεί να χρησιμοποιείται από τη συντριπτική πλειονότητα των σταθμών μετάδοσης σε διάφορες χώρες, παρά το

γεγονός ότι δημιουργήθηκε στη δεκαετία του 1950. Όπως συζητήσαμε και παραπάνω, τα βασικά συστήματα χρησιμοποιούν 625 και 525 γραμμές με σάρωση στα 25 και τα 50 Hz αντίστοιχα και αναλογίες 4:3.

Από την άλλη, οι σύγχρονοι εικονολήπτες αλλά και οι τηλεοπτικοί δέκτες είναι σε θέση να δημιουργήσουν και να αναπαραγάγουν σήμα πολύ μεγαλύτερης ευκρίνειας. Επιπλέον, είναι σε θέση να χρησιμοποιήσουν την αναλογία 16:9 η οποία χρησιμοποιείται επιπλέον και στα σύγχρονα συστήματα κανονικής ευκρίνειας.

Οι πρώτες σκέψεις για την τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας ήταν ο διπλασιασμός των γραμμών αλλά και των εικονοστοιχείων (pixel) ανά γραμμή. Κάτι τέτοιο θα οδηγούσε στην αύξηση του μεγέθους του σήματος, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 2.10 Σύγκριση διαστάσεων βίντεο τυπικής και υψηλής ευκρίνειας.

Η τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας προϋποθέτει εξελιγμένους αλγόριθμους συμπίεσης (όπως το MPEG-4 Part 10, H.264), το οποίο είναι 2 με 3 φορές πιο αποδοτικό από το αντίστοιχο πρότυπο συμπίεσης του MPEG-2 το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά κόρον στην ψηφιακή τηλεόραση τυπικής ευκρίνειας.

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε κάποια χαρακτηριστικά της διαδικασίας δημιουργίας σήματος υψηλής ευκρίνειας, σύμφωνα με το αντίστοιχο πρότυπο και συγκεκριμένα το ITU-R BT.709 και το ITU-R BT.1120. Το πρότυπο αυτό καταπιάνεται με θέματα τηλεοπτικού σήματος υπερυψηλής ευκρίνειας και συγκεκριμένα με την ανάλυση της οθόνης, τον ρυθμό των πλαισίων, την υποδειγματοληψία του χρώματος, τα επίπεδα κβαντισμού και την αναπαράσταση των χρωμάτων. Η ITU αναφέρει 1.125 γραμμές με συχνότητες 50 Hz και 60 Hz εκ των οποίων οι 1.080 είναι ενεργές γραμμές και κάθε γραμμή έχει 1.920 pixels και στα δύο συστήματα (16) και (17).

Το πρότυπο EBU – TECH 3299: High Definition (HD), Image Formats for Television Production, (18) αναφέρεται σε 4 συστήματα στην Ευρώπη:

- Σύστημα 1, 1.125 γραμμές, 1.280 οριζόντια δείγματα και 720 ενεργές γραμμές με προοδευτική σάρωση στα 50 Hz, και αναλογίες 16:9. Συντομογραφία 720p/50.
- Σύστημα 2, 1.250 γραμμές, 1.920 δείγματα και 1.080 ενεργές γραμμές με διαπλεγμένη σάρωση και ρυθμό πλαισίων 25 Hz, και αναλογίες 16:9. Συντομογραφία 1080i/25.
- Σύστημα 3, 1.250 γραμμές, 1.920 δείγματα οριζοντίως και 1.080 ενεργές γραμμές με προοδευτική σάρωση με ρυθμό 25 Hz και αναλογίες 16:9. Συντομογραφία 1080p/25.
- Σύστημα 4, 1.250 γραμμές, 1.920 οριζόντια δείγματα και 1.080 ενεργές γραμμές με προοδευτική σάρωση, ρυθμό πλαισίων στα 50 Hz και αναλογία 16:9. Συντομογραφία 1080p/50.

Μπορούμε να υπολογίσουμε τιμές για τους βασικούς συνδυασμούς χρωμάτων, όπως φαίνεται στον επόμενο πίνακα:

Συστήματα	Συντόμευση	Δείγματα φωτεινότητας ανά ενεργή γραμμή	Σύνολο γραμμών ανά πλαίσιο	Πλήθος ενεργών γραμμών	Συχνότητα πλαισίων
Σύστημα 1	720p/50	1.280	750	720	50
Σύστημα 2	1.080i/25	1.920	1.125	1.080	25 (50 για τα πεδία)
Σύστημα 3	1.080p/25	1.920	1.125	1.080	25
Σύστημα 4	1.080p/50	1.920	1.125	1.080	50

Πίνακας 2.4 Χαρακτηριστικά προτεινόμενων συστημάτων για το βίντεο υψηλής ευκρίνειας.

Αναφορικά με τους ρυθμούς δειγματοληψίας, για το σήμα φωτεινότητας η συχνότητα δειγματοληψίας έχει την τιμή των 74,25 MHz. Η δειγματοληψία του χρώματος γίνεται στο μισό της συχνότητας δειγματοληψίας, συγκεκριμένα στα $0,5 * 74,25 \text{ MHz} = 37,125 \text{ MHz}$. Το πρότυπο ITU-R BT.709 δίνει ρυθμό δειγματοληψίας 72 MHz για τη φωτεινότητα και 36 MHz για το σήμα των χρωμάτων. Για τον σχηματισμό του σήματος Y:Cb:Cr ο μηχανισμός ο οποίος χρησιμοποιείται εξακολουθεί να είναι ο 4:2:2. Για την αποφυγή του φαινομένου της αναδίπλωσης, το εύρος ζώνης του σήματος φωτεινότητας περιορίζεται στα 30 MHz και αυτό των σημάτων χρωμοδιαφορών στα 15 MHz μέσω φίλτρων χαμηλών συχνοτήτων.

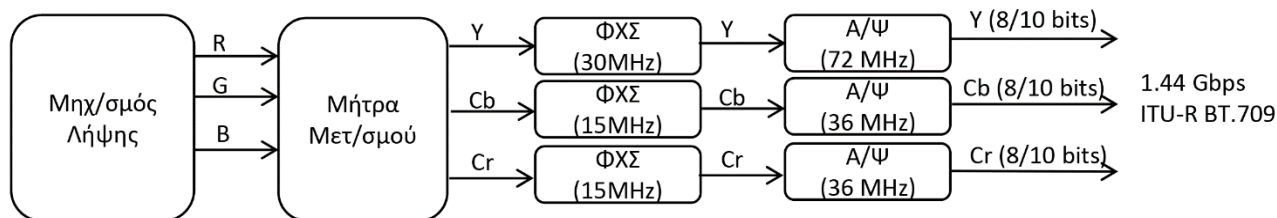
Σε ένα σύστημα με 1125/60 με χρήση 10 bit για τον κβαντισμό ο προκύπτων ρυθμός είναι:

$$\begin{aligned}
 Y: & 74,25 * 10 \text{ Mbit/s} = 742,5 \text{ Mbit/s} \\
 Cb: & 0,5 * 74,25 * 10 \text{ Mbit/s} = 371,25 \text{ Mbit/s} \\
 Cr: & 0,5 * 74,25 * 10 \text{ Mbit/s} = 371,25 \text{ Mbit/s}
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

Αθροιζόμενοι οι επιμέρους ρυθμοί δίνουν 1.485 Gbit/s. Στην περίπτωση του συστήματος 1250/50 ο αντίστοιχος ρυθμός με κβαντισμό 10 bit είναι:

$$\begin{aligned}
 Y: & 72 * 10 \text{ Mbit/s} = 720 \text{ Mbit/s} \\
 Cb: & 0,5 * 72 * 10 \text{ Mbit/s} = 360 \text{ Mbit/s} \\
 Cr: & 0,5 * 72 * 10 \text{ Mbit/s} = 360 \text{ Mbit/s}
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

Αθροιζόμενοι οι επιμέρους ρυθμοί δίνουν 1,44 Gbit/s. Οι παράμετροι που προαναφέρθηκαν παρουσιάζονται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 2.11 Δημιουργία σήματος υψηλής ευκρίνειας.

Στην περίπτωση της δημιουργίας σήματος υψηλής ευκρίνειας υποστηρίζεται τόσο το μοντέλο της διαπλεγμένης σάρωσης (interlaced scanning) όσο και της προοδευτικής (progressive). Οι τηλεοράσεις τύπου LCD (Liquid Crystal Display) χρησιμοποιούν με μεγαλύτερη ευκολία την προοδευτική σάρωση (σε σχέση με τη διαπλεγμένη) και σε κάποιες περιπτώσεις η διαπλεγμένη σάρωση μπορεί να έχει δυσμενή αποτελέσματα στην εμφάνιση του περιεχομένου (οπότε χρειάζεται μετατροπή από την μία μορφή στην άλλη).

Με την προοδευτική σάρωση των 50 ή 60 Hz οι ρυθμοί δειγματοληψίας διπλασιάζονται στα 148,5 MHz και τα 144 MHz αντίστοιχα για τα σήματα φωτεινότητας και χρωμοδιαφορών. Ο ρυθμός δεδομένων τότε λαμβάνει την τιμή 2,97 Gbps και 2,88 Gbps, αντίστοιχα.

Η δομή του μη συμπίεσμένου βίντεο υψηλής ευκρίνειας είναι παρόμοια με αυτή που προβλέπει το πρότυπο ITU-R BT.601. Τα βασικά χαρακτηριστικά του σήματος υψηλής ευκρίνειας περιλαμβάνουν τα επόμενα:

- κατ' ελάχιστον υποστήριξη 720 γραμμών
- αναλογία 16:9
- ανάλυση 1.280 x 720 στα 50 Hz και τα 60 Hz με προοδευτική σάρωση 720p
- ανάλυση 1.980 x 1080 στα 50 Hz και τα 60 Hz για διαπλεγμένη σάρωση 1080i
- υποστήριξη ψηφιακών διεπαφών DVI (DigitalVisualInterface) και HDMI
- κρυπτογράφηση τύπου HDCP στις ψηφιακές διεπαφές

Η μετάδοση του σήματος υψηλής ευκρίνειας γίνεται με χρήση του πρωτοκόλλου HD-SDI (High Definition Serial Digital Interface) [19, 20]. Η διεπαφή DVI (Digital Visual Interface) χρησιμοποιείται για τις διασυνδέσεις των υπολογιστών (τείνει να αντικαταστήσει τη γνωστή διεπαφή VGA). Υποστηρίζει ρυθμούς μέχρι και 1.65 Gbps. Το HDMI (High Definition Multimedia Interface) υποστηρίζει ρυθμούς μέχρι και 5 Gbps και μεταφέρει τόσο εικόνα όσο και ήχο. Το πρότυπο HDCP (High Bandwidth Digital Content Protection) προστατεύει το ψηφιακό υλικό που μεταφέρεται από τις διεπαφές DVI και HDMI από μη επιτρεπόμενη εγγραφή.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

10. M. R. Pointer. *The Gamut of Real Surface Colours*. John Wiley & Sons, Inc. Color Research and Application, 5 (3): 145–155, 1980.
11. E. Chino¹, K. Tajiri, H. Kawakami, H. Ohira, K. Kamijo, H. Kaneko, S. Kato, Y. Ozawa, T. Kurumisawa, K. Inoue, K. Endo, H. Moriya, T. Aragaki and K. Murai. *Invited Paper: Development of wide-Color-Gamut Mobile Displays with Four-primary-color LCDs*. SID 06 Digest, pp.1221-1224, 2006.
12. Society of Motion Picture and Television Engineers. *Recommended Practice RP 145-2004*. Color Monitor Colorimetry. Society of Motion Picture and Television Engineers, 1987–2004.
13. Society of Motion Picture and Television Engineers. *Engineering Guideline EG 27-2004. Supplemental Information for SMPTE 170M and Background on the Development of NTSC Color Standards*. Society of Motion Picture and Television Engineers 1994- 2004.
14. International Telecommunication Union – Radiocommunication sector, Recommendation BT.601. *Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide-screen 16:9 aspect ratios*. International Telecommunication Union, 1985
15. International Telecommunication Union – Radiocommunication sector, Recommendation BT.656. *Interfaces for digital component video signals in 525-line and 625-line television systems operating at the 4:2:2 level of Recommendation ITU-R BT.601*. International Telecommunication Union, 1994
16. International Telecommunication Union – Radiocommunication sector, Recommendation BT.709, *Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange*. International Telecommunication Union, 2015.
17. International Telecommunication Union – Radiocommunication sector, Recommendation BT.1120. *Digital interfaces for HDTV studio signals*. International Telecommunication Union, 2012.
18. EBU – TECH 3299: High Definition (HD), Image Formats for Television Production. EBU, 2010.
19. Society of Motion Pictures and Television Engineers. *SMPTE 259M, Σειριακές Διεπαφές Βίντεο (SDI, Serial Digital Interface)*. Society of Motion Pictures and Television Engineers, 1989.
20. Society of Motion Pictures and Television Engineers. *SMPTE 292M, Σειριακές Διεπαφές Βίντεο (SDI, Serial Digital Interface) για υψηλή ευκρίνεια*. Society of Motion Pictures and Television Engineers, 1998.

Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1

Υπολογίστε τον προκύπτοντα ρυθμό μετάδοσης για δειγματοληψία με ρυθμούς 13,5 MHz και 6,75 MHz αντίστοιχα και κβάντιση (α) με χρήση 8 bits και για τις τρεις προκύπτουσες συνιστώσες και (β) 10 bits για τις τρεις συνιστώσες

Απάντηση/Λύση

α) Κβαντισμός με χρήση 8 bits

$$\begin{aligned} Y: 13,5 \text{ MHz} * 8 \text{ bits / sample} &= 108 \text{ Mbps} \\ Cb: 6,75 \text{ MHz} * 8 \text{ bits/sample} &= 54 \text{ Mbps} \\ Cr: 6,75 \text{ MHz} * 8 \text{ bits/sample} &= 54 \text{ Mbps} \end{aligned}$$

(23)

Συνολικά: 216 Mbps

(β) Κβαντισμός με χρήση 10 bits

$$\begin{aligned} Y: 13,5 \text{ MHz} * 10 \text{ bits / sample} &= 135 \text{ Mbps} \\ Cb: 6,75 \text{ MHz} * 10 \text{ bits/sample} &= 67,5 \text{ Mbps} \\ Cr: 6,75 \text{ MHz} * 10 \text{ bits/sample} &= 67,5 \text{ Mbps} \end{aligned}$$

(24)

Συνολικά: 270 Mbps

Κριτήριο αξιολόγησης 2

Θα εξετάσουμε τη διαχείριση αρχείων βίντεο στα οποία γίνεται χρήση της υποδειγματοληψίας του χρώματος. Ο τρόπος αποθήκευσης της πληροφορίας παρουσιάζεται στην επόμενη άσκηση. Θεωρούμε ότι διαθέτουμε ένα YUV, 4:2:0 βίντεο, το οποίο δεν έχει υποστεί κάποια μορφή συμπίεσης (πέρα από τη δειγματοληψία χρώματος). Για το βίντεο γνωρίζουμε την ανάλυσή του και ότι για κάθε πλαίσιο αποθηκεύεται αρχικά η πληροφορία που αφορά τη φωτεινότητα και κατόπιν η πληροφορία που αφορά τις χρωμοδιαφορές (με τις αναλογίες που προκύπτουν από τον τρόπο της υποδειγματοληψίας του χρώματος). Το αρχείο στο οποίο έχει αποθηκευτεί το βίντεο είναι προσβάσιμο στο σύστημα αρχείων του λειτουργικού συστήματος.

Θα υλοποιήσουμε πρόγραμμα το οποίο:

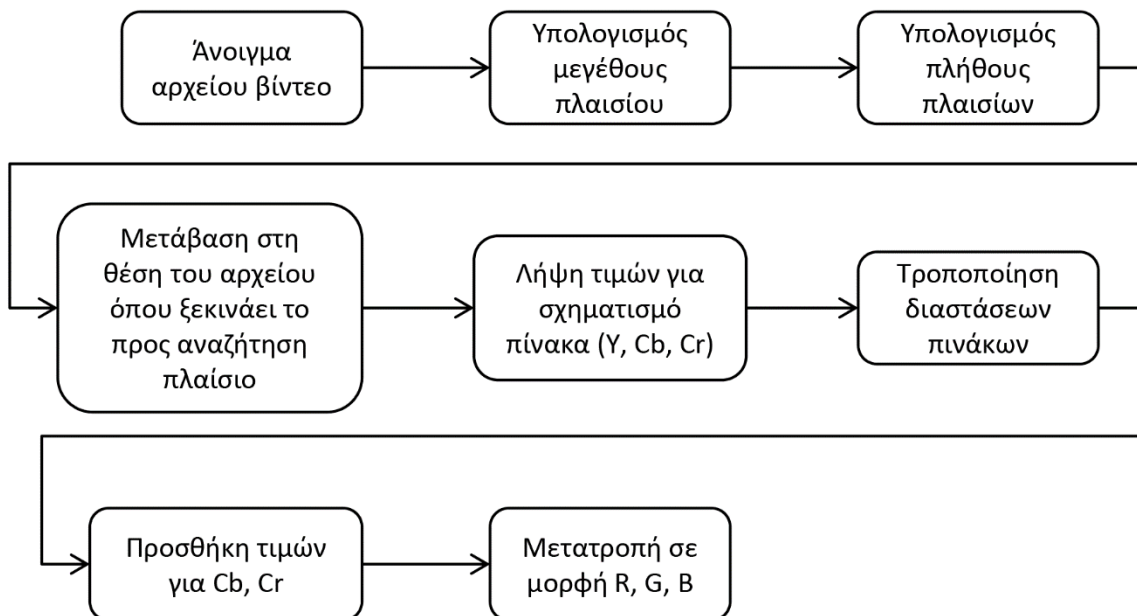
- Υπολογίζει το μέγεθος και το πλήθος των πλαισίων.
- Εντοπίζει την πληροφορία που αφορά συγκεκριμένο πλαίσιο.
- Εξάγει το συγκεκριμένο πλαίσιο, δημιουργεί πίνακα τριών διαστάσεων όπου αποθηκεύονται οι τιμές YUV.
- Τροποποιεί κατάλληλα τις τιμές και αποθηκεύει τον εν λόγω πίνακα ώστε να δημιουργηθεί μια εικόνα RGB.

- Επεκτείνετε τη λειτουργία του προγράμματος το οποίο δημιουργήσατε ώστε να αναλύει ένα τέτοιο βίντεο στα πλαίσια / εικόνες από τα οποία αποτελείται.

Απάντηση/Λύση

Το αρχείο το οποίο θα επεξεργαστούμε έχει όνομα «suzie_qcif.yuv» και είναι ένα yuv video τύπου 4:2:0. Αυτό σημαίνει ότι στην 1η τετράδα τιμών φωτεινότητας αντιστοιχούν δύο τιμές χρώματος, ενώ στη δεύτερη τετράδα τιμών φωτεινότητας δεν αντιστοιχεί καμία τιμή χρώματος. Θεωρούμε ότι για κάθε πλαίσιο γράφεται πρώτα η πληροφορία φωτεινότητας Y και μετά η πληροφορία των χρωμάτων U, V.

Τα βήματα τα οποία θα ακολουθήσουμε απεικονίζονται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 2.12 Ροή ανάλυσης βίντεο.

Ο κώδικας είναι διαθέσιμος στον επόμενο πίνακα.

```

width=176;
height=144;
fileName='suzie_qcif.yuv'; % έγχρωμοβίντεο 4:2:0
idxFrame=15;
fileId = fopen(fileName, 'r');
[A, Count]=fread(fileId, inf, 'uint8=> uint8');
numOfFrames = Count/(1.5 * width * height); % εξηγήστε γιατί επί 1,5;

sizeFrame = 1.5 * width * height;
fseek(fileId, (idxFrame - 1) * sizeFrame, 'bof'); % bof: beginning of file

buf1 = fread(fileId, width * height, 'uint8'); % τι πληροφορία περιλαμβάνει η μεταβλητή
buf2 = fread(fileId, width / 2 * height / 2, 'uint8');
buf3 = fread(fileId, width / 2 * height / 2, 'uint8');
fclose(fileId);

subSampleMat = [1, 1; 1, 1];

imgYuv(:, :, 1) = reshape(buf1, width, height); % reshape
imgYuv(:, :, 2) = kron(reshape(buf2, width / 2, height / 2), subSampleMat);
imgYuv(:, :, 3) = kron(reshape(buf3, width / 2, height / 2), subSampleMat);
  
```

```
imgYuv = imgYuv / 255;  
imgRgb = ycbcr2rgb(imgYuv);  
imshow(imgRgb)
```

Πίνακας 2.5 Χαρακτηριστικά δειγματοληψίας και κβαντισμού ψηφιακού σήματος.



[Παρατίθεται ένα επεξηγηματικό βίντεο αναφορικά με τον κώδικα και την εκτέλεση της προηγούμενης άσκησης.](#)

Κεφάλαιο 3 – Συμπίεση Βίντεο

Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζουμε τους βασικούς τρόπους με τους οποίους το πρότυπο MPEG (και συγκεκριμένα το MPEG-2) προβλέπει τη συμπίεση του σήματος βίντεο. Η ανάγκη για συμπίεση προκύπτει λόγω του υψηλού ρυθμού του σήματος το οποίο προκύπτει από το στούντιο (στην περίπτωση της τυπικής ευκρίνειας ο ρυθμός ανέρχεται στα 270 Mbps). Ένας τέτοιος ρυθμός δεν είναι δυνατόν να υποστηριχθεί από τις τρέχουσες τεχνολογίες μετάδοσης.

Εν γένει η συμπίεση είναι δυνατόν να είναι απωλεστική ή μη απωλεστική. Στην πρώτη περίπτωση αγνοείται κάποια πληροφορία κατά τη συμπίεση (την οποία ο δέκτης δεν μπορεί να επαναφέρει) με πρόνοια η πληροφορία αυτή να είναι όσο το δυνατόν πιο περιορισμένης σημασίας για την ποιότητα του περιεχομένου (ή, αλλιώς, η απώλεια αυτής της πληροφορίας να γίνεται κατά το δυνατόν λιγότερο αντιληπτή από τον θεατή).

Στη δεύτερη περίπτωση εκμεταλλευόμαστε κάποιον πλεονασμό της πληροφορίας. Στο βίντεο υπάρχουν τα εξής τέσσερα είδη πλεονασμού: (α) χωρικός πλεονασμός, ο οποίος οφείλεται στις ομοιότητες μεταξύ των εικονοστοιχείων που δομούν ένα πλαίσιο, (β) χρονικός πλεονασμός, ο οποίος οφείλεται στις ομοιότητες μεταξύ διαδοχικών εικόνων ενός βίντεο, (γ) στατιστικός πλεονασμός, ο οποίος οφείλεται στις στατιστικές ιδιότητες της εμφάνισης των διάφορων συμβόλων προς κωδικοποίηση και (δ) ψυχο-οπτικός πλεονασμός, ο οποίος οφείλεται στις ιδιότητες του ανθρώπινου συστήματος όρασης και στα χαρακτηριστικά της απόκρισης του συστήματος αυτού στα διάφορα ερεθίσματα.

Στο κεφάλαιο αυτό έχουμε ως στόχο τη συμπίεση του βίντεο και παρουσιάζουμε τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η αφαίρεση της «πλεονάζουσας» πληροφορίας (όπως, για παράδειγμα, της πληροφορίας που βρίσκεται στο χρονικό διάστημα που αντιστοιχούν στους παλμούς αμαύρωσης και εκ των πραγμάτων δεν προβάλλεται) αλλά και εκμετάλλευσης των παραπάνω ειδών πλεονασμού.

Οι μηχανισμοί που θα εξετάσουμε ανήκουν στο πρότυπο MPEG2. Πιο σύνθετοι μηχανισμοί οι οποίοι έχουν προτυποποιηθεί σε μεταγενέστερα πρότυπα (όπως το AVC/H.264 του MPEG4 θα αναφερθούν συνοπτικά σε επόμενο κεφάλαιο).

Προαπαιτούμενη γνώση

Το κεφάλαιο αυτό επεξηγεί τους βασικούς μηχανισμούς για τη συμπίεση του βίντεο. Συνδέεται με τον μηχανισμό δημιουργίας του βίντεο καθώς και με τους μηχανισμούς εισαγωγής της πληροφορίας στον συρμό μεταφοράς. Υπό αυτήν την έννοια, ενδείκνυται γνώση της γενικής εικόνας του συστήματος και των επιμέρους βαθμίδων που το αποτελούν τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη, ώστε να γίνει αντιληπτή η σημασία της λειτουργικότητας που περιγράφουμε σε αυτό το κεφάλαιο.

3.1 Εισαγωγή

Αφού πραγματοποιηθεί η λήψη του περιεχομένου, όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο ρυθμός που απαιτεί το βίντεο είναι πολύ υψηλός για να υποστηριχθεί από τις τρέχουσες τεχνολογίες μετάδοσης στον τελικό χρήστη. Στην περίπτωση της τυπικής ευκρίνειας (Standard Definition, SD) ο ρυθμός αντιστοιχεί στα 270 Mbps, στη δε περίπτωση της υψηλής ευκρίνειας ο ρυθμός αντιστοιχεί σε άνω του 1 Gbps ανά περίπτωση. Και στις δύο περιπτώσεις, οι τιμές είναι πολύ υψηλές για μετάδοση και πρέπει να υποβιβαστούν στην τάξη των 2-7 Mbps λαμβάνοντας υπόψη τις τρέχουσες τεχνολογίες μετάδοσης. Απαιτείται, δηλαδή, ένα σημαντικό ποσοστό συμπίεσης από 38:1 στην απλούστερη περίπτωση, έως και 137:1 στην πιο σύνθετη. Στην περίπτωση της μετάδοσης σήματος υψηλής ευκρίνειας το συμπιεσμένο σήμα είναι της τάξης των 15 με 20 Mbps. Στο παρόν κεφάλαιο θα εξετάσουμε την περίπτωση του βίντεο τυπικής ευκρίνειας.

Η συμπίεση του βίντεο διακρίνεται σε μη απωλεστική και απωλεστική. Στην πρώτη περίπτωση δεν έχουμε απώλεια πληροφορίας παρά μόνο απομάκρυνση πλεονάζουσας, ενώ στη δεύτερη υπάρχει απώλεια πληροφορίας. Πλεονάζουσα πληροφορία είναι αυτή η οποία ενδέχεται να:

- Εμφανίζεται πολλές φορές στη ροή, οπότε είναι δυνατή η απομάκρυνσή της σε κάποιες από αυτές τις εμφανίσεις.
- Αφορά δεδομένα τα οποία δεν περιέχουν χρήσιμη πληροφορία (όπως, π.χ., δεδομένα που χρησιμοποιούνται για να γεμίσουν κενές θέσεις στη ροή και να αποκτήσει αυτή συγκεκριμένη μορφή).
- Δεδομένα τα οποία μπορούν να ανασκευαστούν στον δέκτη με τη βοήθεια μαθηματικών υπολογισμών.

Όπως θα εξετάσουμε και παρακάτω, πολλές από τις τεχνικές περιορισμού της πλεονάζουσας πληροφορίας χρησιμοποιούνται και στις καθημερινές μας λειτουργίες, όπως, για παράδειγμα, είναι οι έξυπνοι τρόποι περιγραφής μιας σειράς από ίδια δεδομένα (π.χ., αντί να γράψουμε σειριακά το σύμβολο A 10 φορές δηλαδή «A, A, ..., A» μπορούμε να πούμε 10 φορές το σύμβολο «A»). Παράλληλα παρατηρούμε ότι οι πλέον συχνά χρησιμοποιούμενες λέξεις έχουν περιορισμένο μήκος (π.χ., τα άρθρα), σε αντιδιαστολή με τις λιγότερο συχνά χρησιμοποιούμενες λέξεις οι οποίες έχουν τυπικά μεγαλύτερο μήκος.

Από την άλλη, δεν είναι πάντα εφικτό να πετυχαίνουμε την επιθυμητή συμπίεση, μόνο με μη απωλεστικό τρόπο. Στις περιπτώσεις αυτές, οι οποίες είναι και οι περισσότερες, απαιτούνται και απωλεστικοί μηχανισμοί συμπίεσης. Βέβαια, τότε ο στόχος είναι η πληροφορία που θα χαθεί (και δεν θα είναι, δηλαδή, δυνατό να αναπαραχθεί στον δέκτη) να έχει μικρή επίπτωση στην ποιότητα του περιεχομένου και στη γενικότερη αντίληψη του χρήστη. Υπάρχει όμως τέτοιου είδους πληροφορία; Η απάντηση είναι ότι υπάρχει, σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό (όπως, π.χ., υψηλές συχνότητες στην οπτική πληροφορία χρωμάτων που αντιστοιχούν στις συνεχόμενες αλλαγές στις τιμές των χρωμάτων μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων).

Επιπλέον, σε αρκετές περιπτώσεις είμαστε σε θέση, βασισμένοι στη γνώση της φυσιολογίας της όρασης (και ακοής, όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο), να δώσουμε την κατάλληλη προτεραιότητα στα διάφορα είδη πληροφορίας. Για παράδειγμα, ήδη έχουμε συζητήσει ότι ο ανθρώπινος οφθαλμός είναι πολύ πιο ευαίσθητος στις αλλαγές στις τιμές της φωτεινότητας σε σχέση με τις αλλαγές στις τιμές των χρωμάτων. Αυτό λόγω των εγγενών χαρακτηριστικών του ανθρώπινου οφθαλμού.



[Παρατίθεται ένα εισαγωγικό βίντεο για τους αλγόριθμους συμπίεσης πολυμεσικού υλικού.](#)

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε τους μηχανισμούς συμπίεσης που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις δύο παραπάνω περιπτώσεις συμπίεσης (απωλεστικής και μη) και θα εξετάσουμε τη ροή λειτουργίας αυτών των μηχανισμών.

3.2 Μηχανισμοί Συμπίεσης

Η πλειονότητα των προτύπων κωδικοποίησης και συμπίεσης ψηφιακού βίντεο στηρίζονται στην αξιοποίηση διαφόρων ειδών πλεονασμού στοχεύοντας στη μείωσή του, άρα και στη μείωση του όγκου των δεδομένων. Τα είδη πλεονασμού είναι τα επόμενα:

- Χωρικός πλεονασμός, ο οποίος οφείλεται στις ομοιότητες μεταξύ των εικονοστοιχείων που δομούν ένα πλαίσιο.
- Χρονικός πλεονασμός, ο οποίος οφείλεται στις ομοιότητες μεταξύ διαδοχικών εικόνων ενός βίντεο.
- Στατιστικός πλεονασμός, ο οποίος οφείλεται στις στατιστικές ιδιότητες της εμφάνισης των διαφόρων συμβόλων προς κωδικοποίηση.
- Ψυχοοπτικός πλεονασμός, ο οποίος οφείλεται στις ιδιότητες του ανθρώπινου συστήματος όρασης και στα χαρακτηριστικά της απόκρισης του συστήματος όρασης στα διάφορα ερεθίσματα.

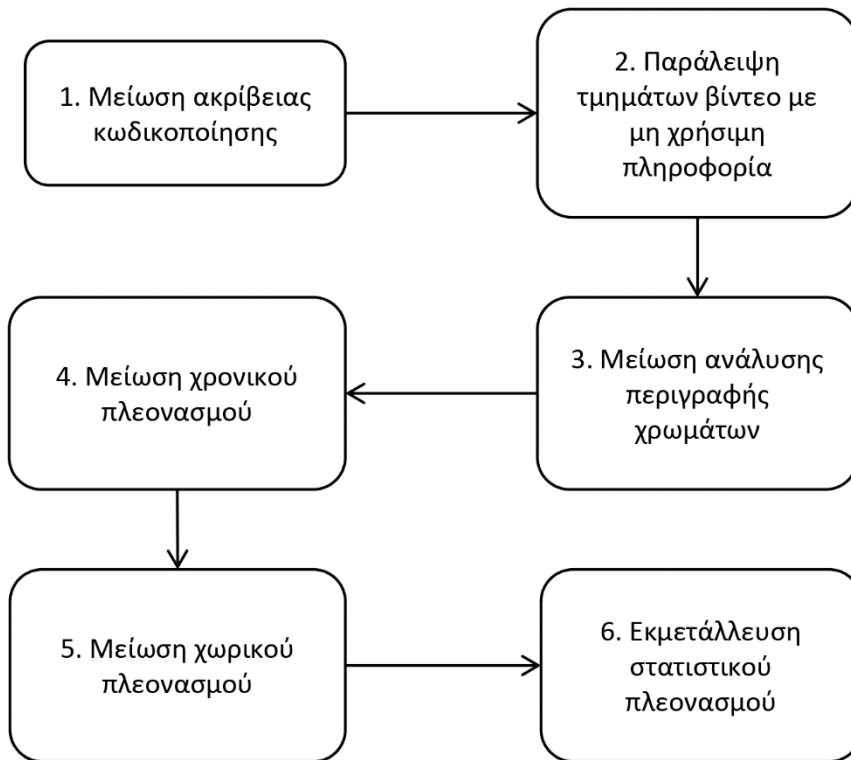
Στην περίπτωση της ψηφιακής τηλεόρασης το προς συμπίεση σήμα είναι αυτό που παράγεται από τον εικονολήπτη (κάμερα). Υπενθυμίζεται ότι οι συνιστώσες των βασικών χρωμάτων, τα οποία είναι το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε (R, G, B) συνδυάζονται ώστε να δώσουν το σήμα της φωτεινότητας Y και των χρωμοδιαφορών μπλε και κόκκινου (Cb και Cr). Η ανάλυση του χρώματος είναι μισή σε σχέση με την ανάλυση της φωτεινότητας, στην περίπτωση σήματος 4:2:2. Στην περίπτωση που έχουμε κβαντισμό 10 bits, ο ρυθμός μπορεί να φτάνει και τα 270 Mbps σύμφωνα και με το πρότυπο του ITU-BT.R601 (21).

Ο μηχανισμός συμπίεσης των εικόνων βασίζεται στο πρότυπο του JPEG, ο οποίος επεξηγείται αναλυτικά (25), ενώ ο μηχανισμός του βίντεο ο οποίος χρησιμοποιείται (τουλάχιστον στην Ευρώπη) είναι αυτός του MPEG (Motion Pictures Expert Group) (22, 23). Το MPEG-2 έχει χρησιμοποιηθεί και χρησιμοποιείται σε πολλές περιπτώσεις τηλεοπτικής μετάδοσης, ωστόσο σε αρκετές περιπτώσεις (συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας) χρησιμοποιείται και το πρότυπο MPEG-4 (AVC/H264), το οποίο εξασφαλίζει πιο αποδοτική συμπίεση (24).

Ο μηχανισμός συμπίεσης του βίντεο αποτελείται από τα επόμενα βήματα:

- Μείωση της ακρίβειας των τιμών της φωτεινότητας και των χρωμοδιαφορών, δηλαδή μείωση του πλήθους των επιπέδων κβαντισμού και συνακόλουθη μείωση των bits που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση των τιμών από 10 σε 8.
- Παράλειψη των τμημάτων του βίντεο τα οποία δεν περιέχουν χρήσιμη πληροφορία, όπου με την έννοια χρήσιμη πληροφορία εννοούμε το τμήμα που δεν αντιστοιχεί σε οπτικό σήμα αλλά στους οριζόντιους και κατακόρυφους παλμούς αμαύρωσης.
- Περαιτέρω μείωση της ανάλυσης της περιγραφής των χρωμάτων, πέρα από το πρότυπο 4:2:2 το οποίο χρησιμοποιείται κατά τη δημιουργία του σήματος. Είναι δηλαδή δυνατή η χρήση διαφορετικών προτύπων στις γραμμές του σήματος, ώστε να εκμεταλλευτούμε τη σχετικά περιορισμένη ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού στην πληροφορία που αφορά τα χρώματα.
- Αξιοποίηση της ομοιότητας η οποία τυπικά εμφανίζεται μεταξύ χρονικά διαδοχικών πλαισίων. Η ιδέα είναι να γίνει χρήση της περιγραφής ενός υπάρχοντος πλαισίου για την υποβοήθηση της περιγραφής ενός από τα επόμενα πλαίσια. Χρησιμοποιούνται, δηλαδή, εικόνες αναφοράς και αξιοποιείται η κωδικοποίηση μόνο των διαφορών μεταξύ των διαδοχικών εικόνων. Η ομοιότητα αυτή είναι πιο έντονη στα χρονικά διαστήματα που δεν έχουμε έντονη κίνηση στο βίντεο.
- Αξιοποίηση της ομοιότητας που ενδέχεται να υπάρχει μεταξύ των περιοχών που συνθέτουν ένα πλαίσιο. Η ομοιότητα αυτή είναι αρκετά τυπική σε πολλές περιπτώσεις όπου έχουμε σχεδόν ομοιόμορφες περιοχές, όπως, για παράδειγμα, τον ουρανό ή άλλες επιφάνειες.
- Αξιοποίηση του γεγονότος ότι ορισμένα από τα σύμβολα εμφανίζονται πιο συχνά από άλλα. Ότι το περιεχόμενο, δηλαδή, μπορεί να έχει σταθερές στατιστικές ιδιότητες αναφορικά με τη συχνότητα εμφάνισης των συμβόλων. Τέτοιου είδους ιδιότητες είναι χρήσιμες αναφορικά με την κωδικοποίηση των συμβόλων.

Στην εικόνα 3.1 απεικονίζονται γραφικά τα βήματα τα οποία προαναφέραμε.



Εικόνα 3.1 Βασικά βήματα σε μια τυπική διαδικασία συμπίεσης βίντεο.

Τα παραπάνω βήματα μπορούμε να τα αντιστοιχίσουμε στα είδη πλεονασμού που εξετάσαμε στα προηγούμενα. Περισσότερες λεπτομέρειες δίνονται στις επόμενες ενότητες, οι οποίες βασίζονται στα σχετικά πρότυπα που αναφέρθηκαν. Περαιτέρω πληροφορίες και πιο αναλυτικές περιγραφές είναι διαθέσιμες στα (26), (27).



[Παρατίθεται ένα επεξηγηματικό βίντεο για την αξιοποίηση των διαφόρων ειδών πλεονασμού στο πλαίσιο συμπίεσης βίντεο.](#)

3.3 Προετοιμασία Σήματος Βίντεο

3.3.1 Μείωση Ακρίβειας Βίντεο

Στην αναλογική τηλεόραση το κατώφλι του θορύβου στο βίντεο τίθεται στην τιμή των 48 dB. Στην περίπτωση, δηλαδή, που ο λόγος σήματος προς θόρυβο (σηματοθορυβικός λόγος - Signal to Noise Ratio, SNR) είναι μεγαλύτερος ή ίσος των 48 dB θεωρούμε ότι ο θόρυβος στο βίντεο δεν είναι ορατός στο ανθρώπινο μάτι. Η κβαντοποίηση με χρήση 8 bits παρέχει επίπεδο θορύβου κάτω από τα 48 dB. Για αυτόν τον λόγο ο θόρυβος κβαντοποίησης δεν είναι αντιληπτός από το ανθρώπινο μάτι. Υπό αυτήν την έννοια, οι συνιστώσες Y, Cb, Cr μπορούν να έχουν ακρίβεια 10 bits όταν χρησιμοποιούνται εντός του στούντιο (ή εν γένει κατά τη λήψη του σήματος) αλλά η συγκεκριμένη ακρίβεια δεν είναι απαραίτητη κατά τη μετάδοση του σήματος.

Το πλήθος των bits που επιλέγουμε για τον κβαντισμό σχετίζεται με την ποιότητα του κβαντισμού και συγκεκριμένα τον λόγο του σήματος προς τον θόρυβο κβαντισμού (Signal to Quantization Noise Ratio, SQNR). Το SQNR σχετίζεται με τη προσέγγιση (στρογγυλοποίηση) που πραγματοποιείται και εξαρτάται από το πλήθος των διαθέσιμων επιπέδων. Στην ουσία, αφορά τη διαφορά μεταξύ της πραγματικής τιμής του αναλογικού σήματος και της κοντινότερης κβαντισμένης τιμής. Η στρογγυλοποίηση αυτή αφορά το σφάλμα κβαντισμού (ή, αλλιώς, τον θόρυβο κβαντισμού).

Επειδή το σφάλμα κβαντισμού είναι κατά μέγιστο το ήμισυ του διαστήματος κβαντισμού, μπορούμε να το υπολογίσουμε με χρήση του πλήθους των bits, έστω N. Συγκεκριμένα, έστω ότι η μέγιστη τιμή είναι

$2^{N-1} - 1$ ($\sim 2^{N-1}$) και στα αρνητικά (κατ' απόλυτη τιμή): -2^{N-1} . Η τιμή του SQNR μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\text{SQNR} = 20 \log(2^{N-1} / (1/2)) = 20 * N * \log 2 = 6,02N \text{ (dB)} \quad (1)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι ο θόρυβος κβαντισμού αυξάνεται κατά περίπου 12 dB, με τη μείωση της ακρίβειας από 10 σε 8 bits. Όσον αφορά τον ρυθμό μετάδοσης η μείωση ανέρχεται στο 20%, αφού, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση, παραμένει το 80% του αρχικού περιεχομένου (λόγω του υποβιβασμού της ακρίβειας κβαντισμού από τα 10 στα 8 bits).

3.3.2 Διάστημα Οριζόντιων και Κατακόρυφων Παλμών

Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, κυρίως για λόγους συμβατότητας με τα αναλογικά συστήματα τηλεόρασης (τα οποία βασίζονται στον καθοδικό σωλήνα, είτε όσον αφορά τη λήψη του σήματος είτε την αναπαραγωγή του), το σήμα βίντεο το οποίο παράγεται έχει κάποια χρονικά διαστήματα, στα οποία δεν αντιστοιχεί χρήσιμο οπτικό σήμα. Αυτά είναι τα διαστήματα που αντιστοιχούν στον οριζόντιο και τον κατακόρυφο παλμό επιστροφής (ή αμαύρωσης). Τα διαστήματα αυτά δεν φέρουν χρήσιμη πληροφορία. Μάλιστα, ενώ στην αναλογική τηλεόραση κατά τη διάρκεια του κατακόρυφου παλμού αμαύρωσης μεταδίδεται το Teletext, στην περίπτωση της ψηφιακής τηλεόρασης, οι συγκεκριμένες πληροφορίες μεταδίδονται με διαφορετικό τρόπο, ως διακριτή ψηφιακή ροή. Επιπρόσθετα, παρά τη δυνατότητα να μεταδίδονται άλλου είδους πληροφορίες, όπως, για παράδειγμα, ο ήχος, στην περίπτωση της ψηφιακής τηλεόρασης δεν γίνεται εκμετάλλευση αυτών των διαστημάτων (αφού και ο ήχος μεταδίδεται ξεχωριστά ως διακριτή ροή).

Αυτό σημαίνει ότι στην κωδικοποίηση MPEG, τα χρονικά διαστήματα που αντιστοιχούν στους παλμούς επιστροφής δεν αξιοποιούνται. Επειδή στην πλευρά του δέκτη είναι δυνατή η επαναδημιουργία τους, δεν απαιτείται η αποστολή τους. Ας εξετάσουμε ποιο είναι το κέρδος στην περίπτωση που δεν αποστέλλονται τα συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, για την περίπτωση του ευρωπαϊκού συστήματος.

Αναφορικά με τον παλμό κατακόρυφης επιστροφής / αμαύρωσης, αυτός αντιστοιχεί σε περίπου 50 γραμμές από τις 625, άρα στο 8% του συνολικού σήματος.

$$50 / 625 = 8\%$$

Επιπλέον, υπενθυμίζουμε ότι κάθε γραμμή διαρκεί 64 μsec των οποίων τα 12 μsec αφιερώνονται στην επιστροφή της δέσμης από δεξιά προς τα αριστερά. Αυτό αντιστοιχεί στο ποσοστό που δίνεται από την επόμενη σχέση:

$$12 / 64 = 19\%$$

Αθροιστικά, τα δύο παραπάνω ποσοστά δίνουν περί το 25% του σήματος, λόγω και της επικάλυψης που υπάρχει μεταξύ των παλμών.

3.3.3 Υποδειγματοληψία Χρώματος

Όπως εξετάσαμε στο κεφάλαιο δημιουργίας του οπτικού σήματος, από την ίδια τη δημιουργία του σήματος οι συνιστώσες που αφορούν τα χρώματα και συγκεκριμένα οι χρωμοδιαφορές Cb, Cr λαμβάνονται με μικρότερη συχνότητα δειγματοληψίας σε σχέση με τη φωτεινότητα Y. Συγκεκριμένα, η συχνότητα δειγματοληψίας είναι η μισή (κατά την οριζόντια κατεύθυνση) και σε κάθε 4 δείγματα φωτεινότητας αντιστοιχούν 2 δείγματα από τις χρωμοδιαφορές. Έχουμε, δηλαδή, το πρότυπο:

$$4 : 2 : 2$$

Αυτό συνεπάγεται τη μείωση του εύρους ζώνης του σήματος των χρωμοδιαφορών στα 2,75 MHz (σε σχέση με το σήμα της φωτεινότητας το οποίο έχει εύρος ζώνης 5,75 MHz). Με δεδομένη τη μειωμένη σχετικά ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού στο σήμα του χρώματος (δηλαδή των χρωμοδιαφορών), είναι δυνατή η περαιτέρω μείωση του ρυθμού του σήματος των χρωμοδιαφορών κατά το ήμισυ.

Συγκεκριμένα, το σκεπτικό είναι να λαμβάνονται δείγματα χρωμοδιαφορών ανά δύο γραμμές (στη μία, δηλαδή, λαμβάνονται και στην άλλη όχι). Αυτό μας δίνει το πρότυπο:

$$4 : 2 : 0,$$

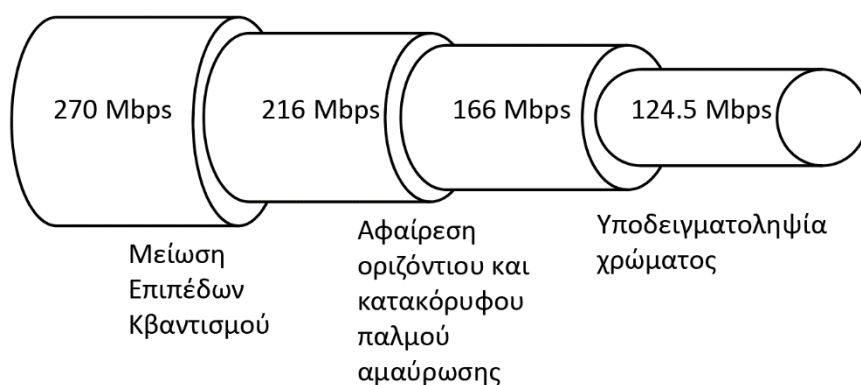
το οποίο δεν επιβαρύνει ιδιαίτερα την αντιλαμβανόμενη από τον άνθρωπο ποιότητα. Από την πλευρά του απαιτούμενου ρυθμού έχουμε υποβάθμιση αφού 2*4 δείγματα φωτεινότητας αντιστοιχούν σε 2 δείγματα από τις χρωμοδιαφορές. Η υποβάθμιση του ρυθμού αντιστοιχεί στο 25%.

3.3.4 Περιορισμός Ρυθμού

Ο περιορισμός του ρυθμού που έχει επιτευχθεί μέχρι αυτό το σημείο υπολογίζεται ως εξής με βάση τα προαναφερθέντα στάδια. Θεωρούμε ότι ο εικονολήπτης δίνει σήμα ρυθμού 270 Mbps.

- Με τη μείωση των επιπέδων κβαντισμού, εξοικονομείται το 20%, οπότε ο ρυθμός γίνεται 216 Mbps.
- Με την αφαίρεση των τμημάτων που αντιστοιχούν στους παλμούς οριζόντιας και κατακόρυφης επιστροφής / αμαύρωσης, αφαιρείται το 25% περίπου, οπότε ο ρυθμός γίνεται 166 Mbps.
- Με την υποδειγματοληψία του χρώματος και τον υποβιβασμό στο 4:2:0 έχουμε περιορισμό του ρυθμού κατά 25% στα 124.5 Mbps.

Ο σταδιακός αυτός περιορισμός του ρυθμού απεικονίζεται στην Εικόνα 3.2, η οποία δείχνει πώς από τα 270 Mbps μπορούμε να καταλήξουμε στα 124,5 Mbps.



Εικόνα 3.2 Υποβιβασμός ρυθμού πληροφορίας.

Τα επόμενα βήματα έχουν να κάνουν με τον περαιτέρω περιορισμό του ρυθμού στα 2-4 Mbps. Η επίτευξη αυτού του στόχου γίνεται με πιο περίπλοκους μηχανισμούς.

3.4 Εκμετάλλευση Χρονικού Πλεονασμού

Όπως έχει συζητηθεί και στις προηγούμενες ενότητες το βίντεο αποτελείται από συνεχόμενες εικόνες οι οποίες λαμβάνονται αρκετές φορές σε ένα δευτερόλεπτο. Οι εικόνες αυτές στις περισσότερες περιπτώσεις μοιάζουν (οπτικά) μεταξύ τους. Εν γένει οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των εικόνων μπορεί να είναι περιορισμένες και αφορούν το δυναμικό κομμάτι, σε αυτό, δηλαδή, που υπάρχει κάποια κίνηση. Το στατικό κομμάτι παραμένει σε μεγάλο βαθμό σταθερό από εικόνα σε εικόνα. Ακόμη όμως και στο δυναμικό τμήμα οι αλλαγές στις εικόνες μπορεί να προέρχονται από μετακινήσεις αντικειμένων μεταξύ πλαισίων.

Με βάση τα παραπάνω προκύπτουν κάποιες ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις. Το να αποστέλλεται ολόκληρη η περιγραφή μιας εικόνας (ενός πλαισίου) οδηγεί στην επαναλαμβανόμενη αποστολή της ίδιας πληροφορίας, ή εν γένει πληροφορίας που θα μπορούσε να δημιουργηθεί εκ νέου στον δέκτη. Το σκεπτικό του περιορισμού του χρονικού πλεονασμού είναι να αποστέλλεται μόνο η απαραίτητη πληροφορία, η πληροφορία, δηλαδή, που δεν θα μπορούσε να δημιουργηθεί εκ νέου στον δέκτη. Η πληροφορία αυτή σχετίζεται με τις περιοχές που υπάρχουν διαφοροποιήσεις σε σχέση με τα προηγούμενα πλαίσια, οπότε είναι απαραίτητη η αποστολή της διαφοράς αυτής. Ο μηχανισμός περιλαμβάνει τον διαχωρισμό της εικόνας σε υποπεριοχές και την κωδικοποίηση των εικόνων κατά I, P και B.

Κατά τον διαχωρισμό της εικόνας σε περιοχές, αναζητούνται οι στατικές και οι δυναμικές περιοχές. Για να είναι διαχειρίσιμη η αναζήτηση των περιοχών αυτών εντός μιας εικόνας, αυτή χωρίζεται σε ίσες υποπεριοχές. Συγκεκριμένα, σε τμήματα (block) των 16x16 εικονοστοιχείων (pixels). Στις υποπεριοχές αυτές υπάρχουν 16x16 τιμές φωτεινότητας και σύμφωνα με το πρότυπο 4:2:0, οι τιμές που αντιστοιχούν στα χρώματα είναι σε πλήθος το $2/8=1/4$ αυτών της φωτεινότητας. Αντιστοιχούν, δηλαδή, σε μια περιοχή 8x8 για κάθε μια από τις χρωμοδιαφορές Cb και Cr ενώ το σύνολο των τιμών αυτών αντιστοιχεί σε ένα μακρο-μπλοκ. Για πιο εύκολη διαχείριση, η ανάλυση της εικόνας αποτελείται από εικονοστοιχεία τέτοιου πλήθους ώστε να διαιρούνται με το 16 (όπως, για παράδειγμα, 720 x 576).

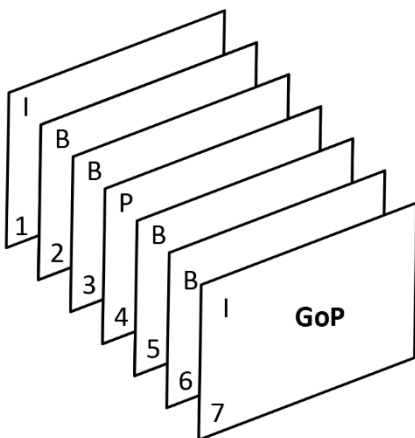
Το βασικό σκεπτικό της εκμετάλλευσης του χρονικού πλεονασμού είναι, όπως συζητήθηκε πιο πάνω, η αποφυγή της επαναλαμβανόμενης αποστολής της πληροφορίας, η οποία δεν είναι απαραίτητη. Αυτό επιτυγχάνεται με την κωδικοποίηση των εικόνων κατά I, P και B. Ο μηχανισμός είναι απλός και λειτουργεί ως εξής:

- Ορισμένα από τα πλαίσια κωδικοποιούνται ανεξάρτητα, χωρίς δηλαδή να λαμβάνεται υπόψη πληροφορία από άλλα πλαίσια. Τα πλαίσια αυτά ονομάζονται (όσον αφορά την κωδικοποίησή τους) τύπου I (I-frames, intracoded frames). Αυτού του είδους τα πλαίσια κωδικοποιούνται και αποστέλλονται περιοδικά.
- Κάποια πλαίσια κωδικοποιούνται λαμβάνοντας υπόψη προηγούμενα πλαίσια. Η κωδικοποίηση γίνεται με εκμετάλλευση των ομοιοτήτων που τυχόν υπάρχουν μεταξύ του τρέχοντος πλαισίου και κάποιου (συγκεκριμένου) προηγούμενου. Οι ομοιότητες αναζητούνται και εντοπίζονται σε επίπεδο μακρο-μπλοκ, δηλαδή σε τμήματα μεγέθους 16x16. Ο μηχανισμός αναζήτησης της ομοιότητας θα εξηγηθεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια παρακάτω. Αυτού του είδους τα πλαίσια ονομάζονται πλαίσια τύπου P (P-frames, predicted frames δηλαδή πλαίσια πρόβλεψης). Επισημαίνεται ότι ο εντοπισμός της τυχόν ομοιότητας σε ένα πλαίσιο τύπου P, γίνεται αξιοποιώντας το προηγούμενο πλαίσιο τύπου I ή P (ανάλογα με το πιο είναι πιο κοντινό χρονικά). Η κωδικοποίηση των πλαισίων τύπου P απαιτεί λιγότερα δεδομένα σε σχέση με την κωδικοποίηση πλαισίων τύπου I.
- Υπάρχουν πλαίσια τα οποία κωδικοποιούνται αξιοποιώντας τον εντοπισμό ομοιοτήτων με προηγούμενα αλλά και επόμενα πλαίσια. Εξαρτώνται, δηλαδή, από ένα προηγούμενο (χρονικά) πλαίσιο τύπου I ή P και ένα επόμενο (χρονικά) πλαίσιο ομοίως τύπου I ή P. Τα πλαίσια αυτού του τύπου ονομάζονται τύπου B (B-frames, bidirectional frames δηλαδή πλαίσια αμφίδρομης πρόβλεψης). Η κωδικοποίηση των πλαισίων τύπου B απαιτεί λιγότερα δεδομένα σε σχέση με την κωδικοποίηση πλαισίων τύπου P (και βέβαια πλαισίων τύπου I).

Η αλληλουχία των πλαισίων και ο τρόπος που εναλλάσσονται είναι δεδομένος και αμετάβλητος στο χρόνο. Συγκεκριμένα, ορίζεται η ομάδα εικόνων, *Group of Pictures (GoP)*, η οποία αποτελείται από μian αλληλουχία διαφορετικών τύπων πλαισίων, I, P και B.

Ένα παράδειγμα GoP συνολικά 7 πλαισίων δίνεται στο επόμενο σχήμα. Παρατηρούμε ότι αποτελείται από τα εξής πλαίσια: I, B, B, P, B, B και I. Κάποιες παρατηρήσεις:

- Ένα GoP ανοίγει με πλαίσιο τύπου I, αφού η κωδικοποίηση αυτού πρέπει να είναι αυτόνομη και να μην έχει εξαρτήσεις από προηγούμενα και εν γένει γειτονικά GoP.
- Ένα GoP μπορεί να κλείσει με πλαίσιο τύπου P ή I. Δεν δύναται να κλείσει με πλαίσιο τύπου B, αφού αυτό θα συνεπάγεται εξάρτηση από επόμενο πλαίσιο.
- Εάν ένα GoP κλείσει με πλαίσιο τύπου I, τότε λέμε ότι το GoP είναι κλειστό.



Εικόνα 3.3 Κλειστή ομάδα πλαισίων.

Στο παραπάνω παράδειγμα έχουμε τις εξής αλληλεξαρτήσεις:

- Το πλαίσιο 1 είναι τύπου I και κωδικοποιείται αυτόνομα.
- Τα πλαίσια 2 και 3 είναι τύπου B και κωδικοποιούνται λαμβάνοντας υπόψη τις κωδικοποιήσεις των πλαισίων τύπου I και P που είναι εκατέρωθέν τους, δηλαδή των πλαισίων 1 και 4. Αυτό σημαίνει ότι η κωδικοποίηση του πλαισίου 4, προηγείται της κωδικοποίησης των 2 και 3.
- Το πλαίσιο 4, ως τύπου P, εξαρτάται από την κωδικοποίηση του πλαισίου 1.
- Τα πλαίσια 5 και 6, ως τύπου B, εξαρτώνται από τις κωδικοποιήσεις των πλαισίων 4 και 7 (P και I αντίστοιχα).
- Το πλαίσιο 7 κωδικοποιείται αυτόνομα και μάλιστα πριν από τις κωδικοποιήσεις των 5 και 6 λόγω των σχετικών αλληλεξαρτήσεων.

Επισημαίνεται ότι στο παράδειγμα που εξετάσαμε, η επόμενη ομάδα πλαισίων επαναλαμβάνει ακριβώς την ίδια δομή. Εκκινεί, δηλαδή, με πλαίσιο τύπου I, το οποίο σημαίνει ότι έχουμε δύο συναπτά πλαίσια τύπου I. Εάν η ομάδα πλαισίων κλείνει με πλαίσιο το οποίο κωδικοποιείται ως P, τότε λέμε ότι η ομάδα πλαισίων είναι ανοικτή.

Ας εξετάσουμε όμως με λίγο μεγαλύτερη λεπτομέρεια τον τρόπο με τον οποίο αναζητούνται οι ομοιότητες μεταξύ πλαισίων. Όπως συζητήθηκε πιο πάνω η αναζήτηση γίνεται σε επίπεδο μακρο-μπλοκ. Η βασική σύγκριση αφορά τα μακρο-μπλοκ γειτονικών πλαισίων. Συγκεκριμένα, κάθε μακρο-μπλοκ σε μια εικόνα εξετάζεται ώστε να διαπιστωθεί:

- Εάν είναι όμοιο με το μακρο-μπλοκ στην αντίστοιχη θέση του προηγούμενου πλαισίου (με κάποιες μικρές διαφοροποιήσεις).
- Εάν έχει προκύψει από μεταφορά αντίστοιχου μακρο-μπλοκ του προηγούμενου πλαισίου (το οποίο μπορεί να βρίσκεται σε διαφορετική θέση).
- Εάν είναι νέο και δεν συναντάται στην προηγούμενη εικόνα.

Στην πρώτη περίπτωση, δεν απαιτείται το διάνυσμα κίνησης αλλά είναι δυνατόν να μεταδοθεί η διαφορά μεταξύ των τιμών των μακρο-μπλοκ. Στη δεύτερη από τις παραπάνω τρεις περιπτώσεις η περιγραφή του μακρο-μπλοκ μπορεί να δοθεί με τη μετακίνηση του όμοιου του μακρο-μπλοκ το οποίο ανήκει στο προηγούμενο πλαίσιο. Η περιγραφή αυτή γίνεται μέσω του *διανύσματος κίνησης (motion vector)*. Επιπλέον, επειδή ενδέχεται να υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ των δύο μακρο-μπλοκ, υπάρχει η δυνατότητα μεταφοράς και της διαφοράς (του σφάλματος, δηλαδή) των δύο μακρο-μπλοκ. Στην τρίτη περίπτωση το μακρο-μπλοκ κωδικοποιείται εκ νέου.

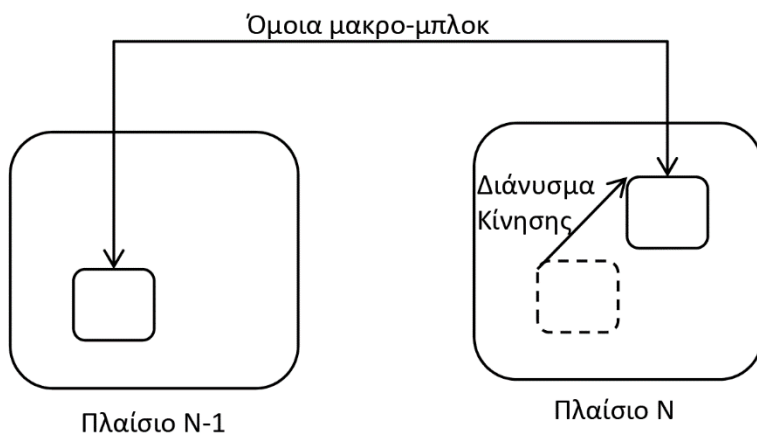
Αξίζει να σημειωθεί ότι αφού μπορεί να έχουμε και πλαίσια τύπου B, τότε το μακρο-μπλοκ αναζητείται όχι μόνο στο προηγούμενο I ή P αλλά και στο επόμενο πλαίσιο.

Για τον υπολογισμό του διανύσματος κίνησης, ο μηχανισμός ξεκινάει από το μακρο-μπλοκ του τρέχοντος πλαισίου. Ελέγχει στο προηγούμενο P ή I πλαίσιο (εάν το τρέχον πλαίσιο είναι τύπου P) ή στο

προηγούμενο και στο επόμενο πλαίσιο (εάν το τρέχον πλαίσιο είναι τύπου B) για παρόμοια μακρο-μπλοκ. Η αναζήτηση δεν γίνεται σε ολόκληρη την εικόνα αλλά πέριξ της περιοχής του αρχικού μακρο-μπλοκ. Ο περιορισμός αυτός της περιοχής αναζήτησης γίνεται για να ελαττωθεί η πολυπλοκότητα του συνολικού συστήματος αλλά και το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την κωδικοποίηση. Η αναζήτηση γίνεται μέσω του ταιριάσματος σε επίπεδο μακρο-μπλοκ. Εάν βρεθεί κάποιο αντίστοιχο σε τιμές μακρο-μπλοκ, τότε υπολογίζεται το διάνυσμα κίνησης, το οποίο αντιπροσωπεύει τη διαφορά στη θέση του αρχικού με το εντοπισμένο μακρο-μπλοκ. Επίσης υπολογίζεται η διαφορά μεταξύ των δύο μακρο-μπλοκ.

Η διαδικασία στην περίπτωση του πλαισίου τύπου B γίνεται εξετάζοντας τα πλαίσια και προς τις δύο κατευθύνσεις. Παράλληλα με το διάνυσμα κίνησης, μεταδίδονται επιπλέον απαραίτητες πληροφορίες για να καλυφθούν οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο πλαισίων. Οι πληροφορίες αυτές είναι το σφάλμα που προκύπτει μεταξύ της πρόβλεψης που επιτυγχάνεται και των πραγματικών τιμών του πλαισίου.

Ο υπολογισμός του διανύσματος κίνησης μεταξύ δύο πλαισίων, N-1 και N, παρίσταται στην επόμενη εικόνα 3.4.

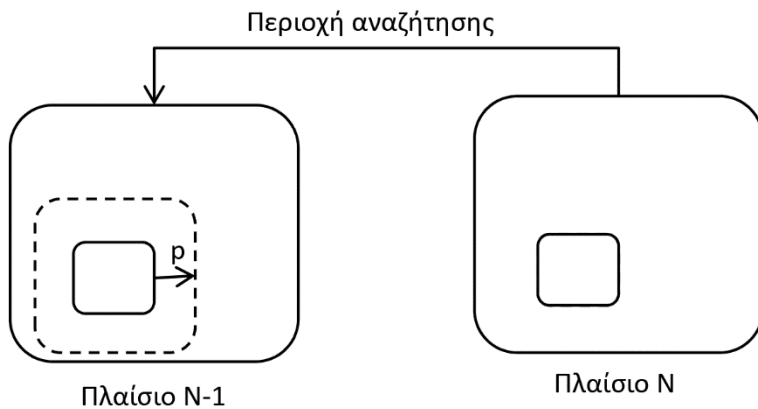


Εικόνα 3.4 Υπολογισμός διανύσματος κίνησης (*motionvector*).

Σημειώνουμε ότι παρόλο που στην πλειονότητα των περιπτώσεων η αναζήτηση όμοιων περιοχών γίνεται σε επίπεδο μακρο-μπλοκ, αντίστοιχη αναζήτηση μπορεί να γίνει σε επίπεδο:

- Εικονοστοιχείου (pixel) με μεγάλο όμως πλήθος υπολογισμών, γεγονός το οποίο την καθιστά ασύμφορη.
- Αντικειμένων εντός της εικόνας (object-based), όπου τα αντικείμενα αναγνωρίζονται αυτόματα εντός της εικόνας και παρακολουθούνται στα διάφορα πλαίσια. Αυτός ο τρόπος παρά τις καινοτομίες που προσφέρει παρουσιάζει ακόμη μειονεκτήματα που περιλαμβάνουν τις δυσκολίες στην αναγνώριση αντικειμένων και την εμφάνιση πολλών σφαλμάτων. Αποτελεί όμως αντικείμενο έρευνας.
- Τμήματος της εικόνας (block-based), η οποία είναι και η πιο απλή περίπτωση και χρησιμοποιείται όπως προαναφέραμε κυρίως σήμερα και μάλιστα με χρήση αλγορίθμων που εκτελούνται με χρήση υλικού για να εξασφαλιστεί καλύτερη απόδοση σε σχέση με τη χρήση λογισμικού. Τυπικές διαστάσεις του μακρο-μπλοκ είναι 16x16 (ή και 8 x 8).

Η εκτίμηση κίνησης είναι το πιο χρονοβόρο κομμάτι της συμπίεσης. Οι σχετικοί αλγόριθμοι αναζητούν για κάθε μακρο-μπλοκ, το αντίστοιχο μακρο-μπλοκ σε προηγούμενο (ή επόμενο) πλαίσιο που ταιριάζει. Εάν υποθέσουμε ανάλυση 720x480, το πλήθος των αναζητήσεων είναι απαγορευτικό από πλευράς απόδοσης. Απαιτείται να περιορίσουμε την αναζήτηση σε συγκεκριμένες περιοχές. Συνήθως η περιοχή αναζήτησης εκτείνεται από την τρέχουσα θέση συν p pixels (π.χ. $p=7$). Η τεχνική αυτή παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 3.5 Αναζήτηση μακρο-μπλοκ σε συγκεκριμένη περιοχή.

Για την εύρεση του καλύτερου ταιριάσματος χρησιμοποιούνται συνήθως δύο συναρτήσεις:

- Mean Absolute Difference (MAD) – Μέση τιμή των απόλυτων διαφορών
- Mean Squared Error (MSE) – Μέση τιμή τετραγώνων των σφαλμάτων

$$MAD = \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} |C_{ij} - R_{ij}| \quad (2)$$

$$MSE = \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (C_{ij} - R_{ij})^2 \quad (3)$$

Όπου N είναι η διάσταση (του τετραγωνικού) μακρο-μπλοκ, C τιμή στο τρέχον πλαίσιο και R στο πλαίσιο αναφοράς.

Τα πλαίσια τύπου B βρίσκονται μεταξύ I και P. Όπως επισημάναμε και παραπάνω, για την αποκωδικοποίηση ενός πλαισίου τύπου B απαιτείται η αποκωδικοποίηση των πλαισίων I και P που το περιβάλλουν. Για το λόγο αυτό δύναται να τροποποιείται κατάλληλα η αλληλουχία των πλαισίων για την κωδικοποίηση, μετάδοση και αποκωδικοποίηση.

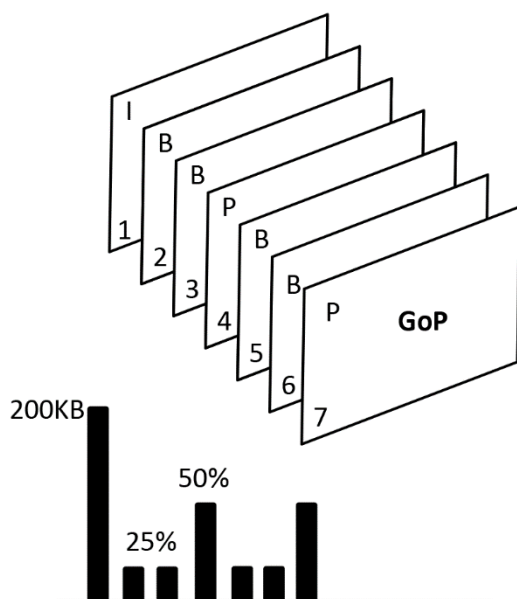
Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζεται η σειρά με την οποία γίνεται η διαχείριση 14 πλαισίων, στην περίπτωση που έχουμε GoP αποτελούμενο από 7 πλαίσια της ακόλουθης μορφής: IBBPBBP. Η μνήμη που απαιτείται στον δέκτη στην περίπτωση αυτή είναι 2 θέσεις. Σύμφωνα με το πρότυπο του MPEG η δομή του GoP μπορεί να είναι μεταβλητή. Εάν, λοιπόν, επιλέξουμε να μη χρειάζεται μεγάλη μνήμη στον δέκτη, η δομή της ομάδας πλαισίων μπορεί να αλλάξει δυναμικά κατά τη μετάδοση.

	Ομάδα Πλαισίων GoP: IBBPBBP													
Αύξων αριθμός πλαisiού	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Αλληλουχία Κωδικοποίησης	1 (I)	4(P)	2 (B)	3 (B)	7 (P)	5 (B)	6 (B)	8 (I)	11 (P)	9 (B)	10 (B)	14 (P)	12 (B)	12 (B)
Αλληλουχία Μετάδοσης & Αποκωδ/σης	1 (I)	4(P)	2 (B)	3 (B)	7 (P)	5 (B)	6 (B)	8 (I)	11 (P)	9 (B)	10 (B)	14 (P)	12 (B)	12 (B)
Αλληλουχία Αναπαραγωγής	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Πίνακας 3.1 Αλληλουχία πλαισίων σε ένα GoP κατά τις διάφορες λειτουργίες.

Η επαναφορά των πλαισίων στην ορθή σειρά γίνεται με χρήση του πεδίου χρονοσήμανσης αποκωδικοποίησης (Decoding Time Stamp, DTS) το οποίο βρίσκεται εντός της επικεφαλίδας του πακετοποιημένου στοιχειώδους ρυθμού.

Για να δοθεί μια αίσθηση του οφέλους που δημιουργείται με την εκμετάλλευση του χρονικού πλεονασμού παρατίθεται η επόμενη εικόνα.



Εικόνα 3.6 Ενδεικτικά μεγέθη πλαισίων ανάλογα με το είδος της κωδικοποίησης.

Όπως εμφανίζεται στην εικόνα, το μέγεθος ενός πλαισιού που κωδικοποιείται ως I είναι το μεγαλύτερο σε σχέση με τα μεγέθη των P και B. Το μέγεθος του πλαισιού τύπου P μπορεί να είναι στο ήμισυ αυτού του I, ενώ του B δύναται να φτάσει και στο 25%. Αυτές, βέβαια, είναι ενδεικτικές τιμές, αφού οι αναλογίες είναι εν γένει παραμετροποιήσιμες.

3.5 Εκμετάλλευση Χωρικού Πλεονασμού

Ο χωρικός πλεονασμός προέρχεται από τις ομοιότητες σε διαφορετικές περιοχές εντός μιας εικόνας. Το φαινόμενο αυτό είναι αρκετά συχνό και γίνεται εκμετάλλευση του χωρικού πλεονασμού με τα πρότυπα συμπίεσης της στατικής εικόνας. Το πλέον διαδεδομένο αυτών των προτύπων είναι το JPEG (Joint Pictures Expert Group).

Η εκμετάλλευση του χωρικού πλεονασμού συνίσταται στην αφαίρεση πληροφορίας, η οποία δεν είναι τόσο σημαντική μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων. Πραγματοποιείται με κωδικοποίηση μετασχηματισμού,

ο οποίος μετασχηματίζει την πληροφορία από το αρχικό πεδίο σε ένα ενδιάμεσο πεδίο, κατάλληλο για συμπίεση. Στο δεύτερο αυτό πεδίο επιλέγονται και κωδικοποιούνται οι συντελεστές του μετασχηματισμού, οι οποίοι περιέχουν τη μεγάλη ενέργεια (δηλαδή οι σημαντικοί) και αγνοούνται ή κωδικοποιούνται με μικρότερη ακρίβεια οι υπόλοιποι συντελεστές. Το αρχικό σήμα ανακτάται (με απώλειες) μέσω του αντιστρόφου μετασχηματισμού.

Ο βασικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στο JPEG είναι ο Διακριτός Μετασχηματισμός Συνημιτόνου (Discrete Cosine Transform, DCT), ο οποίος χρησιμοποιείται και για την κωδικοποίηση των εικόνων στην περίπτωση του βίντεο. Αυτός ο τρόπος συμπίεσης βασίζεται στο γεγονός ότι ο ανθρώπινος οφθαλμός δεν αντιλαμβάνεται με μεγάλη ακρίβεια τις απότομες διαφοροποιήσεις (απότομες με την έννοια ότι πραγματοποιούνται σε μικρό σχετικά αριθμό εικονοστοιχείων, με αποτέλεσμα να αντιστοιχούν σε υψηλές χωρικές συχνότητες) σε μια εικόνα. Αυτό, σε αντιπαράθεση με τις λιγότερο απότομες διαφοροποιήσεις εντός της εικόνας, αυτές δηλαδή που γίνονται σε μεγαλύτερες επιφάνειες εικονοστοιχείων (και αντιστοιχούν σε χαμηλότερες χωρικές συχνότητες) τις οποίες το ανθρώπινο μάτι είναι σε θέση να αντιληφθεί επακριβώς.

Με άλλα λόγια, το ανθρώπινο μάτι δεν έχει μεγάλη ευαισθησία στις υψηλές χωρικές συχνότητες. Η παρατήρηση αυτή ισχύει και στο αναλογικό βίντεο όπου είναι δυνατό να επιτραπεί περισσότερος θόρυβος στις υψηλές συχνότητες σε σχέση με τις χαμηλές.

Με βάση τα παραπάνω, οι πιο χαμηλές (χωρικές) συχνότητες χρειάζεται να κωδικοποιηθούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια (κυρίως όσον αφορά την κβάντιση), ενώ οι πιο υψηλές συχνότητες δεν απαιτείται να κωδικοποιηθούν με πολύ μεγάλη λεπτομέρεια. Η μείωση αυτή στη λεπτομέρεια είναι δυνατό να προκαλέσει σημαντική εξοικονόμηση στον απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης.

Οπότε το επόμενο ερώτημα που τίθεται είναι *πώς θα ξεχωρίσουμε την πληροφορία που αφορά τις υψηλές (χωρικές) συχνότητες από την πληροφορία που αφορά τις χαμηλές συχνότητες*. Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα βασίζεται στον μετασχηματισμό του σήματος στο πεδίο της συχνότητας.

3.5.1 Διακριτός Μετασχηματισμός Συνημιτόνου

Ο Διακριτός Μετασχηματισμός Συνημιτόνου (ΔΜΣ), Discrete Cosine Transform (DCT), είναι μια ειδική μορφή του Διακριτού Μετασχηματισμού Φουριέ (Discrete Fourier Transform). Με χρήση του μετασχηματισμού αυτού, πλήθος τιμών μετασχηματίζεται σε σύνολο τιμών ίδιου πλήθους στο πεδίο των συχνοτήτων. Ο μετασχηματισμός συνημιτόνου χρησιμοποιείται σε μία ή σε περισσότερες διαστάσεις. Στη μία διάσταση, η ανεξάρτητη μεταβλητή συνήθως είναι ο χρόνος, ενώ στις δύο διαστάσεις οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι το επίπεδο (μήκος και πλάτος).

Ο λόγος για τον οποίο επιλέγεται η χρήση του DCT, σε σχέση με άλλους ισοδύναμους αλγορίθμους μετασχηματισμού όπως ο Διακριτός Μετασχηματισμός Φουριέ, είναι ότι ο ΔΜΣ επιδεικνύει ανθεκτικότητα στην παράλειψη ενός ποσοστού από τους συντελεστές που προκύπτουν αφού εφαρμοστεί σε κάποια δεδομένα. Η ανθεκτικότητα αυτή είναι μεγαλύτερη από αυτή του ΔΜΦ και οδηγεί σε σημαντικό βαθμό συμπίεσης. Η ανθεκτικότητα αφορά το γεγονός ότι μετά τον αντίστροφο μετασχηματισμό τα δεδομένα που προκύπτουν ομοιάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό με τα αρχικά σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση (παράλειψη ίδιους πλήθους συντελεστών) του ΔΜΦ.

Στη συνέχεια επεξηγούνται οι σχέσεις που δίνουν το ΔΜΣ για τις δύο περιπτώσεις, δηλαδή για τη μία και τις δύο διαστάσεις.

3.5.1.1 Μονοδιάστατος ΔΜΣ

Έστω ότι το αρχικό μας σήμα είναι το $x(n)$ και η έξοδος του ΔΜΣ είναι το $y(n)$. Το $y(n)$ δίνεται από την επόμενη σχέση:

$$y(n) = w(n) \sum_{n=1}^N x(n) \cos \frac{\pi(2n-1)(k-1)}{2N} \quad k=1, 2, \dots, N$$

$$w(k) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N}}, & k=1 \\ \sqrt{\frac{2}{N}}, & 2 \leq k \leq N \end{cases}$$

(4)

Παρατηρούμε ότι N είναι το πλήθος των δεδομένων που πρόκειται να μετασχηματιστούν. Το πλήθος παραμένει, όπως προαναφέρθηκε, το ίδιο και στις δύο περιπτώσεις.

Παράδειγμα

Ως παράδειγμα ας εξετάσουμε ένα σύνολο ακεραίων x , από το 1 έως και το 10. Αυτό το σύνολο μετασχηματίζεται κατά ΔΜΣ.

Ο κώδικας που πραγματοποιεί το ΔΜΣ καθώς και το αποτέλεσμα που προκύπτει φαίνονται στον επόμενο πίνακα:

```
x=[1:10] % δημιουργία πίνακα με τιμές αριθμητικής ακολουθίας
y=dct(x) % μετασχηματισμός κατά DCT (ΔΜΣ)

Με αποτέλεσμα:
y= [17.3925 -9.0249 0 -0.9667 0 -0.3162 0 -0.1279 0 -0.0359]
```

Πίνακας 3.2 Μετασχηματισμός δεδομένων κατά μονοδιάστατο ΔΜΣ.

Στο αποτέλεσμα παρατηρούμε ότι τα πρώτα (στη σειρά) στοιχεία έχουν υψηλές τιμές (κατ' απόλυτο). Οι τιμές αυτές μειώνονται (κατ' απόλυτη τιμή) στα επόμενα στοιχεία (χωρίς απαραίτητα να συγκροτούν φθίνουσα ακολουθία). Οι τιμές δεν ανήκουν στο πεδίο του χρόνου αλλά της συχνότητας. Σύμφωνα με την προηγούμενη συζήτηση, οι πρώτες τιμές αφορούν τις χαμηλές συχνότητες, ενώ οι επόμενες σε υψηλότερες. Η πρώτη τιμή αντιστοιχεί στη μηδενική συχνότητα.

Εάν θεωρήσουμε ότι το σήμα το οποίο μετασχηματίζεται αντιστοιχεί σε σήμα εικόνας, αποτελείται δηλαδή από ένα πίνακα δύο διαστάσεων, τότε ο ΔΜΣ θα αποτελείται από πίνακα των ίδιων διαστάσεων. Οι θέσεις του πίνακα αντιστοιχούν ομοίως σε συχνότητες, και στη συγκεκριμένη περίπτωση σε χωρικές συχνότητες. Μετασχηματίζοντας δηλαδή κατά ΔΜΣ, μπορούμε να επεξεργαστούμε τους συντελεστές ανάλογα με τις χωρικές συχνότητες στις οποίες αντιστοιχούν. Αυτό μπορεί να γίνει λαμβάνοντας υπόψη τα επίπεδα ευαισθησίας του ανθρώπινου ματιού στις διάφορες συχνότητες. Έτσι, μετά τον μετασχηματισμό οι συντελεστές διαιρούνται με συγκεκριμένους συντελεστές κβαντοποίησης (οι οποίοι προκύπτουν από την ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού στις διάφορες συχνότητες). Όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές των συντελεστών κβαντοποίησης (δηλαδή του διαιρέτη) τόσο μειώνονται οι τιμές των συντελεστών προς κβαντοποίηση. Σε αρκετές περιπτώσεις οι συντελεστές αυτοί μηδενίζονται (ειδικά καθώς αυξάνουν οι συχνότητες). Οι μηδενικοί συντελεστές κωδικοποιούνται με ελάχιστες απαιτήσεις όσον αφορά το πλήθος των bits που χρησιμοποιούνται. Περισσότερες λεπτομέρειες για τον δισδιάστατο ΔΜΣ δίνονται στην επόμενη υποενότητα.

Είναι ευνόητο ότι αυτό το είδος της συμπίεσης είναι απωλεστικό, αφού στον αποκωδικοποιητή δεν μπορούμε να πάρουμε την ίδια εικόνα με την αρχική.

Τα βήματα είναι τα εξής:

- μετασχηματισμός κατά ΔΜΣ των αρχικών τιμών
- προσαρμογή τιμών με χρήση συντελεστών κβαντισμού
- κβαντισμός των προσαρμοσμένων συντελεστών

Σχετικά με τον υπολογισμό του μετασχηματισμού, παρατηρούμε ότι οι τιμές της συνάρτησης βάσης (στην οποία στηρίζεται ο μετασχηματισμός) δεν αλλάζουν καθώς διαφοροποιούνται τα δείγματα. Αυτό σημαίνει ότι οι τιμές αυτές μπορούν να προ-υπολογιστούν και ο μετασχηματισμός να πραγματοποιηθεί ως πολλαπλασιασμός πινάκων με διαστάσεις:

$$[1 \times N] * [N \times N]$$

Άλλη μια παρατήρηση αφορά το γεγονός ότι ο πρώτος όρος των μετασχηματισμένων τιμών εξαρτάται από τον μέσο όρο των (αρχικών τιμών των) στοιχείων. Χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία, μπορούμε με τη βοήθεια και μαθηματικών πακέτων να υπολογίσουμε τις τιμές αυτών των πινάκων για τις διάφορες τιμές της διάστασης N.

3.5.1.2. Δισδιάστατος ΔΜΣ

Στην περίπτωση που επιθυμούμε τον μετασχηματισμό πινάκων δύο διαστάσεων (όπως είναι η περίπτωση των δισδιάστατων εικόνων), η κατάσταση είναι διαφορετική σε σχέση με αυτή που περιγράφηκε παραπάνω, επειδή το αρχικό σήμα είναι δύο διαστάσεων.

Στις δύο διαστάσεις οι σχέσεις του μετασχηματισμού DCT είναι οι εξής:

$$y(p, q) = a(p) a(q) \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x(m, n) \cos \frac{\pi (2m-1)(p-1)}{2M} \cos \frac{\pi (2n-1)(q-1)}{2N} \quad \begin{matrix} p = 1, 2, \dots, M \\ q = 1, 2, \dots, N \end{matrix}$$

όπου:

$$a(p) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{M}}, & p = 1 \\ \sqrt{\frac{2}{M}}, & 2 \leq p \leq M \end{cases}$$

και

$$a(q) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N}}, & q = 1 \\ \sqrt{\frac{2}{N}}, & 2 \leq k \leq N \end{cases}$$

(5)

Όπως και στην περίπτωση του μονοδιάστατου μετασχηματισμού DCT ο υπολογισμός μπορεί να γίνει με πολλαπλασιασμό πινάκων.

3.5.2 Χρήση ΔΜΣ

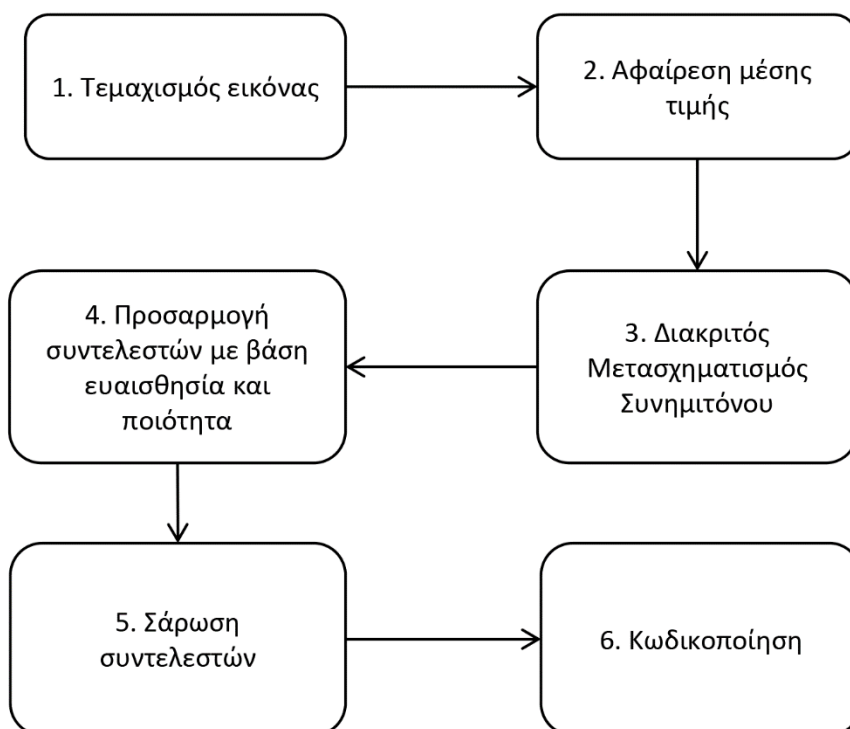
Τα βήματα τα οποία ακολουθούνται στην περίπτωση του JPEG και του MPEG περιλαμβάνουν τον τεμαχισμό της εικόνας σε μπλοκ, διαστάσεων συνήθως 8x8 εικονοστοιχείων, την αφαίρεση της μέσης τιμής (του 128 στην περίπτωση που ο κβαντισμός θα γίνει με τη βοήθεια 8 bits) και στη συνέχεια το μετασχηματισμό κατά Διακριτό Μετασχηματισμό Συνημιτόνου (ΔΜΣ). Όπως συζητήθηκε και παραπάνω, οι συντελεστές που προκύπτουν ανήκουν στο πεδίο της συχνότητας (αντιστοιχούν στις διάφορες χωρικές συχνότητες).

Κατόπιν ακολουθεί η προσαρμογή των συντελεστών με βάση την ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού, αλλά και του επιθυμητού επιπέδου ποιότητας. Έπειτα γίνεται η σάρωση των συντελεστών με τέτοιο τρόπο, ώστε να ομαδοποιούνται αποδοτικά οι μεγαλύτερες και οι μικρότερες τιμές. Η σάρωση αυτή γίνεται με την τεχνική του ζιγκ ζαγκ, αφού, όπως θα δούμε, οι μη μηδενικές (και εν γένει οι μεγαλύτερες τιμές) βρίσκονται στο άνω αριστερά τμήμα του πίνακα, ενώ οι μικρότερες τιμές βρίσκονται στο κάτω δεξιά τμήμα του πίνακα. Στο τέλος της διαδικασίας έχουμε τον κβαντισμό.

Τα βήματα που περιγράψαμε είναι τα εξής:

- τεμαχισμός εικόνας σε τμήματα (μπλοκ) 8x8
- αφαίρεση μέσης τιμής
- μετασχηματισμός κατά ΔΜΤ σε κάθε μπλοκ
- προσαρμογή συντελεστών με βάση την ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού αλλά και του επιθυμητού επιπέδου ποιότητας
- σάρωση συντελεστών με ομαδοποίηση τιμών
- κβαντισμός

Τα ανωτέρω βήματα και η διαδοχή που ακολουθούν περιγράφονται στην επόμενη εικόνα, όπου από τον τεμαχισμό της εικόνας σε τμήματα καταλήγουμε στον κβαντισμό αυτής.



Εικόνα 3.7 Χρήση του μετασχηματισμού DCT στο JPEG.

Σημειώνεται ότι η προσαρμογή των συντελεστών γίνεται με βάση έτοιμους τους πίνακες, προτυποποιημένους κατά το MPEG. Οι πίνακες αυτοί μπορούν να προσαρμοστούν ή να τροποποιηθούν από τους κωδικοποιητές. Η προσαρμογή πριν την κωδικοποίηση είναι προσαρμόσιμη στις εκάστοτε ανάγκες

(αναφορικά με την ποιότητα και τον βαθμό συμπίεσης). Ο αποκωδικοποιητής λαμβάνει πληροφορίες για αυτούς τους πίνακες καθώς αυτές μεταδίδονται.

Κάποιες παρατηρήσεις για τα αναμενόμενα αποτελέσματα του δισδιάστατου DCT:

- Το αποτέλεσμα του μετασχηματισμού και ο βαθμός συμπίεσης που επιτυγχάνεται εξαρτώνται από την οριζόντια, την κατακόρυφη και τη διαγώνια χωρική συχνότητα.
- Μια εικόνα με ένα μόνο χρώμα θα δίνει σαν αποτέλεσμα έναν πίνακα με μεγάλη τιμή για τον πρώτο όρο και μηδενικές για τις υπόλοιπες.
- Μια εικόνα με πολλές εναλλαγές θα δίνει πίνακα με διαφορετικές τιμές.

Στην επόμενη ενότητα συζητάμε τις πρακτικές και τις μεθόδους υπολογισμού του δισδιάστατου Διακριτού Μετασχηματισμού Συνημιτόνου με χρήση πινάκων.

3.5.2.1 Πρακτικές Υπολογισμού

Με αντίστοιχο σκεπτικό με το μονοδιάστατο DCT, στο δισδιάστατο αποδεικνύεται πως ο μετασχηματισμός DCT ενός πίνακα 8x8 ισοδυναμεί με τον πολλαπλασιασμό του αρχικού πίνακα από αριστερά με τον πίνακα των συντελεστών (των συναρτήσεων, δηλαδή, βάσης) έστω T και από δεξιά με τον αντίστροφο του T .

Αφού γίνει ο μετασχηματισμός, ακολουθεί η διαδικασία επιλογής των συντελεστών στο πεδίο της συχνότητας. Αυτό που θέλουμε να πετύχουμε είναι η μείωση του πλήθους των συντελεστών (με την ελάττωση των τιμών αυτών). Όπως συζητήθηκε και παραπάνω, αντί για έναν ομοιόμορφο κβαντισμό των συντελεστών στο πεδίο της συχνότητας, χρησιμοποιούνται προτυποποιημένοι από το JPEG πίνακες οι οποίοι βασίζονται σε πειράματα στο ανθρώπινο οπτικό σύστημα αναφορικά με την ευαισθησία του στις διάφορες χωρικές συχνότητες (οριζόντια και κατακόρυφα).

Ο πίνακας κλιμάκωσης για ποιότητα 50% (Q_{50}) είναι ο επόμενος:

16	11	10	16	24	40	51	61
12	12	14	19	26	58	60	55
14	13	16	24	40	57	69	56
14	17	22	29	51	87	80	62
14	17	22	29	40	57	69	56
14	17	22	29	51	87	80	62
18	22	37	56	68	109	103	77
24	35	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99

Πίνακας 3.3 Πίνακας κλιμάκωσης DCT για ποιότητα 50%.

Ο κβαντισμός επιτυγχάνεται διαιρώντας κάθε στοιχείο του πίνακα που προέκυψε από τον μετασχηματισμό με το αντίστοιχο στοιχείο του πίνακα κβαντοποίησης (Q_{50}). Δεδομένου ότι υπάρχουν διαφορετικές απαιτήσεις για τον κβαντισμό και τον συνακόλουθο βαθμό συμπίεσης, απαιτείται κάποιος μηχανισμός ώστε να μπορεί να προσαρμόζεται ο πίνακας προσαρμογής. Διακρίνουμε τις εξής δύο περιπτώσεις:

- Υψηλότερη ποιότητα, οπότε πρέπει να διατηρηθούν περισσότεροι συντελεστές και οι τιμές του πίνακα προσαρμογής του κβαντισμού πρέπει να μειωθούν.
- Χαμηλότερη ποιότητα, οπότε πρέπει να διατηρηθούν λιγότεροι συντελεστές και οι τιμές του πίνακα προσαρμογής του κβαντισμού πρέπει να αυξηθούν.

Στη συνέχεια επεξηγούμε δύο παραδείγματα προσαρμογής της ποιότητας αρχικά σε ανώτερο και στη συνέχεια σε χαμηλότερο επίπεδο.

3.5.2.2 Προσαρμογή Επιπέδου Ποιότητας

Για επιθυμητό επίπεδο ποιότητας ανώτερο του 50, ο πίνακας προσαρμογής της κβαντοποίησης προκύπτει πολλαπλασιάζοντας τον αρχικό πίνακα Q_{50} με έναν συντελεστή μικρότερο της μονάδας:

$$Q_{50} * \frac{100 - \text{ΕΕΠ}}{50} \quad (6)$$

Για επίπεδο ποιότητας κατώτερο του 50, ο πίνακας προσαρμογής του κβαντισμού προκύπτει πολλαπλασιάζοντας τον αρχικό πίνακα Q_{50} με συντελεστή μεγαλύτερο της μονάδας, ως εξής:

$$Q_{50} * \frac{50}{\text{ΕΕΠ}} \quad (7)$$

Όπου ΕΕΠ θεωρούμε το Επιθυμητό Επίπεδο Ποιότητας. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν οι επόμενοι πίνακες. Για τον πίνακα Q_{90} δηλαδή για ΕΕΠ=90, έχουμε τις τιμές οι οποίες παρουσιάζονται στον επόμενο Πίνακα 3.4:

3	2	2	3	5	8	10	12
2	2	3	4	5	12	12	11
3	3	3	5	8	11	14	11
3	3	4	6	10	17	16	12
4	4	7	11	14	22	21	15
5	7	11	13	16	12	23	18
10	13	16	17	21	24	24	21
14	18	19	20	22	20	20	20

Πίνακας 3.4 Πίνακας κβαντοποίησης DCT για ποιότητα 90%.

Για τον πίνακα Q_{10} δηλαδή για ΕΕΠ=10, έχουμε τις επόμενες τιμές:

80	60	50	80	120	200	255	255
55	60	70	95	130	255	255	255
70	65	80	120	200	255	255	255
70	85	110	145	255	255	255	255
90	110	185	255	255	255	255	255
120	175	255	255	255	255	255	255
245	255	255	255	255	255	255	255
255	255	255	255	255	255	255	255

Πίνακας 3.5 Πίνακας κβαντοποίησης DCT για ποιότητα 10%.

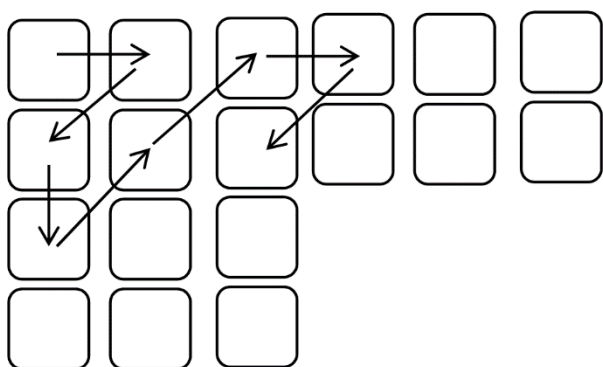
Στην περίπτωση της υποδειγματοληψίας χρώματος 4:2:0, τέσσερα μπλοκ διαστάσεων 8x8 με πληροφορία φωτεινότητας Y μαζί με ένα μπλοκ 8x8 με πληροφορία χρωμοδιαφορών Cb και Cr συνδυάζονται σε ένα μακρο-μπλοκ. Η προσαρμογή πριν τον κβαντισμό της φωτεινότητας και των χρωμοδιαφορών μπορεί να αλλάξει δυναμικά ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Στην περίπτωση των πλαισίων τύπου I όλα τα μακρο-μπλοκ κωδικοποιούνται με τον τρόπο που περιγράφεται. Στην περίπτωση πλαισίων τύπου P και B κωδικοποιούνται οι διαφορές των εικονοστοιχείων. Αυτό σημαίνει ότι το μακρο-μπλοκ από το αρχικό πλαίσιο χρειάζεται να μετατοπιστεί στην κατάλληλη θέση,

 [Παρατίθεται ένα επεξηγηματικό βίντεο στο πλαίσιο ενός παραδείγματος χρήσης του DCT στο Matlab.](#)

 [Επίσης παρατίθεται ένα επεξηγηματικό βίντεο στο πλαίσιο συμπίεσης μιας εικόνας και αξιολόγησης της ποιότητας της συμπίεσμένης έκδοσης.](#)

Προκειμένου να επιτευχθεί ομαδοποίηση των τιμών και κατά το δυνατόν συγκέντρωση των μηδενικών τιμών, η σάρωση γίνεται κατά ζιγκ ζαγκ, ξεκινώντας από το άνω αριστερά τμήμα και προχωρώντας προς τα δεξιά και κάτω. Η διαδικασία παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



Με βάση τα παραπάνω και τη δομή των πινάκων κλιμάκωσης των συντελεστών και προσαρμογής αναμένουμε συγκέντρωση των μεγαλύτερων συντελεστών στο πάνω αριστερά μέρος και των μηδενικών κάτω δεξιά. Έτσι, συγκεντρώνεται μαζί το μέγιστο πλήθος των μηδενικών, γεγονός το οποίο επιτρέπει πιο αποτελεσματική διαχείριση αυτών των τιμών.

Θεωρούμε το παρακάτω block μιας εικόνας. Οι τιμές των pixels (θεωρούμε τη φωτεινότητα) κυμαίνονται από 0 (μαύρο) έως 255 (άσπρο)

154	123	123	123	123	123	123	136
192	180	136	154	154	154	136	110
254	198	154	154	180	154	123	123
239	180	136	180	180	166	123	123
180	154	136	167	166	149	136	136
128	136	123	136	154	180	198	154
123	105	110	149	136	136	180	166
110	136	123	123	123	136	154	136

Αφαιρούμε την τιμή 128 από κάθε pixel, οπότε οι τιμές κυμαίνονται από -128 έως 127. Στη συνέχεια πραγματοποιούμε τον μετασχηματισμό DCT. Προκύπτει ο επόμενος πίνακας, έστω D:

162	41	20	72	30	12	-20	-11
30	108	20	32	28	-15	18	-2
-94	-60	12	-43	-31	6	-3	7
-39	-83	-5	-22	-13	15	-1	3
-31	18	-5	-12	14	-6	11	-6
-1	-12	13	0	28	13	8	3
5	-2	12	7	-19	-13	8	12
-10	11	8	-16	21	0	6	11

Πίνακας 3.7 Μετασχηματισμένες κατά DCT τιμές.

Παρατηρούμε ότι ο πίνακας D αποτελείται από 64 συντελεστές, με αυτούς στο πάνω αριστερά τμήμα να αντιστοιχούν στις χαμηλές συχνότητες. Πηγαίνοντας προς τα κάτω και δεξιά πηγαίνουμε προς τις πιο ψηλές συχνότητες. Κάνοντας κλιμάκωση των συντελεστών για ποιότητα 50 προκύπτει ο επόμενος πίνακας, έστω C:

10	4	2	5	1	0	0	0
3	9	1	2	1	0	0	0
-7	-5	1	-2	-1	0	0	0
-3	-5	0	-1	0	0	0	0
-2	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 3.8 Τιμές μετά την κλιμάκωση.

Από τον προκύπτοντα πίνακα μόνο οι μη μηδενικές συνιστώσες θα χρησιμοποιηθούν. Οι μη μηδενικές συνιστώσες παρατηρούμε να μαζεύονται στο πάνω αριστερά μέρος του πίνακα. Με τη μέθοδο σάρωσης κατά ζιγκ ζαγκ και με βάση το προηγούμενο σχήμα προκύπτουν οι εξής τιμές:

10, 4, 3, -7, 9, 2, 5, 1, -5, -3, -2, -5, 1, 2, 1, 0, 1, -2, 0, 1, 0, 0, 0, 0, -1, -1, 0, 0, ...0

Κατά τη διαδικασία αποκωδικοποίησης, ξαναδημιουργείται ο κβαντισμένος πίνακας. Κάθε στοιχείο αυτού του πίνακα πολλαπλασιάζεται με το αντίστοιχο στοιχείο του (προτυποποιημένου) πίνακα κβαντισμού και προκύπτει ο επόμενος πίνακας της αποκωδικοποίησης.

160	44	20	80	24	0	0	0
36	108	14	38	26	0	0	0
-98	-65	16	-48	-40	0	0	0
-42	-85	0	-29	0	0	0	0
-36	22	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 3.9 Τιμές μετά την αποκωδικοποίηση.

Στη συνέχεια εφαρμόζεται ο αντίστροφος DCT και γίνεται προσέγγιση του πλησιέστερου ακεραίου. Επίσης προστίθεται το 128 σε κάθε στοιχείο του προκύπτοντα πίνακα.

3.5.5 Κωδικοποίηση Μήκους Διαδρομής

Η Κωδικοποίηση Μήκους Διαδρομής (Run Length Encoding, RLE) στοχεύει σε μια αποτελεσματική από πλευράς συμπίεσης, περιγραφή αλληλουχίας δεδομένων στις οποίες κάποιες τιμές επαναλαμβάνονται

Η πληροφορία που δίνει τα χρώματα των εικονοστοιχείων είναι η ακόλουθη (για την πρώτη γραμμή της ακολουθίας):

Είναι ευνόητο ότι αντί να παρατίθενται τα στοιχεία ως έχουν, θα ήταν πιο αποδοτικό να χρησιμοποιηθούν τα πλήθη των σχετικών εμφανίσεων των συμβόλων. Έτσι οι αλγόριθμοι μήκους διαδρομής(RLE) προτείνουν τη γραφή του συμβόλου και του πλήθους εμφάνισης (με διάφορες παραλλαγές). Στην πιο απλή περίπτωση μπορούμε να έχουμε την εξής μορφή:

Παρατηρούμε ότι για να είναι αποδοτικός ο αλγόριθμος μήκους διαδρομής πρέπει να έχουμε συνεχόμενες ίδιες τιμές. Αν οι τιμές δεν είναι συνεχόμενες (έχουμε δηλαδή συναπτές αλλαγές), υπάρχει περίπτωση ο συνολικός όγκος να αυξηθεί. Μάλιστα στην περίπτωση που έχουμε συνεχείς εναλλαγές τιμών, ο όγκος των δεδομένων διπλασιάζεται (σε σχέση με τη μη χρήση του αλγορίθμου) με το απλό σενάριο που περιγράψαμε προηγουμένως.

Αρχική Σειρά Συμβόλων	Κωδικοποίηση
A	A
AA	AA
AAA	AAA
AAAA	A!0
AAAAA	A!1
AAAAAA	A!2

65

Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγουμε τη χρήση του αλγορίθμου σε περίπτωση συνεχών εναλλαγών.

3.6 Εκμετάλλευση Στατιστικού Πλεονασμού

Η εκμετάλλευση του στατιστικού πλεονασμού αποτελεί μια *μη απωλεστική* μέθοδο συμπίεσης δεδομένων. Αναπτύχθηκε το 1952 από τον David Huffman και η λογική αυτής της μεθόδου στηρίζεται στην εκμετάλλευση του γεγονότος ότι σε οποιοδήποτε αλφάβητο κάποια από τα σύμβολα εμφανίζονται πιο συχνά από κάποια άλλα. Αυτό σημαίνει ότι αν τα πιο συχνά εμφανιζόμενα σύμβολα κωδικοποιηθούν πιο αποδοτικά (με μικρότερες, δηλαδή, σε μήκος λέξεις κωδικοποίησης, όπου το μήκος μεταφράζεται στο πλήθος των bits που χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση της λέξης), αναμένουμε να έχουμε όφελος σε σχέση με την ομοιόμορφη κωδικοποίηση, η οποία κωδικοποιεί ομοιόμορφα (με ίδιου δηλαδή μήκους λέξεις κωδικοποίησης) όλα τα σύμβολα (χωρίς δηλαδή να λαμβάνει υπόψη τις στατιστικές ιδιότητες εμφάνισης των συμβόλων).

Ας δούμε όμως το σκεπτικό αυτό με μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Έστω ένα σύνολο από σύμβολα τα οποία αποτελούν ένα αλφάβητο. Επιθυμούμε να κωδικοποιήσουμε δυαδικά τα σύμβολα αυτά και στη συνέχεια εξετάζουμε αρχικά την ομοιόμορφη κωδικοποίηση και στη συνέχεια την πιο αποδοτική κωδικοποίηση Huffman.

3.6.1 Ομοιόμορφη Κωδικοποίηση

Ο πρώτος και πλέον βασικός τρόπος κωδικοποίησης είναι η χρήση της ομοιόμορφης κωδικοποίησης, η οποία περιλαμβάνει τα επόμενα βήματα:

- Με βάση το πλήθος των συμβόλων προς κωδικοποίηση, υπολογίζεται το πλήθος των bits που χρειαζόμαστε. Η σχέση υπολογισμού είναι $N \leq 2^n$, όπου N το πλήθος των συμβόλων προς κωδικοποίηση και n το πλήθος των bits που απαιτούνται για την κωδικοποίηση κάθε ενός από αυτά τα σύμβολα.
- Σε κάθε σύμβολο αντιστοιχίζεται ένας διαφορετικός συνδυασμός (όσον αφορά τις τιμές που αυτά έχουν 0 ή 1) από nbits.

Έτσι, για παράδειγμα, εάν επιθυμούμε κωδικοποίηση 6 συμβόλων, το πλήθος των bits που απαιτούνται είναι 3, αφού $2^2 < 6$ και $2^3 > 6$. Η ομοιόμορφη κωδικοποίηση θα μας έδινε τις εξής αντιστοιχίσεις:

Σύμβολα	Κωδικοποίηση
A	000
B	001
C	010
D	011
E	100
F	101

Πίνακας 3.11 Ομοιόμορφη κωδικοποίηση έξι συμβόλων.

3.6.2 Κωδικοποίηση Huffman

Σε κάποιες περιπτώσεις είναι δυνατόν να υπάρξει πληροφορία (ή εκτίμηση) για τη συχνότητα εμφάνισης των συμβόλων στις λέξεις που προέρχονται από το συγκεκριμένο αλφάβητο. Συγκεκριμένα, κάποια σύμβολα εμφανίζονται πιο συχνά από τα άλλα. Σε μια τέτοια περίπτωση ενδείκνυται η χρήση μικρότερων (σε μήκος) ακολουθιών για τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα σύμβολα. Αυτή ακριβώς τη γνώση για τη συχνότητα εμφάνισης των συμβόλων είναι που εκμεταλλεύεται ο αλγόριθμος Huffman, τον οποίο θα περιγράψουμε στη συνέχεια, αλλά και άλλοι συναφείς αλγόριθμοι.

Το πρόβλημα τίθεται ως εξής: Έστω τα k προς κωδικοποίηση σύμβολα (αλφάβητο)

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$$

Και έστω τα βάρη τα οποία αντιστοιχούν στα ανωτέρω σύμβολα, τα οποία αντιστοιχούν στην πιθανότητα εμφάνισης κάθε συμβόλου

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_k\},$$

Επιθυμούμε να υπολογίσουμε τις λέξεις κωδικοποίησης (τις ακολουθίες δηλαδή bits όπου κάθε ένα από αυτά έχει συγκεκριμένη τιμή)

$$C(A, W) = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}, \text{ αποτελούμενες από } N = \{n_1, n_2, \dots, n_k\} \text{ bits}$$

Οι λέξεις κωδικοποίησης αντιστοιχούν στα σύμβολα του συνόλου A και επιλέγονται έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το άθροισμα των γινόμενων του πλήθους των bits που χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση κάθε συμβόλου επί την πιθανότητα εμφάνισης του συμβόλου αυτού (το βάρος του). Επιθυμούμε, δηλαδή, να ελαχιστοποιηθεί το εξής άθροισμα:

$$\sum_{i=1}^k w_i n_i \quad (8)$$

Ο αλγόριθμος Huffman για την εύρεση της βέλτιστης κωδικοποίησης με τα παραπάνω δεδομένα βασίζεται στην κατασκευή του δυαδικού δένδρου Huffman, σύμφωνα με την επόμενη μεθοδολογία:

- Δημιουργούνται (απεικονίζονται) οι αρχικοί κόμβοι (που αποτελούν τα φύλλα του δένδρου) από τα προς κωδικοποίηση σύμβολα, όπου σε κάθε ένα από αυτά αναγράφεται το βάρος του (το οποίο αντιστοιχεί στην πιθανότητα εμφάνισής του). Για διευκόλυνση της δημιουργίας του δένδρου τα σύμβολα ενδείκνυται να γράφονται με αύξουσα ή φθίνουσα σειρά (όσον αφορά τα βάρη τους).
- Επιλέγοντας τους δύο κόμβους με τα μικρότερα βάρη, δημιουργείται ένα νέος εσωτερικός κόμβος, ο οποίος συνδέει (έχει, δηλαδή, σαν παιδιά του) τους δύο επιλεγμένους κόμβους. Το βάρος του νέου κόμβου προκύπτει από το άθροισμα των βαρών των δύο κόμβων από τους οποίους αυτός έχει προκύψει.
- Το βήμα (2) επαναλαμβάνεται μέχρι να εξαντληθούν όλοι οι κόμβοι (είτε φύλλα είτε σύνθετοι κόμβοι). Με την εξάντληση των κόμβων δημιουργείται τελικά η ρίζα του δένδρου που έχει βάρος το συνολικό άθροισμα των βαρών, δηλαδή μονάδα.
- Ξεκινώντας από τη ρίζα του δένδρου (τον τελευταίο κόμβο, δηλαδή, της προηγούμενης διαδικασίας) βρίσκουμε τις διαδρομές προς τα φύλλα και σε κάθε κλάδο τοποθετούμε το 0 ή το 1.
- Ακολουθώντας τις διαδρομές που σχηματίστηκαν στο προηγούμενο βήμα (βήμα 4) υπολογίζεται η κωδικοποίηση που αντιστοιχεί σε κάθε φύλλο (αρχικό, δηλαδή, σύμβολο), ως συνδυασμός των 0 και 1 που αντιστοιχούν στους ενδιάμεσους κλάδους (που συνθέτουν τη διαδρομή).

Κάποιες παρατηρήσεις από την κωδικοποίηση Huffman είναι οι εξής:

- Κάθε σύμβολο αντιστοιχεί σε μία μοναδική κωδικοποίηση.
- Η κωδικοποίηση οποιουδήποτε συμβόλου δεν είναι πρόθεμα της κωδικοποίησης κάποιου άλλου συμβόλου.

Ο αλγόριθμος Huffman συνεργάζεται αρμονικά με τις τεχνικές που συζητήσαμε στις προηγούμενες ενότητες. Συγκεκριμένα, αποτελεί το τελευταίο στάδιο της κωδικοποίησης / συμπίεσης των δεδομένων. Η διαδικασία συνοπτικά είναι η εξής:

- Αρχικά υπολογίζεται ο χωρικός πλεονασμός σε επίπεδο μακρο-μπλοκ. Η περιγραφή κάποιων εξ αυτών μπορεί να βασιστεί στις περιγραφές των προηγούμενων και για αυτόν τον λόγο δημιουργείται το διάνυσμα κίνησης.
- Στα υπόλοιπα μακρο-μπλοκ (των οποίων η περιγραφή δεν μπορεί να προκύψει από την περιγραφή των προηγούμενων) αλλά και για τις διαφορές του προβλεπόμενου μακρο-μπλοκ από το πραγματικό εφαρμόζεται ο Διακριτός Μετασχηματισμός Συνημιτόνου.
- Μετά την κβάντιση των συντελεστών του ΔΜΣ, γίνεται κωδικοποίηση μήκους διαδρομής.
- Στα αποτελέσματα της κβάντισης αλλά και στα διανύσματα κίνησης εφαρμόζεται ο αλγόριθμος Huffman.

Ας εξετάσουμε ένα παράδειγμα εφαρμογής του αλγορίθμου Huffman με χρήση έξι συμβόλων και των αντίστοιχων πιθανοτήτων εμφάνισης.

3.6.3 Παράδειγμα

Έστω τα 6 σύμβολα που είχαμε εξετάσει στο παράδειγμα της ομοιόμορφης κωδικοποίησης, με δεδομένο το πλήθος των εμφανίσεών τους. Από το πλήθος των εμφανίσεων κάθε συμβόλου και το συνολικό πλήθος των εμφανίσεων προκύπτει η αντίστοιχη πιθανότητα εμφάνισης.

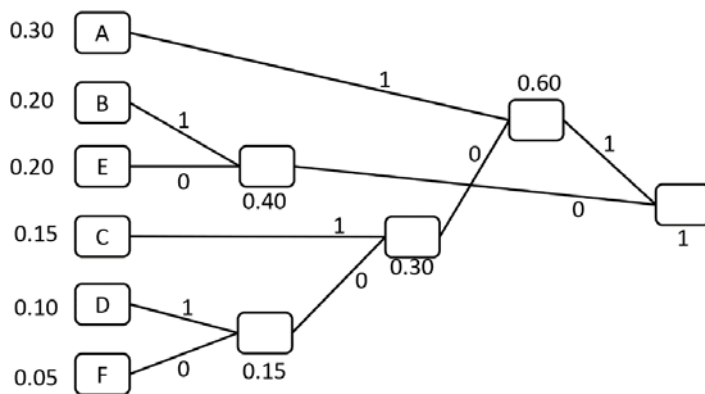
Σύμβολα	Πλήθος εμφανίσεων	Πιθανότητα Εμφάνισης
A	6	0,3
B	4	0,2
C	3	0,15
D	2	0,1
E	4	0,2
F	1	0,05
Άθροισμα πιθανοτήτων εμφάνισης:		1

Πίνακας 3.12 Σύμβολα προς κωδικοποίηση, πλήθος εμφανίσεων και πιθανότητες εμφάνισης.

Με χρήση του αλγορίθμου Huffman, που περιγράφηκε προηγουμένως, δημιουργείται το επόμενο δένδρο. Τα βήματα κατά σειρά είναι τα επόμενα:

- Τοποθετούνται τα σύμβολα, με φθίνουσα σειρά αναφορικά με τις τιμές των βαρών τους.
- Τα σύμβολα F και D έχοντας τα μικρότερα βάρη συνδυάζονται και δίνουν έναν κόμβο με βάρος $0.05+0.10=0.15$
- Ο κόμβος που δημιουργήθηκε, με βάρος 0.15 και ο κόμβος C (επίσης με βάρος 0.15) συνδυάζονται και δίνουν τον κόμβο με βάρος 0.30.
- Συνδυάζονται οι κόμβοι B και E με βάρη 0.20 ώστε να δώσουν τον κόμβο με βάρος 0.40.
- Ο κόμβος A και ο κόμβος που δημιουργήθηκε προηγουμένως με βάρος 0.30 συνδυάζονται ώστε να δώσουν τον κόμβο με βάρος 0.60.
- Οι δύο εναπομείναντες κόμβοι με βάρη 0.40 και 0.60, αντίστοιχα, συνδυάζονται ώστε να δώσουν τη ρίζα του δένδρου, με βάρος 1.

Από την παραπάνω αλληλουχία κινήσεων προκύπτει το δένδρο Huffman το οποίο απεικονίζεται στην επόμενη εικόνα 3.9.



Εικόνα 3.10 Δημιουργία δένδρου Huffman.

Μετά τη δημιουργία του δένδρου αντιστοιχούμε τους κλάδους στα 0 και 1 (ο άνω κλάδος κάθε κόμβου έχει αντιστοιχηθεί στο 1 και ο κάτω κλάδος στο 0). Με βάση τις διαδρομές από τη ρίζα του δένδρου προς κάθε φύλλο, δημιουργείται ο επόμενος πίνακας των κωδικοποιήσεων.

Σύμβολα	Κωδικοποίηση
A	11
B	01
C	101
D	1001
E	00
F	1000

Πίνακας 3.13 Σύμβολα και κωδικοποιήσεις.

Για την επιβεβαίωση της αποδοτικότητας του αλγορίθμου, ας προβούμε σε σύγκριση της απόδοσης του σε σχέση με την απόδοση της ομοιόμορφης κωδικοποίησης.

Απόδοση κωδικοποίησης Huffman:

$$\sum_{i=1}^k w_i n_i = 0.3*2 + 0.2*2 + 0.15*3 + 0.10*4 + 0.20*2 + 0.05*4 = 2.45$$

Απόδοση ομοιόμορφης κωδικοποίησης:

$$\sum_{i=1}^k w_i n_i = 3*1 = 3$$

Προκύπτει λοιπόν ότι, στο συγκεκριμένο παράδειγμα, η κωδικοποίηση Huffman είναι πιο αποδοτική από την ομοιόμορφη κωδικοποίηση κατά περίπου 22%, αφού κάθε σύμβολο στην κωδικοποίηση Huffman κωδικοποιείται με 2.45 bits, ενώ στην ομοιόμορφη με 3 bits.



[Παρατίθεται ένα εκπαιδευτικό βίντεο για την κωδικοποίηση Huffman.](#)



[Επίσης παρατίθεται ένα επεξηγηματικό βίντεο της κωδικοποίησης του Huffman στο πλαίσιο ενός παραδείγματος με χρήση του Matlab.](#)

3.7 Προφίλ και Επίπεδα

Με τη χρήση των μεθόδων που αναφέραμε για τη μείωση του πλεονασμού, καθώς και κάποιας πληροφορίας η παράλειψη της οποίας δεν είναι τόσο σημαντική από την άποψη της ποιότητας, ο ρυθμός του βίντεο είναι δυνατό να μειωθεί από τα 270 Mbps (με 4:2:2 χρωματική υποδειγματοληψία) στα 2 Mbps μέχρι και τα 6 Mbps. Το πιο σημαντικό βήμα στη διαδικασία της συμπίεσης είναι ο περιορισμός του χρονικού πλεονασμού σε συνδυασμό με τον χωρικό πλεονασμό και την εφαρμογή του ΔΜΣ, καθώς επίσης και η περαιτέρω υποδειγματοληψία του χρώματος (με χρήση του μηχανισμού 4:2:0).

Από τα παραπάνω μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι το επίπεδο συμπίεσης δεν είναι σταθερό αλλά εξαρτάται από παραμέτρους τις οποίες μπορεί κάποιος να επιλέξει και να αλλάξει. Για το σκοπό αυτό το MPEG έχει δημιουργήσει μια σειρά από επίπεδα (level) και προφίλ (profile) με τα οποία ομαδοποιεί τις επιλογές αυτές. Στη συνέχεια αναφέρουμε κάποια από τα πιο συνηθισμένα:

- Η τυπική ευκρίνεια με χρήση του προτύπου (4:2:0) ονομάζεται κύριο προφίλ του κύριου επιπέδου Main Profile@Main Level
- Η τυπική ευκρίνεια με χρήση του (4:2:2) ονομάζεται υψηλό προφίλ του κύριου επιπέδου High Profile@Main Level
- Η υψηλή ευκρίνεια με χρήση του 4:2:0 αντιστοιχεί στο κύριο προφίλ του υψηλού επιπέδου Main Profile@High Level
- Η υψηλή ευκρίνεια με χρήση του 4:2:2 signal είναι το υψηλό προφίλ στο υψηλό επίπεδο High Profile@High Level).

Όπως συζητήθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο ρυθμός του σήματος στην υψηλή ανάλυση ξεπερνάει αρχικά τα 800 Mbps. Αυτή η τιμή υπερβαίνει κατά πολύ τον ρυθμό της τυπικής ανάλυσης. Το επίπεδο του σήματος στα 6 Mbps τυπικής ανάλυσης με χρήση της μορφής 4:2:0 αντιστοιχεί στο επίπεδο ποιότητας της αναλογικής τηλεόρασης. Οι ρυθμοί, όπως αναφέραμε, κυμαίνονται από 2 σε 6 Mbps και καθορίζουν την ποιότητα.

Ο ρυθμός στη ροή του βίντεο είναι δυνατόν να διαφοροποιείται δυναμικά, με την πάροδο, δηλαδή, του χρόνου ή να παραμένει σταθερός. Οι αλλαγές στον ρυθμό εξαρτώνται από τις επιλογές των παραμέτρων κβαντισμού. Οι τυπικές επιλογές οι οποίες και καθορίζουν τα προφίλ και τα επίπεδα περιλαμβάνουν τους τύπους κωδικοποίησης της εικόνας, το επίπεδο της υποδειγματοληψίας χρώματος, την αναλογία της εικόνας, την κλιμάκωση και την ακρίβεια αναφορικά με το ΔΜΣ.

Οι βασικές επιλογές και οι αντίστοιχες τιμές παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Συν/ση	Ονομασία	Τύποι κωδικ/σης εικόνας	Υποδειγμ/ψία Χρώματος	Αναλογία Εικόνας	Κλιμάκωση	Ακρίβεια DCT
SP	Simple Profile	I, P	4:2:0	Τετράγωνα εικονοστοιχεία 4:3 ή 16:9	Όχι	8, 9, 10
MP	Main Profile	I, P, B	4:2:0	Τετράγωνα εικονοστοιχεία 4:3 ή 16:9	Όχι	8, 9, 10
SNR	SNR Scalable Profile	I, P, B	4:2:0	Τετράγωνα εικονοστοιχεία 4:3 ή 16:9	Κλιμάκωση κατά SNR	8, 9, 10
Spatial	Spatially Scalable Profile	I, P, B	4:2:0	Τετράγωνα εικονοστοιχεία 4:3 ή 16:9	Χωρική κλιμάκωση και κλιμάκωση κατά SNR	8, 9, 10
HP	HP Profile	I, P, B	4:2:2 ή 4:2:0	Τετράγωνα εικονοστοιχεία 4:3 ή 16:9	Όχι	8, 9, 10, 11
422	4:2:2 Profile	I, P, B	4:2:2 ή 4:2:0	Τετράγωνα εικονοστοιχεία 4:3 ή 16:9	Χωρική κλιμάκωση και κλιμάκωση	8, 9, 10, 11

					κατά SNR	
MVP	Multi View Profile	I, P, B	4:2:0	Τετράγωνα εικονοστοιχεία 4:3 ή 16:9	Χρονική κλιμάκωση	8, 9, 10

Πίνακας 3.14 Προφίλ κατά το MPEG2.

Η ανάγκη για κλιμάκωση στην ποιότητα της κωδικοποίησης προκύπτει από τις διαφορετικές δυνατότητες στα υποκείμενα δίκτυα και θα την εξετάσουμε σε μεγαλύτερη ανάλυση στο κεφάλαιο που ασχολείται με τη διαδικτυακή τεχνολογία (δηλαδή το IPTV).

Η κλιμάκωση έχει ως στόχο να παρέχει αρχικά μια κωδικοποίηση του βίντεο με χαμηλή σχετικά ποιότητα (βασική κωδικοποίηση) η οποία έχει περιορισμένες απαιτήσεις αναφορικά με το εύρος ζώνης. Επιπλέον παρέχεται ένα δεύτερο επίπεδο με καλύτερη ποιότητα, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επαύξηση της ποιότητας επί της βασικής κωδικοποίησης (οπότε προκύπτει η ενισχυμένη κωδικοποίηση), εφόσον οι επιπλέον απαιτήσεις στο εύρος ζώνης μπορούν να καλυφθούν.

Στο πρότυπο MPEG2 η κλιμάκωση θεωρείται σε τρία επίπεδα τα οποία είναι:

- Σηματοθορυβικό (Signal to Noise Ratio, SNR) επίπεδο, το οποίο παρέχει σταδιακή αναβάθμιση ή υποβάθμιση της ποιότητας του κωδικοποιημένου βίντεο (με αλλαγές της κλιμάκωσης των τιμών των συντελεστών στο μετασχηματισμό DCT και του πλήθους των συντελεστών που λαμβάνονται υπ' όψιν). Στη βασική έκδοση με τη χαμηλή ποιότητα κβαντίζονται οι συντελεστές DCT με χαμηλή ανάλυση. Για επαύξηση της ποιότητας υπολογίζονται οι διαφορές των συντελεστών DCT από τους κβαντισμένους και κβαντίζονται οι διαφορές. Η βασική και η ενισχυμένη κωδικοποίηση αντιστοιχούν στην ίδια χωρική ανάλυση του βίντεο (διαστάσεις).
- Χωρικό (spatial) επίπεδο, το οποίο στοχεύει στην υποστήριξη διαφορετικών συσκευών με διαφορετικές αναλύσεις. Στην περίπτωση αυτή μπορεί, για παράδειγμα, η βασική κωδικοποίηση να γίνει με βάση την τυπική ανάλυση ενώ η ενισχυμένη κωδικοποίηση να γίνει με βάση την υψηλή ανάλυση (SDTV και HDTV αντίστοιχα).
- Χρονικό (temporal) επίπεδο, το οποίο στοχεύει στην κλιμάκωση με στόχο την υποστήριξη διαφορετικών ρυθμών ανανέωσης πλαισίων. Αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί κυρίως σε ασύρματους διαύλους επικοινωνίας, όπου λόγω φτωχής κάλυψης είναι δυνατόν να μην αποστέλλονται κάποια από τα πλαίσια.

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε τα επίπεδα όπως αυτά ορίζονται στο MPEG2. Τα επίπεδα λειτουργούν βοηθητικά με τον ορισμό των προφίλ.

Συν/ση	Ονομασία	Ρυθμός Ανανέωσης Πλαισίων	Μέγιστη Οριζόντια Ανάλυση	Μέγιστη Κατακόρυφη Ανάλυση	Μέγιστο πλήθος Δειγμάτων Φωτεινότητας ανά δευτερόλεπτο	Μέγιστος Ρυθμός (σε κύριο προφίλ) σε Mbps
LL	Low Level	23.976, 24, 25, 29.97, 30	352	288	3.041.280	4
ML	Main Level	23.976, 24, 25, 29.97, 30	720	576	10.368.000, εκτός από το Highprofile όπου ο περιορισμός γίνεται 14.475.600 για 4:2:0 και 11.059.200 για 4:2:2	15
H-14	High 1440	23.976, 24, 25, 29.97, 30, 50, 59.94, 60	1440	1152	47.001.600 εκτός από το High profile με 4:2:0 όπου είναι 62.668.800	60
HL	High Level	23.976, 24, 25, 29.97, 30, 50, 59.94, 60	1920	1152	62.668.800 εκτός από το High profile με 4:2:0 όπου είναι 83.558.400	80

Πίνακας 3.15 Επίπεδα κατά το MPEG2.

Οι πλέον συνηθισμένοι συνδυασμοί προφίλ και επιπέδου περιλαμβάνουν τους επόμενους: MP@ML, 720x480, 30, 4:2:0, 4 Mbps ψηφιακή τηλεόραση τυπικής ανάλυσης, MP@ML, 720x576, 25, 4:2:0, 4 Mbps ψηφιακή τηλεόραση τυπικής ανάλυσης, MP@HL, 1920x1080, 30, 4:2:0, 80 Mbps, ψηφιακή τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας και MP@HL, 1920x720, 60, 4:2:0, 80 Mbps, ψηφιακή τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

21. International Telecommunication Union, BT.601. *Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide screen 16:9 aspect ratios*. International Telecommunication Union, 2011.
22. International Standards Organization / International Electrotechnical Commission. *Information technology — Generic coding of moving pictures and associated audio information: Systems*, International Standards Organization / International Electrotechnical Commission ISO/IEC, 13818-1, 2001.
23. International Standards Organization / International Electrotechnical Commission. *Information technology — Generic coding of moving pictures and associated audio information: Video*, International Standards Organization / International Electrotechnical Commission ISO/IEC, 13818-2, 2000.
24. International Telecommunication Union. *H.264: Advanced video coding for generic audiovisual services*. International Telecommunication Union, 2008
25. International Telecommunication Union, Information Technology. *Digital Compression and Coding of continuous – tone still images. Requirements and Guidelines, Recommendation T.81*. International Telecommunication Union, 1992.
26. Fr. Halsall. *Multimedia Communications: Applications, Networks, Protocols and Standards*. Addison-Wesley, 2001.
27. J. Arnold, M. Frater, M. Pickering. *Digital Television Technology and Standards*. Wiley Interscience, 2007.

Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1

Υπολογίστε τις δύο πρώτες τιμές του διακριτού μετασχηματισμού συνημιτόνου για το επόμενο σήμα:

$$x(n)=[1 \ 2 \ 3 \ 4]$$

Απάντηση/Λύση

Χρησιμοποιούμε τον τύπο του ΔΜΣ ως εξής:

$$y(1) = 0.5 * (1+2+3+4) = 5$$
$$y(2) = 0.707 * (1*\cos(\pi/8) + 2*\cos(3\pi/8) + 3*\cos(5\pi/8) + 4*\cos(7\pi/8)) = -2.23$$

Κάνοντας τις αντίστοιχες πράξεις μπορούμε να δείξουμε ότι

$$y(3) = 0 \text{ και}$$
$$y(4) = -0.16$$

Κριτήριο αξιολόγησης 2

Μια ψηφιακή εικόνα αποχρώσεων του γκρι αναπαρίσταται όπως στον επόμενο πίνακα. Υπολογίστε τον πίνακα ιστογράμματος, την κωδικοποίηση Huffman και τα αντίστοιχα σύμβολα κωδικοποίησης ώστε να αποστείλουμε το περιεχόμενο της εικόνας.

20	30	50	30	20
50	30	30	50	20
20	30	50	20	100
150	200	150	20	200

Πίνακας 3.16 Σύμβολα και κωδικοποιήσεις.

Απάντηση/Λύση

Ο πίνακας ιστογράμματος καθώς και οι πιθανότητες εμφάνισης είναι ως εξής:

Σύμβολο	Πλήθος Εμφανίσεων	Πιθανότητα
20	6	0,3
30	5	0,25
50	4	0,2
100	1	0,05
150	2	0,1
200	2	0,1

Πίνακας 3.17 Πίνακας ιστογράμματος.

Αφού σχηματιστεί το δένδρο Huffman προκύπτουν οι επόμενες ακολουθίες bits για κάθε απόχρωση:

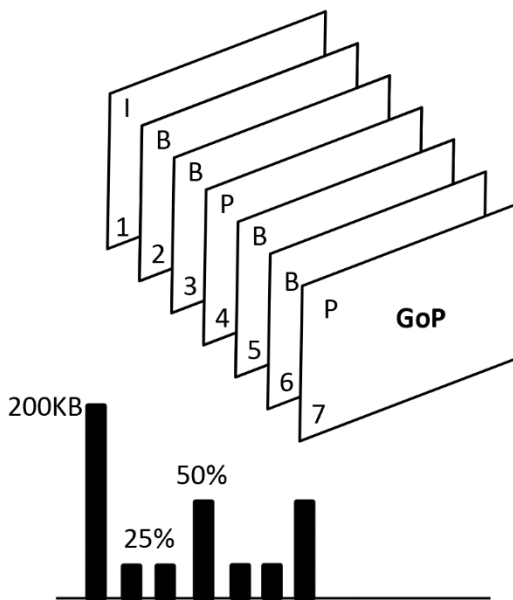
Σύμβολο	Λέξη Κωδικοποίησης
20	11
30	10
50	00
100	0110
150	010
200	0111

Πίνακας 3.18 Πίνακας κωδικοποιήσεων.

Κριτήριο αξιολόγησης 3

Όπως εμφανίζεται στην εικόνα το μέγεθος ενός πλαισίου που κωδικοποιείται ως I είναι το μεγαλύτερο σε σχέση με τα μεγέθη των P και B. Το μέγεθος του πλαισίου τύπου P μπορεί να είναι στο ήμισυ αυτού του I, ενώ του B δύναται να φτάσει και στο 25%. Αυτές, βέβαια, είναι ενδεικτικές τιμές αφού οι αναλογίες είναι εν γένει παραμετροποιήσιμες.

Υπολογίστε τη συμπίεση που επιτυγχάνουμε με την κωδικοποίηση των πλαισίων σε τύπους P και B (πέρα από το βασικό τύπου του I), με τη βοήθεια της αλληλουχίας πλαισίων που παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 3.11 Μεγέθη πλαισίων εντός GoP.

Απάντηση/Λύση

Παρατηρούμε ότι από την αλληλουχία πλαισίων έχουμε 1 πλαίσιο τύπου I, 2 πλαίσια τύπου P και 4 πλαίσια τύπου B. Κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις:

- Εάν δεν είχαμε κωδικοποίηση χρονικού πλεονασμού θα είχαμε 7 πλαίσια τύπου I, άρα το σχετικό μέγεθος θα ήταν $7 \cdot I$.
- Στην περίπτωση της ομάδας πλαισίων του σχήματος το μέγεθος υπολογίζεται από το άθροισμα των ποσοστών με βάση τη σύνθεση της ομάδας.

Το άθροισμα αυτό είναι το εξής:

$$I + 2 \cdot 0.5 \cdot I + 4 \cdot 0.25 \cdot I = 3 \cdot I$$

Προκύπτει, λοιπόν, ότι από τα $7 \cdot I$ πάμε στα $3 \cdot I$ άρα επιτυγχάνουμε συμπίεση 7 προς 3 (2.3 προς 1).

Κεφάλαιο 4 – Συμπίεση Ήχου

Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε τα θέματα που αφορούν τη συμπίεση και την κωδικοποίηση του ήχου. Το σήμα του ήχου αποτελεί ένα απαραίτητο τμήμα του τηλεοπτικού σήματος. Όπως θα δούμε, η συμπίεση του ήχου είναι σε μεγάλο βαθμό εφικτή με την εκμετάλλευση ιδιοτήτων της ανθρώπινης ακοής και συγκεκριμένα των ψυχοακουστικών χαρακτηριστικών.

Τα ψυχοακουστικά χαρακτηριστικά εστιάζουν κυρίως στην επικάλυψη ορισμένων ήχων από άλλους οι οποίοι είναι κοντινοί είτε από πλευράς συχνότητας είτε χρονικά.

Προαπαιτούμενη γνώση

Σε μεγάλο βαθμό το συγκεκριμένο Κεφάλαιο είναι αυτόνομο. Παρ' όλα αυτά οι μέθοδοι συμπίεσης και κωδικοποίησης του ήχου έχουν συνάφεια με τη συμπίεση και την κωδικοποίηση του βίντεο, οπότε ενδείκνυται η κατανόηση των εννοιών αυτών αλλά και εν γένει της ανάγκης για συμπίεση.

Ενδείκνυται, επίσης, η γνώση της γενικής εικόνας του συστήματος και των επιμέρους βαθμίδων που το αποτελούν τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη, ώστε να γίνει αντιληπτή η σημασία της λειτουργικότητας που περιγράφουμε σε αυτό το κεφάλαιο.

4.1 Εισαγωγή

Το ανθρώπινο αυτί έχει δυναμικό εύρος ακοής περί τα 140 dB και μπορεί να ακούει σε ένα εύρος ζώνης από τις πολύ χαμηλές συχνότητες (κάποιες δεκάδες Hz) μέχρι περίπου τα 15 KHz με 20 kHz. Τα συστήματα ήχου στα τηλεοπτικά συστήματα πρέπει να καλύπτουν αυτές τις απαιτήσεις. Όπως θα δούμε, το σήμα του ήχου έχει σημαντικές απαιτήσεις αναφορικά με το εύρος ζώνης (αν και όχι τόσο μεγάλες όσο το σήμα του βίντεο), οπότε και για το σήμα του ήχου απαιτείται συμπίεση και κωδικοποίηση.

Η συμπίεση, αντίστοιχα με τη λογική που ακολουθήθηκε στην περίπτωση του βίντεο, στηρίζεται στην αφαίρεση (α) της πλεονάζουσας πληροφορίας και (β) της πληροφορίας η οποία δεν είναι μεν πλεονάζουσα αλλά η απώλειά της δεν γίνεται εύκολα αντιληπτή από τον χρήστη (δεν είναι, δηλαδή, τόσο σημαντική στην αντιλαμβανόμενη ποιότητα του ήχου). Έχουμε, δηλαδή, και στην περίπτωση αυτή τόσο μη απωλεστική όσο και απωλεστική συμπίεση.

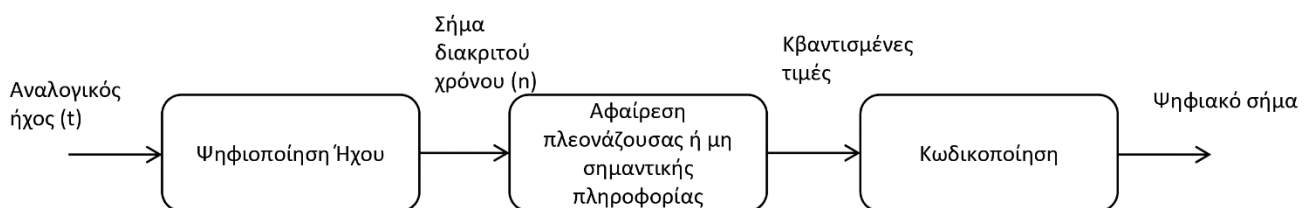
Οι μέθοδοι συμπίεσης στηρίζονται στο ψυχοακουστικό μοντέλο, το οποίο αξιοποιεί κάποια βασικά χαρακτηριστικά του ανθρώπινου αυτιού, αναφορικά με την ακοή. Το πιο σημαντικό ίσως από αυτά είναι η *κάλυψη* (masking) η οποία συμβαίνει στο πεδίο του χρόνου αλλά και στο πεδίο της συχνότητας. Πιο συγκεκριμένα:

- Κάλυψη στο πεδίο του χρόνου έχουμε όταν ένας ήχος είναι πολύ κοντινός χρονικά σε κάποιον άλλο (δηλαδή το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ αυτών είναι πολύ περιορισμένο). Σε αυτήν την περίπτωση ο μεταγενέστερος ήχος, υπό ορισμένες συνθήκες, δεν θα γίνει αντιληπτός, θα επικαλυφθεί δηλαδή από αυτόν που προηγήθηκε χρονικά.
- Κάλυψη στο πεδίο της συχνότητας έχουμε στην περίπτωση που δύο ήχοι γειτνιάζουν στο πεδίο της συχνότητας (τα φάσματά τους, δηλαδή, έχουν πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο ένας (αυτός που έχει την υψηλότερη ένταση) να επισκιάζει τον άλλο. Για την πρακτική εκμετάλλευση αυτού του χαρακτηριστικού, το φασματικό περιεχόμενο του ήχου χωρίζεται σε μπάντες και εξετάζεται η επίδραση που μπορεί να έχει καθεμία από αυτές στις υπόλοιπες. Για την πιο εύκολη διαχείριση του φάσματος, όπως θα δούμε στη συνέχεια, το φάσμα χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα της κάθε μπάντας (τις οποίες ονομάζουμε υπομπάντες) το πλήθος των οποίων είναι 32.

Παράλληλα, και στην περίπτωση του ηχητικού σήματος (όπως και σε αυτή του σήματος βίντεο), είναι δυνατή η χρήση του Διακριτού Μετασχηματισμού Συνημιτόνου (Discrete Cosine Transform) με στόχο την περαιτέρω συμπίεση. Στην περίπτωση αυτή έχουμε τον Τροποποιημένο Διακριτό Μετασχηματισμό Συνημιτόνου (Modified Discrete Cosine Transform), ο οποίος, όπως θα δούμε παρακάτω, έχεις κάποιες διαφοροποιήσεις στη διαχείριση των άκρων των διαστημάτων όπου εφαρμόζεται.

Τα βασικά σημεία τα οποία θα ακολουθήσουμε σε αυτό το κεφάλαιο και συνθέτουν τη δομή του κεφαλαίου, είναι η ψηφιοποίηση του ήχου (δειγματοληψία και κβαντισμός), η αφαίρεση της πλεονάζουσας ή της μη σημαντικής (όσον αφορά την ποιότητα) πληροφορίας και στη συνέχεια η κωδικοποίηση του ηχητικού σήματος.

Τα βήματα αυτά παρίστανται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 4.1 Δημιουργία ψηφιακού ήχου.

Αναφορικά με τα πρότυπα τα οποία χρησιμοποιούνται, βασικό ρόλο, όπως και στο βίντεο, παίζει το MPEG (Motion Pictures Experts Group) και μάλιστα το τρίτο κάθε φορά τμήμα του εκάστοτε προτύπου (part 3), το οποίο ασχολείται με τα θέματα του ήχου.

Συγκεκριμένα, το MPEG-1 audio αποτελείται από τρία επίπεδα (layers) I, II και III. Το επίπεδο III δίνει το γνωστό πρότυπο mp3 (MPEG-1, layerIII). Το MPEG-2 υιοθέτησε τα τρία επίπεδα του MPEG-1 όσον αφορά τον ήχο και το επίπεδο II επεκτάθηκε για να δημιουργήσει το επίπεδο IMC (multichannel). Υπάρχει επίσης το MPEG-2 AACISO/IEC 13818-7 (όπου το ακρωνύμιο AAC προέρχεται από το Advanced Audio Coding) και τα συστήματα ήχου του MPEG-4 ISO/IEC 14496-3 AAC και AACPlus (28, 29, 30, 31).

Παράλληλα με το κομμάτι του ήχου του MPEG, δημιουργήθηκε και το πρότυπο Dolby digital audio (AC-3 audio) από τα Dolby Labs στις ΗΠΑ. Το πρότυπο τέθηκε σε ισχύ το 1990 και διατέθηκε μέσω κυρίως κινηματογραφικών προβολών (το πρότυπο αυτό χρησιμοποιείται και σήμερα στον κινηματογράφο). Η επίγεια ψηφιακή τηλεόραση κυρίως στις ΗΠΑ χρησιμοποιεί σχεδόν εξολοκλήρου το πρότυπο AC-3 για την κωδικοποίηση του ήχου (32).

Από πλευράς ποιότητας, οι δύο βασικές κωδικοποιήσεις (του MPEG και των Dolby Labs) θεωρούνται πλέον ισοδύναμες. Όσον αφορά την υποστήριξη από το υλικό, εν γένει οι αποκωδικοποιητές υποστηρίζουν και τις δύο κωδικοποιήσεις. Στην ενότητα αυτή θα ασχοληθούμε κυρίως με το MPEG το οποίο είναι και το πρότυπο (οικογένεια προτύπων) και χρησιμοποιείται κυρίως στην Ευρώπη.



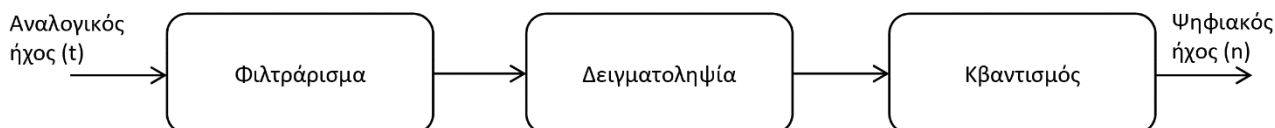
[Παρατίθεται εισαγωγικό, εκπαιδευτικό υλικό για την ψηφιοποίηση του ήχου.](#)

Στις επόμενες ενότητες καταπιανόμαστε με τα επιμέρους στάδια επεξεργασίας του ήχου που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

4.2 Ψηφιοποίηση του Ήχου

4.2.1 Βασικά Στάδια Ψηφιοποίησης

Το πρώτο στάδιο της επεξεργασίας του ήχου είναι η δειγματοληψία και η ψηφιοποίηση. Τα βασικά βήματα της ψηφιοποίησης του ήχου απεικονίζονται στο επόμενο σχήμα:



Εικόνα 4.2 Τα βασικά στάδια της ψηφιοποίησης του ήχου.

Αρχικά, το αναλογικό σήμα περιορίζεται, όσον αφορά το εύρος ζώνης του, με χρήση ενός Φίλτρου Χαμηλών Συχνοτήτων (ΦΧΣ). Το ΦΧΣ, όπως είναι γνωστό, επιτρέπει τη διέλευση των χαμηλών συχνοτήτων μέχρι κάποια συγκεκριμένη συχνότητα, τη συχνότητα αποκοπής, η οποία αποτελεί και βασικό χαρακτηριστικό του φίλτρου. Στην περίπτωση του τηλεοπτικού σήματος η συχνότητα αποκοπής βρίσκεται στο διάστημα από 15 KHz έως και 20 KHz. Η τιμή των 20 KHz προκύπτει από το άνω όριο των συχνοτήτων που είναι (θεωρητικά) σε θέση να ακούει το ανθρώπινο αυτί.

Στη συνέχεια γίνεται η μετατροπή του σήματος από σήμα συνεχούς χρόνου (στον συνεχή χρόνο θεωρούμε τη συνεχή ανεξάρτητη μεταβλητή t) σε σήμα διακριτού χρόνου (στο διακριτό χρόνο θεωρούμε τη διακριτή μεταβλητή n , η οποία παίρνει ακέραιες τιμές) με συχνότητα δειγματοληψίας η οποία τυπικά μπορεί να παίρνει τις εξής τιμές: 32 kHz, 44.1 kHz, 48 ή και 96 kHz.

Η δειγματοληψία στα 44.1 KHz αντιστοιχεί στην ποιότητα του CD, ενώ η δειγματοληψία στα 48 KHz ή τα 96 KHz δίνουν ποιότητα αντίστοιχη αυτής του τηλεοπτικού στούντιο. Η συχνότητα δειγματοληψίας στα 32 KHz (και χαμηλότερη) δεν θεωρείται πλέον επαρκής αλλά εξακολουθεί να διατηρείται για συμβατότητα με το πρότυπο του MPEG.

Μετά τη δειγματοληψία γίνεται ο κβαντισμός των τιμών των δειγμάτων, η διακριτοποίηση δηλαδή αυτών, με την αντιστοίχιση των συνεχών τιμών σε διακριτές στάθμες. Η ποιότητα του κβαντισμού εξαρτάται από το πλήθος των bits που χρησιμοποιούνται για την αποτύπωση των τιμών (για τον ορισμό, δηλαδή, των επιπέδων που χρησιμοποιούνται). Το πλήθος των bits, έστω N , δίνει το πλήθος με τις στάθμες κβαντισμού 2^N . Ο κβαντισμός γίνεται με χρήση κατ' ελάχιστον 16 bits, γεγονός το οποίο δημιουργεί 2^{16} στάθμες τιμών.

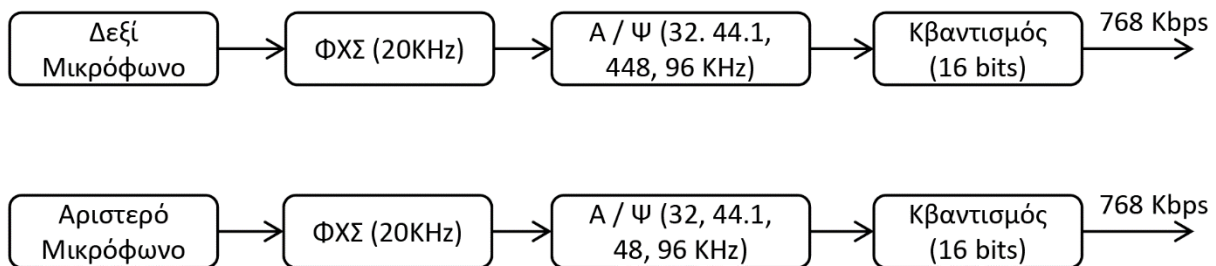
Ας υπολογίσουμε τον ρυθμό δεδομένων, C_m , ο οποίος προκύπτει με δειγματοληψία μονοφωνικού ήχου στα 48 KHz και κβάντιση με χρήση 16 bits.

$$C_m = 48 \cdot 10^3 \cdot 16 = 768000 = 768 \text{ Kbps.} \quad (1)$$

Ο ρυθμός αυτός αυξάνεται στην περίπτωση πολυφωνικού ήχου, ο οποίος αποτελείται περισσότερα κανάλια (π.χ. δύο κανάλια στο στερεοφωνικό). Στη συνέχεια εξετάζουμε αυτήν την περίπτωση.

4.2.2 Ψηφιοποίηση Στερεοφωνικού Ήχου

Ο στερεοφωνικός ήχος αποτελείται από δύο κανάλια, είναι δηλαδή σύνθεση δύο ήχων που προκύπτουν από δύο συσκευές λήψης οι οποίες λειτουργούν ταυτόχρονα, το δεξί και το αριστερό μικρόφωνο. Στο επόμενο σχήμα παρατηρούμε τη βασική διαδικασία δημιουργίας του στερεοφωνικού ηχητικού σήματος, η οποία αποτελείται, όπως φαίνεται, από δύο διακριτές διαδρομές. Το σημείο αφετηρίας αυτών των διαδρομών είναι τα δύο μικρόφωνα (οι αισθητήρες δηλαδή του ήχου), το δεξί και το αριστερό.



Εικόνα 4.3 Δημιουργία στερεοφωνικού ήχου.

Στην περίπτωση που ο ήχος είναι στερεοφωνικός, ο ρυθμός που υπολογίσαμε παραπάνω διπλασιάζεται, λόγω της ύπαρξης των δύο καναλιών. Η νέα τιμή που υπολογίζουμε για τον στερεοφωνικό ήχο είναι η C_s , όπως φαίνεται παρακάτω:

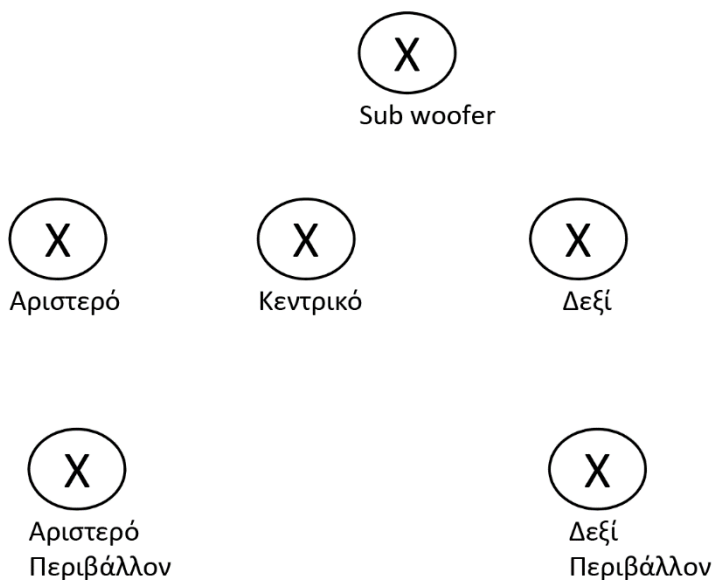
$$C_s = 2 \cdot 768 = 1.536 \text{ Kbps} = 1,5 \text{ Mbps} \quad (2)$$

Στην επόμενη ενότητα εξετάζουμε συνοπτικά τον πολυκαναλικό ήχο.

4.2.3 Πολυκαναλικός Ήχος

Στην περίπτωση του πολυκαναλικού ήχου, η κωδικοποίηση και η συμπίεση γίνονται και μεταξύ των καναλιών που αποστέλλονται. Αυτό σημαίνει ότι τα κανάλια που μεταδίδονται αξιολογούνται για συσχετιζόμενη πληροφορία που δεν συνεισφέρει στο τελικό ηχητικό αποτέλεσμα. Αυτή η διαδικασία γίνεται, για παράδειγμα, στα σχετικά πρότυπα όπως το MPEG2 layerII MC (πολυκαναλικός ήχος Multi Channel) και το Dolby Digital 5.1 Surround.

Μια σχετική αναπαράσταση του περιβάλλοντος λήψης πολυκαναλικού ήχου απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα, όπου έχουμε το μοντέλο 5.1.



Εικόνα 4.4 Δημιουργία πολυκαναλικού ήχου.

Στη μετάδοση ήχου κατά 5.1 μεταδίδονται τα επόμενα κανάλια: αριστερό, κέντρο, δεξί, αριστερό περιβάλλον (surround), δεξί περιβάλλον (surround) και το ενισχυτικό των χαμηλών συχνοτήτων (Low-Frequency Enhancement, LFE) κανάλι για χρήση σε sub-woofer.

Στην επόμενη ενότητα θα εξετάσουμε την ανάγκη για τη συμπίεση του ήχου και τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτό.

4.3 Συμπίεση Ήχου

Η ροή δεδομένων που προκύπτει από την ψηφιοποίηση του ήχου πρέπει να συμπιεστεί και ο αντίστοιχος ρυθμός να μειωθεί σημαντικά. Συγκεκριμένα, πρέπει να υποβιβαστεί από τα 1.5 Mbps (στην περίπτωση του στερεοφωνικού ήχου) σε μια τιμή η οποία κυμαίνεται από τα 100 Kbps μέχρι και τα 400 Kbps. Τα ποσοστά συμπίεσης κυμαίνονται από 16:1 (για τη χαμηλή ποιότητα του ήχου) έως και 4:1 για την πιο υψηλή ποιότητα.

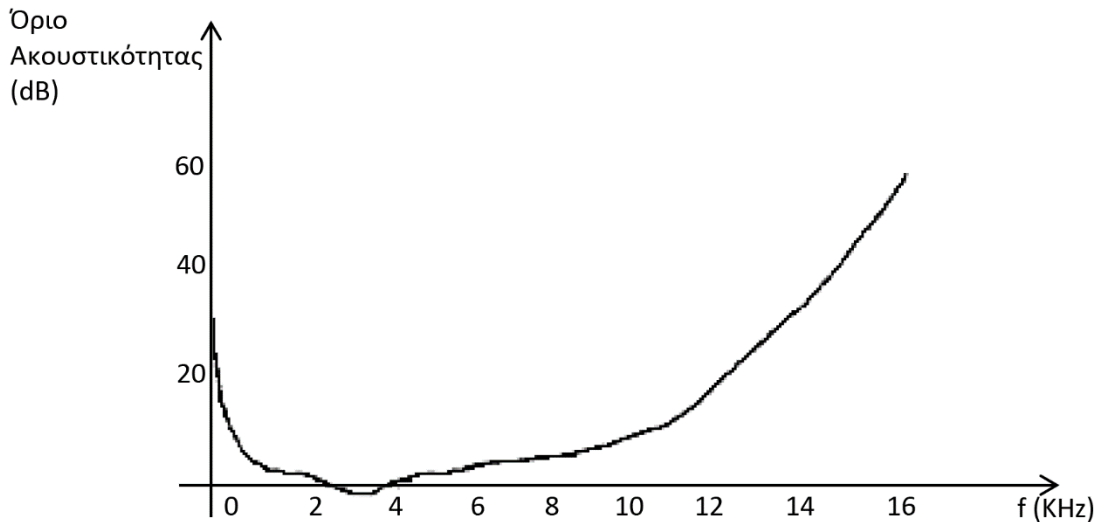
Στην ενότητα αυτή θα εξετάσουμε με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τα χαρακτηριστικά που επιτρέπουν δραστηκή συμπίεση του ηχητικού σήματος. Μεγάλη σημασία έχει η ευαισθησία και εν γένει η συμπεριφορά του αυτιού στις διάφορες συχνότητες.

4.3.1 Ακουστικό Φάσμα και Ευαισθησία

Στη θεωρία το εύρος ζώνης των ήχων που γίνονται αντιληπτοί από το ανθρώπινο αυτί είναι, όπως συζητήσαμε και παραπάνω, από τα 0 KHz έως και τα 20 KHz. Οι τιμές αυτές, βέβαια, είναι ενδεικτικές, αφού με το πέρασμα των χρόνων το φάσμα των συχνοτήτων που αντιλαμβανόμαστε περιορίζεται. Σε κάθε περίπτωση ήχοι εκτός αυτού του εύρους ζώνης δεν γίνονται αντιληπτοί από τον άνθρωπο.

Παράλληλα, με τους ανωτέρω περιορισμούς στο πεδίο της συχνότητας που αφορούν έναν μεμονωμένο ήχο, υπάρχουν περιορισμοί και αναφορικά με την ένταση των ήχων οι οποίοι μπορούν να γίνονται αντιληπτοί. Το όριο αυτό της έντασης, κάτω από το οποίο ένας ήχος δεν γίνεται αντιληπτός, διαφοροποιείται σε σχέση με τη συχνότητα. Η μέγιστη ευαισθησία του ανθρώπου στον ήχο είναι στο εύρος μεταξύ 3 KHz και 4 KHz. Στο συγκεκριμένο διάστημα η ευαισθησία του αυτιού μεγιστοποιείται και εκτός αυτού μειώνεται με σχετικά γρήγορο ρυθμό και προς τις δύο κατευθύνσεις.

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται η καμπύλη ευαισθησίας του ανθρώπινου αυτιού, σε σχέση με τη συχνότητά τους. Παρατηρούμε ότι το όριο «ακουστικότητας» στις συχνότητες περί τα 3KHz παρουσιάζει το ολικό ελάχιστο και αυξάνει στις υπόλοιπες. Αυτό σημαίνει ότι στις συχνότητες αυτές μπορούμε να ακούμε ήχους με την ελάχιστη ένταση, ενώ για να μπορέσουμε να ακούσουμε ήχους στις υπόλοιπες συχνότητες απαιτείται μεγαλύτερη ένταση. Το διάγραμμα έχει προκύψει από μετρήσεις ευρείας κλίμακας και αξιοπιστίας.



Εικόνα 4.5 Καμπύλη ευαισθησίας ανθρώπινου αυτιού σε σχέση με τις συχνότητες των ήχων.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι κάποιοι ήχοι δεν γίνονται αντιληπτοί από τον άνθρωπο και αυτό συνεπάγεται ότι δεν χρειάζεται να κωδικοποιούνται. Αυτό σημαίνει ότι οι ήχοι αυτοί μπορούν, δηλαδή, να αγνοηθούν κατά τη διαδικασία της συμπίεσης (και όλες βέβαια τις συνακόλουθες διαδικασίες). Αυτοί είναι οι επόμενοι:

- Οι ήχοι των οποίων το φασματικό περιεχόμενο (οι συχνότητες δηλαδή από τις οποίες αποτελούνται) είναι εκτός του εύρους συχνοτήτων [20 Hz, 20 KHz].
- Οι ήχοι των οποίων η ένταση είναι κάτω από το ελάχιστο όριο ακοής για τις αντίστοιχες συχνότητες στις οποίες εκτείνονται

Η πρώτη περίπτωση είναι και ο λόγος ύπαρξης του Φίλτρου Χαμηλών Συχνοτήτων που περιορίζει το φασματικό περιεχόμενο του ήχου προς μετάδοση στο διάστημα περί τα [20Hz, 20 KHz]. Απαιτείται προσοχή στην επιλογή της συχνότητας δειγματοληψίας ώστε να είναι κατ' ελάχιστον το διπλάσιο της μέγιστης τιμής της συχνότητας του ηχητικού σήματος που διέρχεται από το φίλτρο. Στην περίπτωση, για παράδειγμα, όπου το ΦΧΣ επιτρέπει τη διέλευση συχνοτήτων μέχρι τα 20 KHz, η συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να είναι κατ' ελάχιστον 40 KHz ώστε να ικανοποιείται το θεώρημα του Shannon (η συχνότητα αυτή είναι γνωστή και ως συχνότητα Nyquist).

Η δεύτερη περίπτωση οδηγεί στην ανάγκη για μια βαθμίδα σύγκρισης της έντασης του εισερχόμενου ήχου με το όριο ακουστικότητας, στην αντίστοιχη συχνότητα. Αυτό σημαίνει ότι εάν η ένταση κάποιου ήχου δεν υπερκαλύπτει αυτό το όριο, ο ήχος μπορεί να αγνοείται.

4.3.2 Επικάλυψη

Το φαινόμενο της επικάλυψης λαμβάνει χώρα τόσο αναφορικά με τη συχνότητα όσο αναφορικά με την ένταση. Εξετάζουμε στη συνέχεια τις δύο αυτές περιπτώσεις, αφού αποτελούν όμοια αλλά διακριτά φαινόμενα.

4.3.2.1 Επικάλυψη στο Πεδίο της Συχνότητας

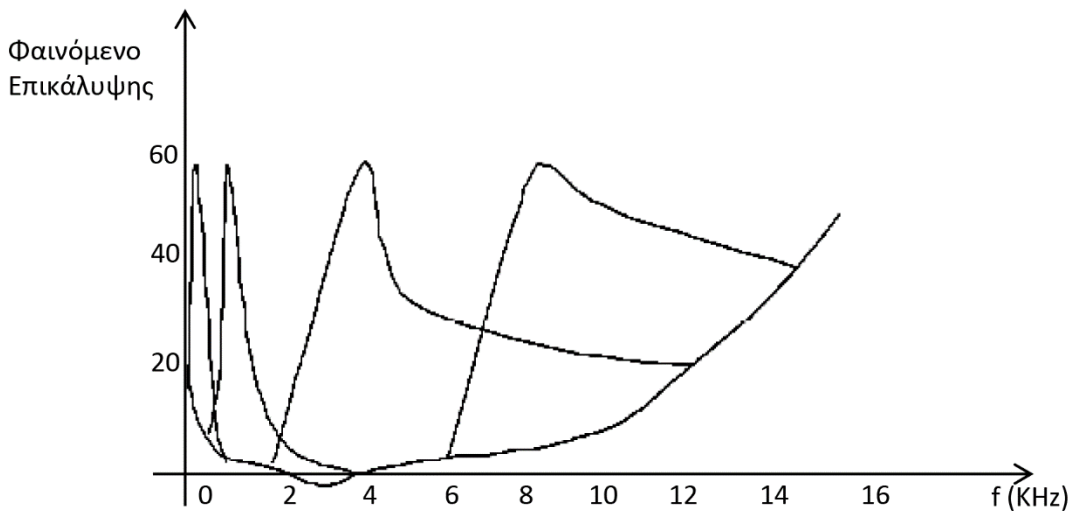
Εάν, για παράδειγμα, ακούγεται ένας ήχος σε συχνότητα π.χ. f_0 KHz με σταθερό πλάτος, τότε μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι άλλοι ήχοι στις συχνότητες γύρω από την f_0 να γίνουν αντιληπτοί πρέπει να υπερβούν κάποιο συγκεκριμένο πλάτος (διαφορετικά επικαλύπτονται). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *επικάλυψη στο πεδίο της συχνότητας*. Ο ήχος, δηλαδή, στη συχνότητα f_0 επικαλύπτει τους ήχους στις γύρω συχνότητες.

Από μετρήσεις στο πλαίσιο πειραμάτων της ανθρώπινης ακοής, προκύπτουν οι επόμενες παρατηρήσεις:

- Η μορφή της επικάλυψης εξαρτάται από τη συχνότητα του επικαλύπτοντος ήχου.
- Όσο πιο υψηλή είναι η συχνότητα του επικαλύπτοντος ήχου τόσο μεγαλύτερο το (συχνотικό) εύρος της επικάλυψης.

Είναι ευνόητο ότι ήχοι οι οποίοι επικαλύπτονται δεν χρειάζεται να κωδικοποιούνται και να αποστέλλονται άρα πρέπει να αγνοούνται κατά τη συμπίεση. Προϋπόθεση για να μπορούμε να έχουμε αυτήν την *οικονομία* στην αποστέλλομενη πληροφορία είναι να γίνει αντιληπτό το υποσύνολο του ηχητικού περιεχομένου το οποίο επικαλύπτεται. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται μηχανισμοί τους οποίους θα εξετάσουμε στη συνέχεια.

Το φαινόμενο της επικάλυψης στο πεδίο της συχνότητας παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα. Παρατηρούμε ορισμένες από τις καμπύλες της επικάλυψης, η ερμηνεία των οποίων είναι η εξής: Εάν έχουμε έναν ήχο του οποίου η συχνότητα αντιστοιχεί στη συχνότητα του κεντρικού σημείου μιας καμπύλης και η ένταση του ήχου αντιστοιχεί στην κορυφή της καμπύλης, τότε ο ήχος αυτός επικαλύπτει το σύνολο των (τυχόν) ήχων οι οποίοι αντιστοιχούν, όσον αφορά τη συχνότητα και την ένταση στην επιφάνεια κάτω από τη συγκεκριμένη καμπύλη.



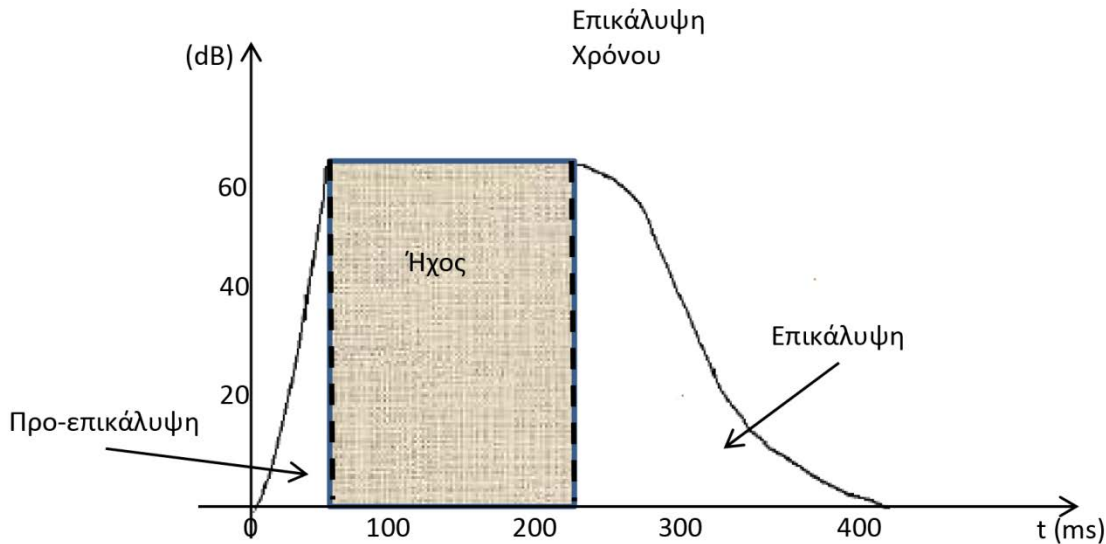
Εικόνα 4.6 Επικάλυψη στο πεδίο της συχνότητας.

Για να μπορέσει, δηλαδή, να γίνει αντιληπτός ένας ήχος (εάν η συχνότητά του αντιστοιχεί στο εύρος συχνοτήτων που καλύπτει η καμπύλη) πρέπει η ένταση αυτού να υπερβαίνει τον ορίζοντα της καμπύλης.

4.3.2.2 Επικάλυψη στο Πεδίο του Χρόνου

Επικάλυψη έχουμε, επίσης, στο πεδίο του χρόνου. Συγκεκριμένα ένας έντονος (μεγάλης έντασης) ήχος επικαλύπτει (δεν επιτρέπει να γίνουν αντιληπτοί) ήχοι πριν και μετά από αυτόν εφόσον η ένταση αυτών των ήχων δεν ξεπερνάει κάποιο κατώφλι. Η επικάλυψη πριν το χρονικό διάστημα που αναπαράγεται ο ήχος οφείλεται στην περιορισμένη ευαισθησία του ανθρώπινου αυτιού (όσον αφορά την κατανόηση των χρονικών διαστημάτων που μεσολαβούν μεταξύ ήχων) αλλά και τον τρόπο με τον οποίο μεταδίδονται τα σήματα από το αυτί στον εγκέφαλο.

Η επόμενη εικόνα παρουσιάζει το φαινόμενο της επικάλυψης στο πεδίο του χρόνου. Συγκεκριμένα δείχνει έναν ήχο (γκρι επιφάνεια) ο οποίος εκτείνεται, έχοντας σταθερή υποθέτουμε ένταση, στο χρονικό διάστημα $[t_0, t_1]$ (περίπου, σύμφωνα με το σχήμα, το t_0 αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή των 80 ms και το t_1 στην αντίστοιχη χρονική στιγμή των 220 ms). Ο ήχος αυτός προκαλεί επικάλυψη πριν (οπότε έχουμε το φαινόμενο της προεπικάλυψης) και (κυρίως) μετά (οπότε έχουμε την επικάλυψη ή κυρίως επικάλυψη, ή μετα-επικάλυψη). Η επικάλυψη αφορά το χρονικό διάστημα $[t_1, t_2]$, όπου προσεγγιστικά, το χρονικό σημείο t_1 είναι η έναρξη του χρόνου και t_2 τα 400 ms.



Εικόνα 4.7 Επικάλυψη στο πεδίο του χρόνου.

Οι μέθοδοι συμπίεσης του ήχου που χρησιμοποιούνται στους σύγχρονους αλγόριθμους συμπίεσης (μεταξύ των οποίων και στο MPEG) βασίζονται στην επικάλυψη κυρίως στο πεδίο της συχνότητας αλλά και σε αυτό του χρόνου με τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται να είναι πολύ παρόμοιες για τους διάφορους κωδικοποιητές.

4.3.3 Κβαντισμός και Θόρυβος Κβαντισμού

Ο κβαντισμός (ή διακριτοποίηση) αποτελεί την αντιστοίχιση της τιμής του ηχητικού σήματος από την αναλογική μορφή σε συγκεκριμένες διακριτές στάθμες. Ο κβαντισμός καθορίζεται από το πλήθος των bits, έστω N , που αξιοποιούνται για την αναπαράσταση των τιμών του σήματος.

Στην περίπτωση του ήχου, το πλήθος των bits που συνήθως χρησιμοποιείται είναι 16 (ενώ σε κάποιες προγενέστερες συνήθως περιπτώσεις ήταν 8 bits). Το πλήθος των bits καθορίζει το πλήθος από τις στάθμες κβαντισμού 2^N και αντίστοιχα τον θόρυβο κβαντισμού.

Ο θόρυβος κβαντισμού προκύπτει από την ψηφιοποίηση ενός αναλογικού σήματος και, όπως έχουμε συζητήσει σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio) είναι περίπου $6N$, όπου N το πλήθος των bits που χρησιμοποιούνται για τον κβαντισμό.

Αυτό σημαίνει ότι:

- Με χρήση 8 bits έχουμε σηματοθορυβικό λόγο 48 dB
- Με χρήση 16 bits έχουμε σηματοθορυβικό λόγο 96 dB

Οι παραπάνω τιμές επαληθεύουν την αντιστοίχιση μεταξύ του πλήθους των bits και του επιπέδου ποιότητας σε dB (αναφορικά με τον σηματοθορυβικό λόγο). Η διαφορά των δύο επιπέδων είναι 48 dB η οποία αντιστοιχεί στο γινόμενο $6 \cdot 8 = 48$ όπου 8 είναι τα επιπλέον χρησιμοποιούμενα bits.

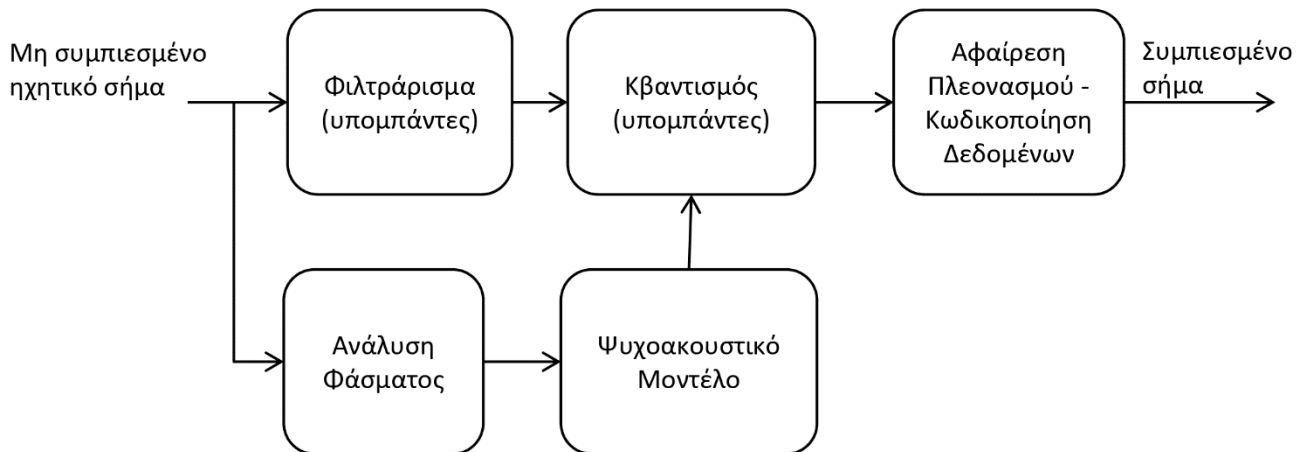
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το εύρος της ακοής του ηχητικού σήματος από το ανθρώπινο αυτί είναι περίπου 140 dB γεγονός το οποίο θα δικαιολογούσε την επιλογή ακόμη μεγαλύτερης ακρίβειας κβαντισμού περισσότερων δηλαδή bits (με την έννοια ότι μεγαλύτερη ακόμη ακρίβεια κβαντισμού θα μπορούσε να γίνει αντιληπτή από το ανθρώπινο σύστημα ακοής).

4.4 Κωδικοποίηση Ήχου

Το ψηφιακό ηχητικό σήμα ακολουθεί δύο διακριτές διαδρομές στον κωδικοποιητή, οι οποίες αναπαρίστανται στο επόμενο σχήμα. Συγκεκριμένα το σήμα αφού φιλτραριστεί, οδηγείται στον αναλυτή φάσματος, όπου μετασχηματίζεται κατά Διακριτό Μετασχηματισμό Φουριέ (ΔΜΦ), ο οποίος υλοποιείται μέσω του αλγορίθμου του Ταχέως Μετασχηματισμού Φουριέ. Αφού πραγματοποιηθεί ο Ταχύς Μετασχηματισμός

Φουριέ (Fast Fourier Transform, FFT) ξεχωρίζουν τα τμήματα του ηχητικού σήματος και τα εύρη των συχνοτήτων που αυτά ανήκουν.

Παράλληλα το ηχητικό σήμα υφίσταται φιλτράρισμα και χωρίζεται σε υπομπάντες (οι οποίες αφορούν συγκεκριμένες και περιορισμένες περιοχές συχνοτήτων). Οι υπομπάντες αυτές είναι εν γένει πιο εύκολα διαχειρίσιμες, όσον αφορά τη θεώρηση των φαινομένων κάλυψης, από το συνολικό ηχητικό σήμα (το οποίο εκτείνεται στο συνολικό εύρος ζώνης).



Εικόνα 4.8 Βήματα κωδικοποίησης ηχητικού σήματος.

Με χρήση του ψυχοακουστικού μοντέλου και των φαινομένων της επικάλυψης συχνότητας (αφού αυτό το είδος είναι που χρησιμοποιείται συνηθέστερα), μπορούν να εντοπιστούν τα τμήματα του ηχητικού σήματος τα οποία μπορούν να παραλειφθούν. Συγκεκριμένα,

- Μια υπομπάντα μπορεί να επικαλύπτεται από κάποια άλλη (επειδή η ένταση του ήχου σε αυτήν την υπομπάντα είναι πιο χαμηλή από το όριο). Αυτό σημαίνει ότι το περιεχόμενο της συγκεκριμένης υπομπάντας δεν χρειάζεται να μεταδοθεί.
- Μια υπομπάντα μπορεί να μην επικαλύπτεται οριακά. Ο κβαντισμός στα δείγματα της υπομπάντας αυτής μπορεί να γίνει όχι στις αρχικές τιμές αλλά στις διαφορές των πραγματικών τιμών από τα αντίστοιχα όρια ακοής (για τη συγκεκριμένη υπομπάντα).
- Επιπλέον η ακρίβεια της κβάντισης μπορεί να διαφέρει, δίνοντας, για παράδειγμα, έμφαση (με την ανάθεση περισσότερων bits) στις χαμηλότερες συχνότητες και μικρότερη (μικρότερο πλήθος bits κβαντισμού) στις υψηλότερες.

Η απόφαση αναφορικά με το αν θα παραλείψουμε μια υπομπάντα ή εάν αυτή θα κβαντιστεί με μικρότερη ακρίβεια, εξαρτάται από την εφαρμογή των ψυχοακουστικών μοντέλων, η οποία λαμβάνει υπόψη της και το φασματικό περιεχόμενο του σήματος. Ο κβαντισμός ελέγχεται από τον κβαντιστή κάθε υπομπάντας.

Ο κβαντισμός ακολουθείται από περιορισμό του πλεονασμού, ο οποίος γίνεται με τη βοήθεια ειδικής κωδικοποίησης. Με το πέρας αυτών των διαδικασιών είναι διαθέσιμο το συμπίεσμένο ψηφιακό ηχητικό σήμα.

4.4.1 Κωδικοποίηση Υπομπάντας

Σύμφωνα με το MPEG (και συγκεκριμένα τα επίπεδα I και II, layer I και II) το ηχητικό σήμα διέρχεται από μια συστοιχία φίλτρων, τα οποία χωρίζουν το σήμα σε υπομπάντες των 750 Hz. Για κάθε υπομπάντα υπάρχει ξεχωριστός κβαντιστής, ο οποίος ελέγχεται από το μπλοκ του ΔΜΦ (ο οποίος εφαρμόζει τον αλγόριθμο του Ταχέως Μετασχηματισμού Φουριέ) και το ψυχοακουστικό μοντέλο (33).

Ο κβαντιστής έχει τη δυνατότητα να απορρίψει εξολοκλήρου την υπομπάντα ή να προσαρμόσει (περιορίσει) την ακρίβεια του κβαντισμού. Σύμφωνα με το πρότυπο MPEG Layer II, ο ΔΜΦ λαμβάνει χώρα

κάθε 24 milliseconds και εφαρμόζεται σε 1.024 δείγματα. Αυτό σημαίνει ότι η πληροφορία που δίνεται στο ψυχοακουστικό μοντέλο αλλάζει κάθε 24 ms.

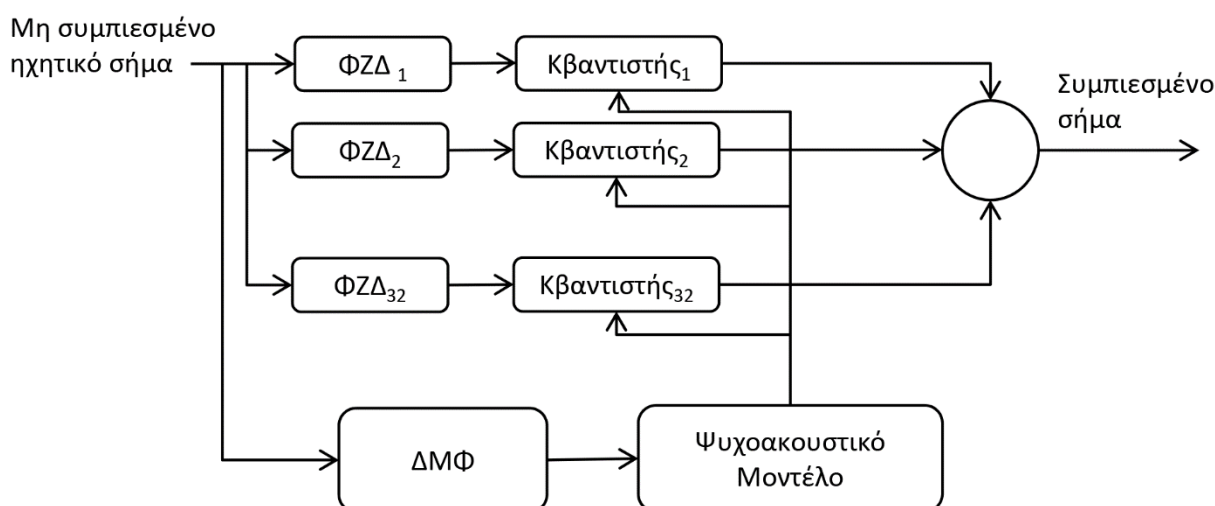
Στο χρονικό διάστημα αυτό των 24 ms οι υπομπάντες πραγματοποιούν συμπίεση με βάση την πληροφορία που έχουν λάβει από το μπλοκ του ψυχοακουστικού μοντέλου. Αυτό σημαίνει ότι ο μηχανισμός προκαλεί μια καθυστέρηση.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται ο μηχανισμός όπου το σήμα με τη βοήθεια Φίλτρων Ζώνης Διέλευσης (ΦΖΔ) χωρίζεται στις 32 υπομπάντες και για καθεμία από τις υπομπάντες λαμβάνει χώρα ο κβαντισμός. Η απόφαση για τον κβαντισμό λαμβάνεται από τον παράλληλο κλάδο που περιλαμβάνει το Διακριτό Μετασχηματισμό Φουριέ και το ψυχοακουστικό μοντέλο.

Ο ΔΜΦ πραγματοποιείται με:

- 512 σημεία στην περίπτωση του MPEG Layer I
- 1024 σημεία στην περίπτωση των MPEG Layer II

Οι διαδικασίες αυτές λαμβάνουν χώρα σε χρονικό διάστημα των 24 ms, με βάση τη δειγματοληψία του ηχητικού σήματος. Το σύνολο των συνιστωσών του ηχητικού σήματος στις εξόδους των κβαντιστών αποτελούν το συμπιεσμένο σήμα.



Εικόνα 4.9 Κωδικοποίηση ηχητικού σήματος στις υπομπάντες.

Εξαιτίας των διαφορετικών επιπέδων ακουστικότητας, η ανάθεση του πλήθους των bits για τον κβαντισμό (άρα και η ποιότητα του κβαντισμού) είναι διαφορετική για κάθε υπομπάντα. Ο κβαντισμός πρέπει να γίνεται σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια στις πιο χαμηλές συχνότητες (εκεί, δηλαδή, που το ανθρώπινο σύστημα ακοής έχει τη μεγαλύτερη ευαισθησία, π.χ. στα 3 KHz όπου εμφανίζεται και το μέγιστο) και να υπάρχει το περιθώριο να είναι λιγότερο λεπτομερές στις πιο υψηλές συχνότητες.

Σημειώνεται επίσης ότι οι υπομπάντες εξετάζονται για το κατά πόσο περιέχουν αρμονικές σημάτων που ανήκουν σε επόμενες υπομπάντες. Κατά πόσο, δηλαδή, οι επικαλυπτόμενοι ήχοι αποτελούν αρμονικές ή είναι ξεχωριστοί ήχοι. Ειδικά για την περίπτωση των αρμονικών οι ήχοι αυτοί μπορούν να εξαλειφθούν πλήρως.

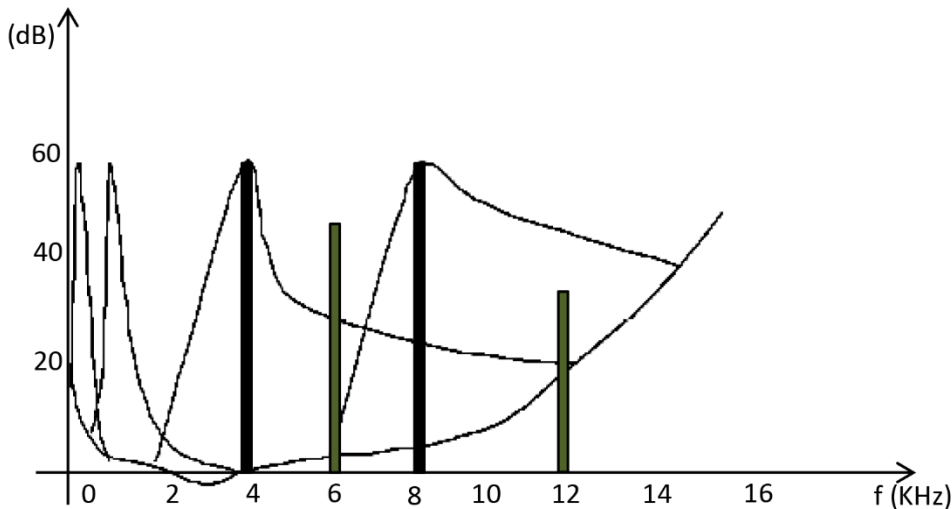
4.4.1.1 Παράδειγμα Επικάλυψης

Θεωρούμε ότι έχουμε δύο απλά ηχητικά σήματα (τόνους) με υψηλή ένταση τα οποία βρίσκονται στα 4 KHz και στα 8 KHz, όπως προκύπτει από το Διακριτό Μετασχηματισμό Φουριέ. Επιπλέον υπάρχουν άλλα δύο ηχητικά σήματα (τόνοι) στα 6 KHz και στα 12 KHz, όπως παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα.

Θα εξετάσουμε κατά πόσο υπάρχει επικάλυψη μεταξύ των σημάτων, ποια πρέπει κωδικοποιηθούν και ποια θα μπορούσαν να αγνοηθούν. Διακρίνουμε τις δύο περιπτώσεις:

- Περίπτωση 1: Η ένταση του σήματος στη συχνότητα 6 KHz παρατηρούμε ότι υπερβαίνει το κατώφλι επικάλυψης. Το τμήμα της επικάλυψης οφείλεται στον ήχο ο οποίος έχει συχνότητα 4 KHz. Στην περίπτωση αυτή περιορίζεται το πλήθος των επιπέδων κβαντισμού.
- Περίπτωση 2: Σε επόμενη υπομπάντα παρατηρούμε ότι το σήμα στα 12KHz έχει ένταση η οποία είναι κάτω από το κατώφλι επικάλυψης. Αυτό σημαίνει ότι ο ήχος αυτό δεν θα γίνει αντιληπτός από τον ακροατή, αφού επικαλύπτεται από τον ήχο στα 8 KHz ο οποίος ανήκει σε προηγούμενη υπομπάντα. Ως αποτέλεσμα αυτής της παρατήρησης έχουμε ότι το περιεχόμενο της τρέχουσας υπομπάντας δεν θα γίνει αντιληπτό, άρα μπορεί να αγνοηθεί.

Τα παραδείγματα αυτά εμφανίζονται στην επόμενη εικόνα.



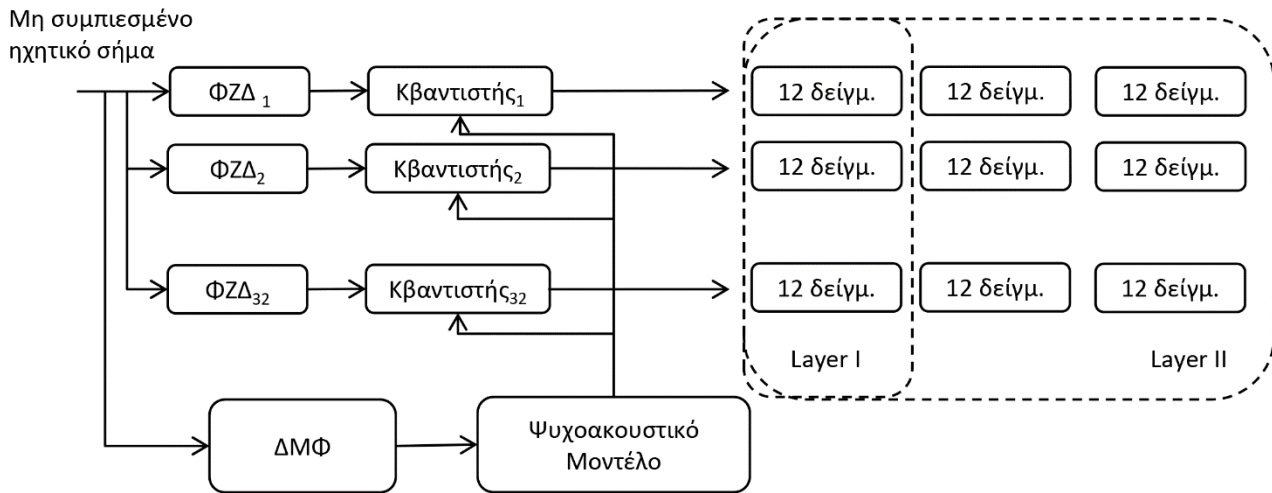
Εικόνα 4.10 Επικάλυψη ηχητικών σημάτων.

Στο πλαίσιο του παραδείγματος παρατηρούμε ότι εκ των τεσσάρων ήχων, ο ένας μπορεί να αγνοηθεί ενώ άλλος ένας κωδικοποιείται με μικρότερο πλήθος bits.

4.4.1.2 Δημιουργία Πλαισίου

Στην κωδικοποίηση του MPEG τα δείγματα συνδυάζονται σε πλαίσια. Ένα πλαίσιο του επιπέδου I (layer I) αποτελείται από τμήμα 12 δειγμάτων για κάθε υπομπάντα. Ένα πλαίσιο του επιπέδου II (layer II) αποτελείται από 3 τμήματα των 12 δειγμάτων (έκαστο) για κάθε υπομπάντα.

Τα πλαίσια για τις περιπτώσεις αυτές απεικονίζονται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 4.11 Δημιουργία πλαισίων.

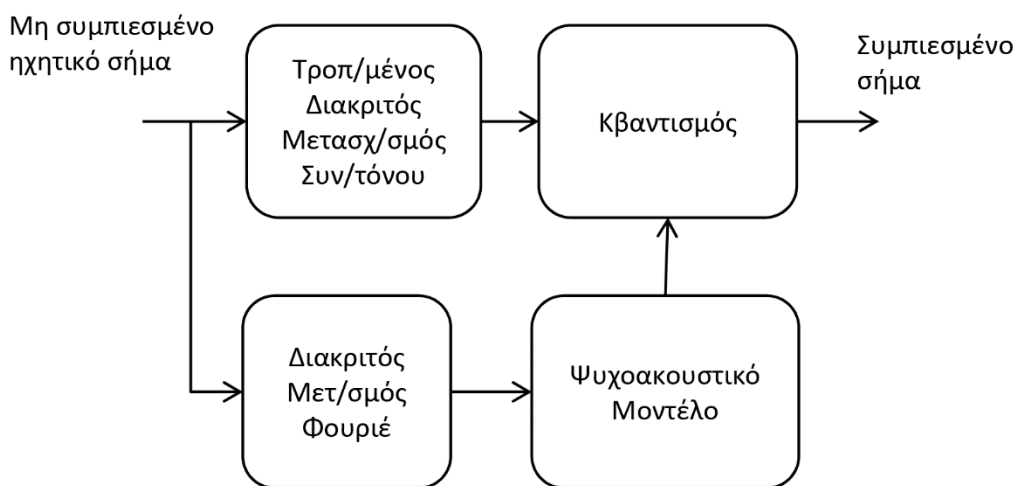
Για κάθε τμήμα των 12 δειγμάτων, εντοπίζεται το δείγμα με τη μέγιστη τιμή. Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται για την κλιμάκωση των υπόλοιπων δειγμάτων και εφαρμόζεται σε όλα τα 12 δείγματα του μπλοκ για αφαίρεση του φαινομένου της κάλυψης.

4.4.2 Κωδικοποίηση Μετασχηματισμού

Η κωδικοποίηση μετασχηματισμού σε αντιπαράθεση με την κωδικοποίηση που βασίζεται στην εκμετάλλευση του φαινομένου της κάλυψης δεν χρησιμοποιεί τη συστοιχία των φίλτρων που περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα. Μετασχηματίζει την πληροφορία από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας με χρήση του Διακριτού Μετασχηματισμού Φουριέ (Discrete Fourier Transform).

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί τον Τροποποιημένο Διακριτό Μετασχηματισμό Συνημιτόνου (Modified Discrete Fourier Transform, MDFT) ώστε να επεξεργαστεί το ηχητικό σήμα και να δώσει 256 ή 512 τιμές στο πεδίο της συχνότητας. Αυτό γίνεται με τον ίδιο τρόπο που λειτουργεί η κωδικοποίηση που βασίζεται στις υπομπάντες. Ο Ταχύς Μετασχηματισμός Φουριέ (Fast Fourier Transform, FFT) εκτελείται με μεγάλη ακρίβεια και ταχύτητα στο πεδίο της συχνότητας.

Η πορεία που ακολουθείται απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 4.12 Κωδικοποίηση μετασχηματισμού.

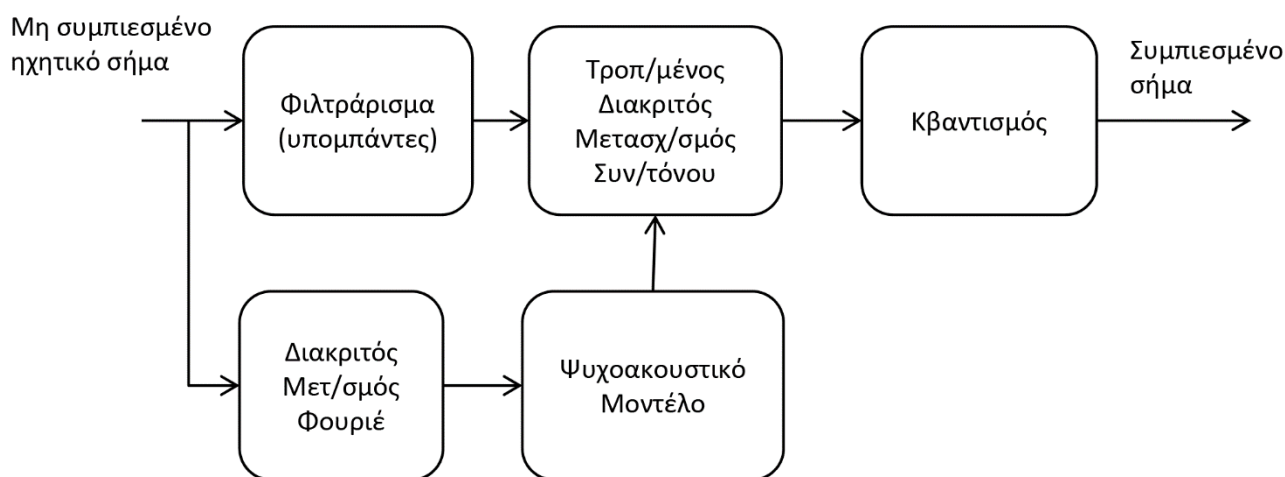
Σύμφωνα με το ψυχοακουστικό μοντέλο, οι τιμές που προκύπτουν από τον Τροποποιημένο Διακριτό Μετασχηματισμό Φουριέ υφίστανται κβαντισμό. Η μέθοδος αυτή υπερέχει σε σχέση με τη μέθοδο που

διαχωρίζει το φασματικό περιεχόμενο του ηχητικού σήματος σε υπομπάντες στο γεγονός ότι μπορεί να επιτύχει μεγαλύτερη ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας.

4.4.3 Υβριδικό Μοντέλο Κωδικοποίησης

Παράλληλα με τους δύο επιμέρους τρόπους μετασχηματισμού υπάρχει, επίσης, η δυνατότητα συνδυασμού των δύο τρόπων κωδικοποίησης (υπομπάντες και μετασχηματισμού), ο οποίος είναι γνωστός ως υβριδική κωδικοποίηση. Σε αυτόν τον τρόπο μετασχηματισμού το φιλτράρισμα σε υπομπάντες πραγματοποιείται πριν τον μετασχηματισμό MDCT.

Αυτό σημαίνει ότι γίνεται ένας διαχωρισμός σε υπομπάντες και στη συνέχεια εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός MDCT σε κάθε υπομπάντα για καλύτερη ανάλυση, όπως απεικονίζεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 4.13 Υβριδικό μοντέλο επικάλυψης.

Τα δεδομένα που προκύπτουν από τον μετασχηματισμό MDCT υποβάλλονται σε συμπίεση με χρήση του ψυχοακουστικού μοντέλου το οποίο τροφοδοτείται από την έξοδο του Ταχέως Μετασχηματισμού Φουριέ. Αυτός είναι ο τρόπος κωδικοποίησης χρησιμοποιείται στο MPEG – layer 3 (δηλαδή στα αρχεία με κατάληξη mp3).

4.5 Πρότυπα Κωδικοποίησης Ήχου MPEG

Οι δύο τεχνικές, της διαίρεσης σε μπάντες και του μετασχηματισμού, χρησιμοποιήθηκαν στα πρώτα πρότυπα του MPEG που είχαν να κάνουν με τη συμπίεση του ήχου και συγκεκριμένα στο πρότυπο MPEG-1 όπως αυτό διαμορφώθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1990 (ως πρότυπο ISO/IEC 11172-3). Το πρότυπο MPEG-1 audio αποτελείται από τρία επίπεδα (layers) I, II και III. Το επίπεδο III δίνει το γνωστό πρότυπο mp3 (MPEG-1, layer III).

Το MPEG-2 υιοθέτησε τα τρία επίπεδα του MPEG-1 όσον αφορά τον ήχο και το επίπεδο II επεκτάθηκε για να δημιουργήσει το επίπεδο II MC, το οποίο είναι και το πολυκαναλικό (multichannel). Το πρότυπο ISO/IEC 13818-3 του MPEG-2 για τον ήχο υιοθετήθηκε το 1994. Το MPEG-2 χρησιμοποιείται στην τηλεόραση τυπικής ευκρίνειας (εικόνας και ήχου) αλλά επεκτάθηκε και για την τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα το MPEG-3 να εγκαταλειφθεί και να μην προχωρήσει περαιτέρω. Έκτοτε έχουν υπάρξει διαφοροποιήσεις με κυριότερες το MPEG-2 AAC ISO/IEC 13818-7 (όπου AAC είναι το Advanced Audio Coding) και το σύστημα ήχου του MPEG-4 ISO/IEC 14496-3: AAC και AAC Plus.

Το πρότυπο Advanced Audio Coding (AAC) έχει σχεδιαστεί ως διάδοχος του προτύπου MPEG 1 & 3 Layer 3. Εν γένει το AAC μπορεί να πετύχει καλύτερη ποιότητα με αντίστοιχο ρυθμό. Το AAC προτυποποιήθηκε από τους οργανισμούς ISO και IEC, ως τμήμα του MPEG-2 (ως PART 7 και συγκεκριμένα ως το πρότυπο ISO/IEC 13818-7:1997) και του MPEG-4.

Το AAC υποστηρίζει τον συνδυασμό μέχρι και 48 καναλιών, πλήρους εύρους ζώνης (μέχρι δηλαδή και τα 96 kHz) σε μία ροή και επιπλέον 16 κανάλια περιορισμένης συχνότητας (Low Frequency Effects, LFE) μέχρι δηλαδή τα 120 Hz, 16 διαλογικά κανάλια και 16 ροές δεδομένων.

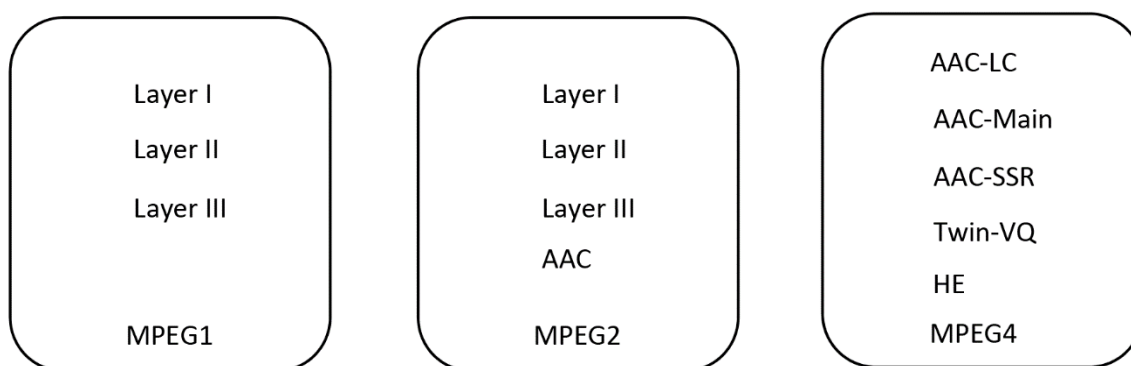
Αναφορικά με το MPEG 2, το Part 7 ήταν ένα νέο διαφορετικό τμήμα αφού πιο πριν ο ήχος εντάσσεται στο Part 3. Το Part 7 δεν είχε συμβατότητα προς τα πίσω. Δεν ήταν, δηλαδή, συμβατό με τα mp1, mp2 και mp3. Για αυτόν τον λόγο αναφερόταν ως μη συμβατό MPEG-2 NBC (Non-Backward Compatible). Το MPEG-2 Part 7 όρισε τρία προφίλ:

- χαμηλής πολυπλοκότητας (Low-Complexity profile, AAC-LC)
- βασικό προφίλ (Main profile, AAC-Main)
- κλιμακωτού ρυθμού δειγματοληψίας (Scalable Sampling Rate, AAC-SSR)

Αξίζει να αναφερθούμε σε κάποιες από τις βασικές επεκτάσεις του AAC σε σχέση με το MP3, οι οποίες οδηγούν και στη βελτίωση στην ποιότητα του ήχου για αντίστοιχους ρυθμούς μετάδοσης.

- Υποστηρίζει μεγαλύτερο εύρος ρυθμών δειγματοληψίας (από 8 KHz έως 96 kHz) σε σχέση με το MP3 (το οποίο υποστήριζε από 16 KHz έως και 48 kHz). Αυτό το γεγονός, σε συνδυασμό και με κάποιες τεχνικές βελτιώσεις, συνεπάγεται καλύτερη απόδοση στα σήματα με τις σχετικά υψηλές συχνότητες, δηλαδή στις συχνότητες άνω των 16 KHz.
- Υποστηρίζει μέχρι και 48 κανάλια ήχου με υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας (το MP3 υποστηρίζει δύο κανάλια στο MPEG-1 και μέχρι 5.1 κανάλια στο MPEG-2).
- Υποστηρίζονται διαφορετικοί ρυθμοί κωδικοποίησης και μεταβλητό μήκος πλαισίου (σε αντίθεση με το mp3 όπου ο ρυθμός ήταν προκαθορισμένος).
- Υποστηρίζει απλουστευμένη λειτουργία όσον αφορά το αρχικό φιλτράρισμα των ήχων.
- Υποστηρίζει μήκος μπλοκ των 1.024 ή και 960 δειγμάτων, σε σχέση με την υποστήριξη των τμημάτων με τα 576 δείγματα του MP3. Το γεγονός αυτός υποστηρίζει καλύτερη απόδοση στην περίπτωση ηχητικών σημάτων χωρίς πολλές αλλαγές.
- Βελτιωμένη απόδοση όσον αφορά τη συμπίεση.

Το MPEG-4 Part 3 περιλαμβάνει τους προηγούμενους κωδικοποιητές MPEG-2 AAC και τους νέους MPEG-4 κωδικοποιητές ήχου, τον MPEG-4 HE (High Efficiency) AAC, καθώς και άλλους όπως ο TWIN-VQ (Transform-domain Weighted Interleave Vector Quantization). Οι εξελίξεις αυτές αποτυπώνονται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 4.14 Εξέλιξη προτύπων κωδικοποίησης ήχου.

Σε ένα τυπικό σύστημα ψηφιακής τηλεόρασης, η επιλογή της κωδικοποίησης του ήχου δεν είναι αυστηρά προδιαγεγραμμένη και μάλιστα σε πολλές περιπτώσεις διαφοροποιείται. Οι περισσότεροι Audioplayers υποστηρίζουν MPEG-1 Layer III Audio, MPEG-2 Layer III Audio και AAC MPEG-2 και MPEG-4.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

28. International Standards Organization / International Electrotechnical Commission. *Information technology — Generic coding of moving pictures and associated audio information: Audio*, International Standards Organization / International Electrotechnical Commission ISO/IEC, 11172-3, 1993.
29. International Standards Organization / International Electrotechnical Commission. *Information technology — Generic coding of moving pictures and associated audio information: Audio*, International Standards Organization / International Electrotechnical Commission ISO/IEC, 13818-3, 1998.
30. International Standards Organization / International Electrotechnical Commission. *Information technology — Generic coding of moving pictures and associated audio information: Advanced Audio Coding*, International Standards Organization / International Electrotechnical Commission ISO/IEC, 13818-7, 1998.
31. International Standards Organization / International Electrotechnical Commission. *Information technology — Generic coding of moving pictures and associated audio information: MPEG4 Advanced Audio Coding*, International Standards Organization / International Electrotechnical Commission ISO/IEC, 14496-3, 2009.
32. Advanced Television Standards Committee (ATSC) Standard. *Digital Audio Compression (AC-3, E-AC-3)*. Advanced Television Standards Committee, 2012.
33. K. Brandenburg. *MP3 and AAC Explained*, Fraunhofer Institute for Integrated Circuits FhG-IIS A. Erlangen, 1999.

Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1

Υπολογίστε τον ρυθμό στερεοφωνικού ηχητικού σήματος στις περιπτώσεις που η δειγματοληψία γίνεται με συχνότητες:

- $f_{s1} = 48 \text{ KHz}$
- $f_{s2} = 96 \text{ KHz}$

Επαναλάβετε για την περίπτωση ηχητικού σήματος 5:1, το οποίο δηλαδή αποτελείται από 5+1 κανάλια, τα ηχητικά σήματα των οποίων θεωρούμε ότι τα διαχειριζόμαστε με ομοιόμορφο τρόπο (αναφορικά με τη δειγματοληψία και την κβάντιση).

Απάντηση/Λύση

Η σχέση υπολογισμού του ρυθμού είναι η επόμενη:

$$C = n_{ch} * f_s * n_q$$

Όπου

- n_{ch} το πλήθος των καναλιών,
- f_s η συχνότητα δειγματοληψίας,
- n_q το πλήθος των bits που χρησιμοποιούνται για τη δειγματοληψία.

Με χρήση της σχέσης αυτής, έχουμε τις επόμενες περιπτώσεις:

Για το στερεοφωνικό σήμα

$$f_{s1}=48 \text{ KHz}, C = 2 * 48 * 10^3 * 16 = 1.536 \text{ Kbps}$$

$$f_{s2} = 96 \text{ KHz}, C = 2 * 96 * 10^3 * 16 = 3.072 \text{ Kbps}$$

Για το σήμα 5:1

$$f_{s1}=48 \text{ KHz}, C = 6 * 48 * 10^3 * 16 = 4.608 \text{ Kbps}$$

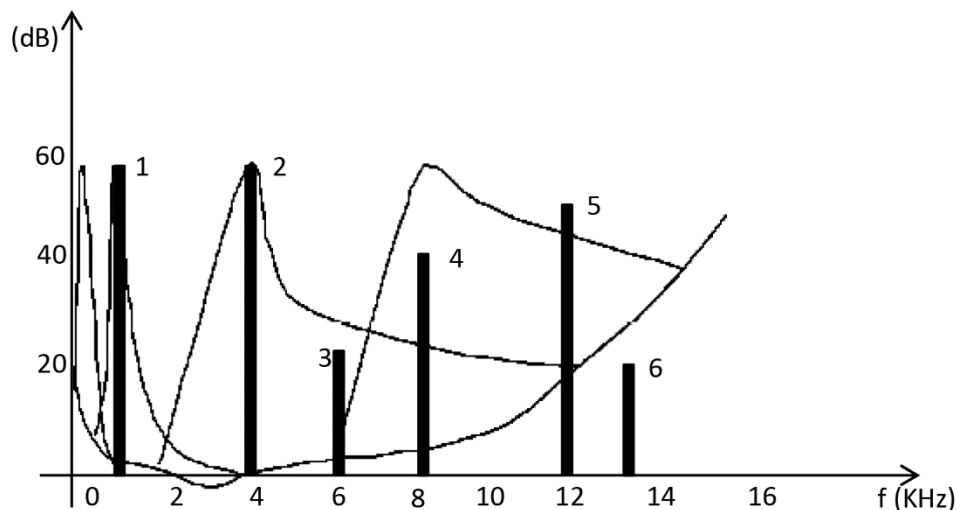
$$f_{s2} = 96 \text{ KHz}, C = 6 * 96 * 10^3 * 16 = 9.216 \text{ Kbps}$$

Παρατηρούμε ότι η αύξηση του ρυθμού δειγματοληψίας αλλά και του πλήθους των καναλιών οδηγεί σε σημαντική αύξηση και του ρυθμού του σήματος.

Κριτήριο αξιολόγησης 2

Θεωρήστε ότι έχουμε ηχητικό σήμα το οποίο πρόκειται να κωδικοποιηθεί σύμφωνα με το πρότυπο του MPEG1 Layer II. Το φασματικό περιεχόμενο του ηχητικού σήματος κάποια χρονική στιγμή (σε κάποιο

δηλαδή χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών στιγμών δειγματοληψίας) αποτυπώνεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 4.15 Επικάλυψη ηχητικών σημάτων.

Επεξηγήστε ποιο τμήμα του φασματικού περιεχομένου θα κωδικοποιηθεί και ποιο πρέπει να παραλειφθεί. Σε κάποιες περιπτώσεις θα χρειαστεί να κάνετε κάποιες εύλογες εκτιμήσεις αναφορικά με τις πιθανές επικαλύψεις.

Απάντηση/Λύση

Με βάση το σχήμα που μας δίνεται, μπορούμε να κάνουμε τις επόμενες παρατηρήσεις, για τα επιμέρους ηχητικά σήματα:

- Το ηχητικό σήμα 1, περίπου στο 1 KHz, δεν υφίσταται επικάλυψη από τον ήχο που είναι στις πιο χαμηλές συχνότητες.
- Το ηχητικό σήμα 2, στα 4 KHz, ομοίως δεν υφίσταται επικάλυψη.
- Το ηχητικό σήμα 3, στα 6 KHz επικαλύπτεται εξολοκλήρου από το φασματικό περιεχόμενο του ηχητικού σήματος 2.
- Το ηχητικό σήμα 4, περίπου στα 8.5 KHz εκτιμούμε ότι υφίσταται μερική μόνο επικάλυψη από τον προηγούμενο ήχο (το ηχητικό σήμα 3). Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να γίνει κωδικοποίηση με βάση τις διαφορές του συνολικού σήματος, χωρίς το επικαλυπτόμενο τμήμα του.
- Το ηχητικό σήμα 5, στα 12 KHz, υφίσταται μερική επικάλυψη από το φάσμα του προηγούμενου σήματος (ηχητικό σήμα 4), οπότε ομοίως θα γίνει κωδικοποίηση με βάση τις διαφορές του συνολικού σήματος χωρίς το επικαλυπτόμενο τμήμα του.
- Το ηχητικό σήμα 6, στα 13.5 KHz, επικαλύπτεται εξολοκλήρου από το προηγούμενο σήμα (το ηχητικό σήμα 5).

Κεφάλαιο 5 – Συρμοί Μεταφοράς

Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζουμε τον τρόπο με τον οποίο το πρότυπο MPEG (και συγκεκριμένα το MPEG-2) προτυποποιεί τον μηχανισμό δημιουργίας πακέτων τα οποία σχηματίζουν τους Συρμούς Μεταφοράς (TransportStreams). Μέσω των Συρμών Μεταφοράς μεταφέρονται τα δεδομένα βίντεο και ήχου, καθώς και άλλες πληροφορίες από τον πομπό στον δέκτη. Η δημιουργία των Συρμών Μεταφοράς λαμβάνει χώρα μεταξύ των βαθμίδων κωδικοποίησης του περιεχομένου (οι οποίες δημιουργούν τις στοιχειώδεις ροές του βίντεο και του ήχου) και των βαθμίδων που είναι υπεύθυνες για την κωδικοποίηση καναλιού, οι οποίες έχουν ως είσοδο τα πακέτα του Συρμού Μεταφοράς.

Τα πακέτα τα οποία σχηματίζουν τον Συρμό Μεταφοράς έχουν συγκεκριμένη δομή και αποτελούνται από 188 Bytes. Ο ίδιος ο συρμός έχει δομή η οποία καθορίζεται από τα προγράμματα και τις αντίστοιχες στοιχειώδεις ροές. Ο δέκτης πρέπει, χωρίς να έχει στη διάθεση του κάποια προηγούμενη πληροφορία αναφορικά με το πλήθος και τη δομή των προγραμμάτων, να ξεχωρίζει τα πακέτα που τον αφορούν κάθε χρονική στιγμή – τα πακέτα, δηλαδή, που αποτελούν το πρόγραμμα που έχει επιλέξει ο θεατής. Για να το πετύχει αυτό, έχει στη διάθεσή του κάποιους γενικούς κανόνες τους οποίους εφαρμόζει κατά τη λήψη των πακέτων του Συρμού Μεταφοράς.

Στα επόμενα θα εξετάσουμε τα βασικά θέματα της πολυπλεξίας ροών και προγραμμάτων, τη δομή ενός καναλιού καθώς και τον μηχανισμό αποπολυπλεξίας των πακέτων κατά τη λήψη.

Προαπαιτούμενη γνώση

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο είναι σε μεγάλο βαθμό αυτόνομο, αφού η μεθοδολογία δημιουργίας των Συρμών Μεταφοράς, καθώς και οι μηχανισμοί εισαγωγής των πινάκων που τον ορίζουν δεν απαιτούν κατανόηση των δεδομένων που τους αποτελούν. Ενδείκνυται γνώση της γενικής εικόνας του συστήματος και των επιμέρους βαθμίδων που το αποτελούν τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη, ώστε να γίνει αντιληπτή η σημασία της λειτουργικότητας που περιγράφουμε σε αυτό το κεφάλαιο.

5.1 Εισαγωγή

Αφού πραγματοποιηθεί η κωδικοποίηση του περιεχομένου, απαιτείται ένα πρότυπο και αντίστοιχα ένας μηχανισμός για την πακετοποίησή του ώστε αυτό να αποσταλεί ή να αποθηκευτεί. Το MPEG παρέχει δύο τέτοιους μηχανισμούς, το Program Stream (PS) και το Transport Stream (TS). Οι δύο μηχανισμοί ενθυλακώνουν τις επιμέρους στοιχειώδεις ροές (Elementary Stream, ES) μαζί με τα δεδομένα προληπτικής διόρθωσης σφαλμάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση τυχόν σφαλμάτων που προκαλούνται στο περιεχόμενο.

Ο πρώτος μηχανισμός, Program Stream (Συρμός Προγράμματος), χρησιμοποιείται κυρίως στην περίπτωση που έχουμε μειωμένο αριθμό σφαλμάτων όπως π.χ. κατά την τοπική αποθήκευση δεδομένων με την εγγραφή ενός CD ή DVD. Η περιορισμένη εμφάνιση σφαλμάτων οφείλεται στο ότι δεν εμπλέκεται κάποια μετάδοση δεδομένων. Οι Συρμοί Προγράμματος είναι κατάλληλοι για εφαρμογές που αξιοποιούν – επεξεργάζονται την πληροφορία συστήματος τοπικά. Ένας Συρμός Προγράμματος περιέχει ένα μόνο πρόγραμμα. Ως πρόγραμμα θεωρούμε τον συνδυασμό βίντεο, ήχου και άλλων ενδεχομένως πληροφοριών συστήματος σε μια ενιαία ροή, η οποία έχει κοινή βάση χρονισμού (timebase).

Και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιούνται πακέτα, μεταβλητού μήκους στην περίπτωση του Program Stream και σταθερού μήκους (και συγκεκριμένα στα 188 Bytes) στην περίπτωση του Transport Stream. Το σταθερό μήκος ενισχύει την προστασία από τα σφάλματα, αφού με όσο μεγαλύτερη αυστηρότητα ορίζεται η δομή και τα όρια των πακέτων τόσο πιο εύκολο καθίσταται το έργο του αποκωδικοποιητή και διευκολύνονται ο εντοπισμός και ο περιορισμός των τυχόν σφαλμάτων.

Ο συρμός μεταφοράς (MPEG Transport Stream) είναι ένας μηχανισμός ο οποίος συνδυάζει ένα ή περισσότερα προγράμματα, με ενδεχομένως διαφορετικές βάσεις χρονισμού, σε μία κοινή ακολουθία πακέτων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μετάδοση του περιεχομένου (για παράδειγμα στην επίγεια και τη δορυφορική τηλεόραση) αλλά και για την αποθήκευση αυτού. Ενδείκνυται για περιβάλλοντα στα οποία τα σφάλματα είναι πιθανά, όπως είναι κατεξοχήν η μετάδοση αλλά και σε κάποιες περιπτώσεις η αποθήκευση του περιεχομένου. Κατά βάση ο μηχανισμός αυτός χρησιμοποιείται για τα συστήματα ευρυεκπομπής συμπεριλαμβανομένων του Ευρωπαϊκού Digital Video Broadcasting (DVB), του Αμερικανικού ATSC αλλά και σε συστήματα IPTV. Το πρότυπο περιέχεται στο τμήμα των Συστημάτων του MPEG-2 Part 1 Systems (το οποίο είναι γνωστό και ως ISO/IEC standard 13818-1 ή ITU-T Rec. H.222.0) [34].

Επισημαίνεται ότι είναι δυνατή η μετατροπή από την μία μορφή στην άλλη και αντίστροφα. Κατά κανόνα βέβαια ο Συρμός Μεταφοράς περιλαμβάνει περισσότερα πεδία και έχει, όπως θα δούμε, πιο αυστηρή δομή σε σχέση με το Συρμό Προγράμματος και αυτό επιβάλλει περιορισμούς κατά την μετατροπή από PS σε TS. Ο επόμενος πίνακας κάνει μια σύντομη σύγκριση των χαρακτηριστικών των δύο ειδών συρμών (Προγράμματος και Μεταφοράς).

Κριτήριο	Συρμοί Προγράμματος	Συρμοί Μεταφοράς
Κύρια εφαρμογή	Αποθήκευση	Μετάδοση, ευρυεκπομπή
Πλήθος προγραμμάτων που περιέχονται	Ένα	Ένα ή περισσότερα
Ευρωστία στα σφάλματα που αφορούν τη μετάδοση ή την αποθήκευση	Περιορισμένη	Ικανοποιητική
Χρήση πακέτων συγκεκριμένου μήκους	Όχι	Ναι
Χρήση πολυπλεξίας	Ναι	Ναι
Συμβατότητα με τους μηχανισμούς αποκωδικοποίησης των SetTopboxes	Όχι	Ναι

Πίνακας 5.1 Σύγκριση χαρακτηριστικών Συρμού Προγράμματος και Συρμού Μεταφοράς.

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε κατά κύριο λόγο τη δομή και τον τρόπο λειτουργίας του Συρμού Μεταφοράς, αφού αυτός είναι που χρησιμοποιείται στα συστήματα Ψηφιακής Τηλεόρασης.

5.2 Στοιχειώδεις Ροές και Πολυπλεξία

5.2.1 Στοιχειώδεις Ροές και Τεμαχισμός σε Πακέτα

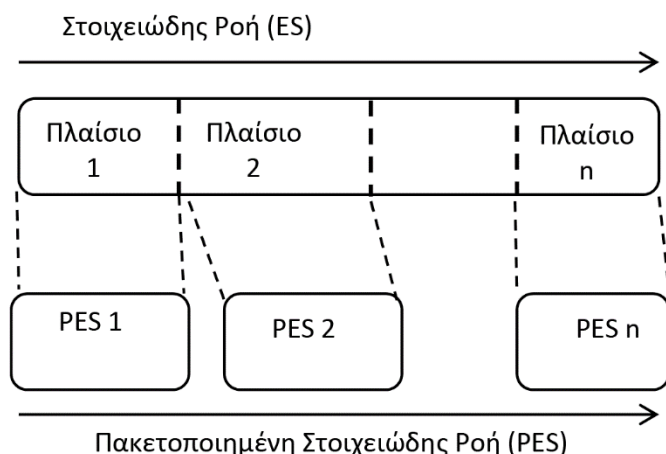
Αφού πραγματοποιηθεί η κωδικοποίηση του βίντεο και του ήχου προκύπτουν ροές δεδομένων, οι οποίες ονομάζονται στοιχειώδεις ροές (Elementary Streams, ES) (35). Οι ροές αυτές αποτελούν ουσιαστικά την έξοδο των κωδικοποιητών και είναι μια συνεχής ροή bits (bitstream). Οι στοιχειώδεις ροές αποτελούνται από μονάδες πρόσβασης. Ως μονάδα πρόσβασης θεωρούμε την κωδικοποιημένη αναπαράσταση είτε ενός πλαισίου ήχου στην περίπτωση του ήχου, είτε μιας εικόνας και των δεδομένων που τη συνοδεύουν, στην περίπτωση της εικόνας και του βίντεο. Ο ρυθμός των στοιχειωδών ροών δύναται να είναι σταθερός ή μεταβλητός. Αυτό εξαρτάται από τις ιδιότητες και τη λειτουργία του κωδικοποιητή. Η στοιχειώδης ροή δεν είναι κατάλληλη για μετάδοση αφού δεν είναι χωρισμένη σε πακέτα, δεν περιέχει πληροφορίες του προγράμματος και δεν μπορεί να πολυπλεχθεί με άλλες ροές (στην τρέχουσα μορφή της).

Το περιεχόμενο των στοιχειωδών ροών ξεφεύγει από τους στόχους αυτού του κεφαλαίου, αφού οι μηχανισμοί που περιγράφουμε δεν λαμβάνουν υπόψη το περιεχόμενο αυτό (όσον αφορά, για παράδειγμα, τη λογική του δομή, τα όριά του). Μια στοιχειώδης ροή μπορεί να περιέχει άλλα δεδομένα, πέρα από το κωδικοποιημένο βίντεο και ήχο, αλλά σε κάθε περίπτωση μια στοιχειώδης ροή περιέχει ένα μόνο είδος δεδομένων.

Θεωρούμε, σύμφωνα με το σχετικό πρότυπο, ότι ένα πρόγραμμα αποτελείται από στοιχειώδεις ροές οι οποίες έχουν κοινή βάση χρονισμού. Στην περίπτωση της Ροής Μεταφοράς όπου πολυπλέκονται ροές οι οποίες δημιουργούν διαφορετικά προγράμματα, τα προγράμματα αυτά έχουν διαφορετικές (ανεξάρτητες μεταξύ τους) βάσεις χρονισμού. Ο συγχρονισμός καθορίζεται από ειδικά πεδία χρονισμού, τα πεδία αναφοράς ρολογιού προγράμματος (Program Clock Reference, PCR).

Τα συνεχή δεδομένα των στοιχειωδών ροών τεμαχίζονται σε πακέτα ώστε να δώσουν τις Πακετοποιημένες Στοιχειώδεις Ροές (Packetized Elementary Streams, PES). Συνήθως η τομή γίνεται στα όρια των πλαισίων και κάθε πλαίσιο αντιστοιχεί σε ένα PES packet. Αυτό συνεπάγεται ότι τα πακέτα PES δεν έχουν σταθερό μήκος.

Η διαδικασία αυτή αναπαρίσταται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 5.1 Τεμαχισμός περιεχομένου στοιχειώδους ροής σε πακέτα.

Κάθε Packetized Elementary Stream (PES) προέρχεται από ένα και μόνο Elementary Stream.

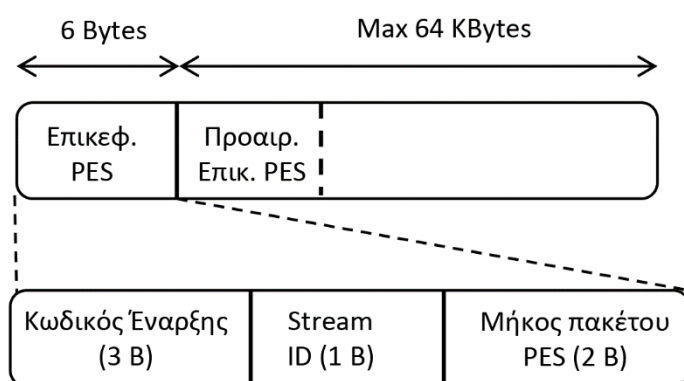
5.2.2 Πακέτα PES

Ένα πακέτο PES αποτελείται από την επικεφαλίδα (header) και τα δεδομένα που το αποτελούν. Τα πακέτα PES είναι μεταβλητού μεγέθους και εν γένει έχουν μήκος μέχρι 64 KBytes. Η επικεφαλίδα ενός πακέτου PES ξεκινά με έναν κωδικό έναρξης μήκους 24 bits, ο οποίος έχει την τιμή «0x00 00 01» και δείχνει την έναρξη του πακέτου PES. Το Byte το οποίο ακολουθεί τον κωδικό έναρξης είναι ο κωδικός της ροής (streamID) και

δείχνει τη ροή από την οποία προέρχεται το PES πακέτο ή τον τύπο αυτής της ροής (video, ήχο, δεδομένα). Η επικεφαλίδα συμπληρώνεται με ένα πεδίο μήκους 2 Bytes, το οποίο δίνει το μήκος του τμήματος πληροφοριών του πακέτου. Στην περίπτωση που το πεδίο αυτό έχει μηδενική τιμή (και τα δύο Bytes, δηλαδή, είναι μηδέν), τότε δύναται το μήκος του φορτίου να είναι μεγαλύτερο από τα 64 Kbytes, οπότε ο αποκωδικοποιητής πρέπει να χρησιμοποιήσει άλλα μέσα για το διαχωρισμό των πακέτων (π.χ. τον κωδικό έναρξης).

Η υποχρεωτική επικεφαλίδα του πακέτου PES ακολουθείται από μια προαιρετική επικεφαλίδα η οποία περιέχει πεδία και ανήκει στο πεδίο δεδομένων. Η προαιρετική αυτή επικεφαλίδα του πακέτου PES δύναται να περιέχει πληροφορίες χρονισμού για την αποκωδικοποίηση και την παρουσίαση (Decoding Time Stamps, DTS και Presentation Time Stamps, PTS), καθώς και μια σειρά από προαιρετικά πεδία.

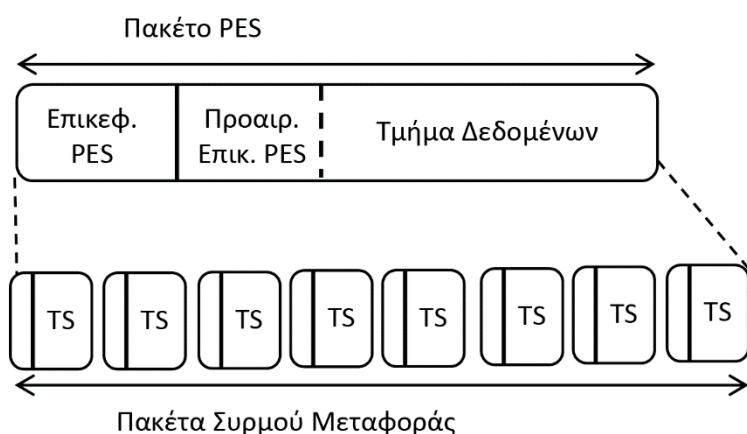
Η δομή του πακέτου παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 5.2 Δομή πακέτου PES.

Το τμήμα των δεδομένων του πακέτου PES αποτελείται από συνεχόμενα δεδομένα που προέρχονται από τη στοιχειώδη ροή. Λόγω της ευελιξίας που παρέχει ο μηχανισμός δημιουργίας πακέτων PES, τα πακέτα που δημιουργούνται δεν είναι κατάλληλα για απευθείας αποστολή και μετάδοση δεδομένων.

Για τον σκοπό αυτό τα πακέτα χωρίζονται σε άλλα μικρότερα πακέτα τα οποία έχουν αυστηρά σταθερό μήκος. Το πακέτο PES εισάγεται εντός του πακέτου του Συρμού Μεταφοράς (TS), όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα:



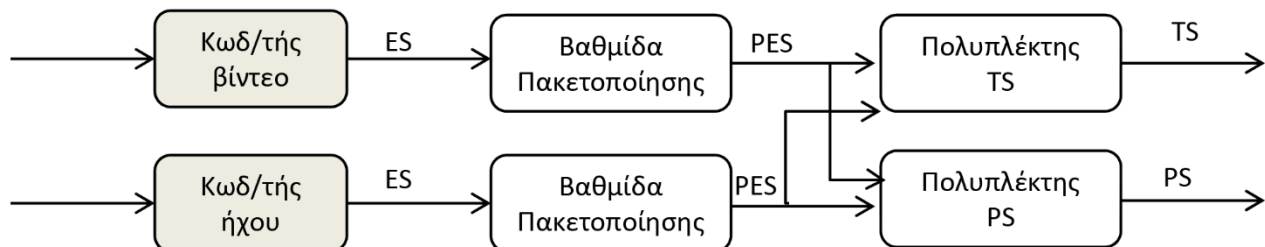
Εικόνα 5.3 Δημιουργία πολλαπλών πακέτων TS από ένα πακέτο PES.

Το πακέτο TS αποτελείται από επικεφαλίδα και το τμήμα των δεδομένων. Η επικεφαλίδα του PES τοποθετείται στην αρχή του τμήματος δεδομένου του πακέτου TS.

5.3 Πολυπλεξία

Οι Πακετοποιημένες Στοιχειώδεις Ροές (Packetized Elementary Streams, PES) πολυπλέκονται μεταξύ τους καθώς και με πληροφορία που αφορά το σύστημα ώστε να δώσουν ένα Transport Stream (TS) ή ένα Program Stream (PS).

Η διαδικασία αυτή αναπαρίσταται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 5.4 Πολυπλεξία στοιχειωδών ροών.

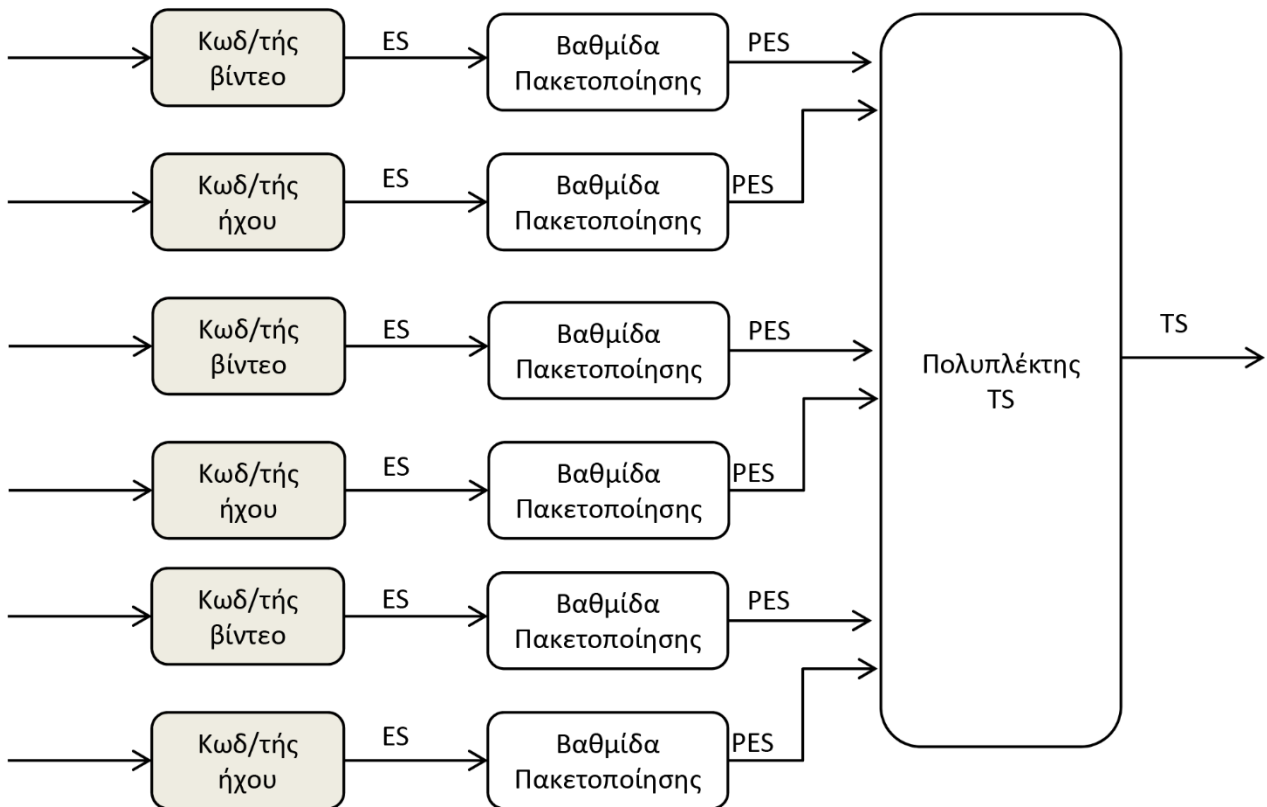
Όπως φαίνεται και στο ανωτέρω σχήμα, κάθε Packetized Elementary Stream (PES) προέρχεται από ένα και μόνο Elementary Stream (ES). Οι δύο πολυπλέκτες δημιουργούν τα πακέτα, Transport Stream packets και Program Stream packets, αντίστοιχα.

Διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις αναφορικά με το πλήθος των προγραμμάτων που περιέχονται σε έναν συρμό μεταφοράς:

- Όταν το TS περιέχει ένα μόνο πρόγραμμα λέγεται Single Program Transport Stream (SPTS).
- Ένα TS με περισσότερα από ένα προγράμματα λέγεται Multi Program Transport Stream.

Για παράδειγμα, ένα TS μπορεί να περιέχει τρία προγράμματα, δηλαδή τρία τηλεοπτικά προγράμματα, καθώς και ένα ραδιοφωνικό.

Η πλέον τυπική περίπτωση είναι ο συρμός μεταφοράς (TS) να περιλαμβάνει περισσότερα από ένα προγράμματα, οπότε η διαδικασία της πολυπλεξίας καθίσταται πιο πολύπλοκη, όπως απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 5.5 Πολυπλεξία πολλαπλών προγραμμάτων για τη δημιουργία του TS.

Στο επόμενο σχήμα αναπαρίσταται η αλληλουχία πακέτων, στην απλή περίπτωση όπου περιλαμβάνεται ένα μόνο πρόγραμμα, το οποίο αποτελείται από μία ροή βίντεο και δύο ροές ήχου. Επίσης κάποια πακέτα αφορούν τις πληροφορίες του προγράμματος. Κάθε ένα από τα είδη πακέτων αντιστοιχούν σε ένα PID (στο αντίστοιχο πεδίο στην επικεφαλίδα της ροής) και στο σχήμα παρίσταται με διαφορετικό χρωματισμό.



Εικόνα 5.6 Αλληλουχία πακέτων TS στην περίπτωση ροής μεταφοράς η οποία περιλαμβάνει ένα πρόγραμμα.

Στην περίπτωση που η ροή μεταφοράς περιλαμβάνει περισσότερα από ένα προγράμματα, κάθε ένα από τα οποία αποτελείται από μία ή περισσότερες ροές, η κατάσταση γίνεται περισσότερο σύνθετη (λόγω του αυξημένου πλήθους των περιεχόμενων ροών).

Μια τέτοια πιο περίπλοκη αλληλουχία πακέτων, όπου η ροή μεταφοράς περιέχει τέσσερα προγράμματα, παρίσταται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 5.7 Αλληλουχία πακέτων TS στην περίπτωση ροής μεταφοράς η οποία περιλαμβάνει τέσσερα προγράμματα.

Στην περίπτωση της προηγούμενης εικόνας περιλαμβάνονται τέσσερα προγράμματα, τα οποία αποτελούνται από διακριτές ροές και επιπλέον έχουμε και τις πληροφορίες που αφορούν τα δεδομένα καναλιού και προγραμμάτων.

Συγκεκριμένα:

- Πρόγραμμα 1, το οποίο περιλαμβάνει μία ροή βίντεο, μία ήχου και μία ροή δεδομένων.
- Πρόγραμμα 2, το οποίο περιλαμβάνει μία ροή βίντεο, μία ήχου και μία ροή δεδομένων.
- Πρόγραμμα 3, το οποίο περιλαμβάνει μία ροή βίντεο και δύο ροές ήχου.
- Πρόγραμμα 4, το οποίο περιλαμβάνει μία ροή βίντεο και μία ροή δεδομένων.
- Ροή δεδομένων καναλιού και προγραμμάτων.

Στον επόμενο πίνακα συνοψίζουμε τις απαιτήσεις για τη δημιουργία των συρμών μεταφοράς από την πλευρά του πομπού (και συγκεκριμένα του πολυπλέκτη).

A/A	Όνομα	Περιγραφή
1	Πλήθος προγραμμάτων	Εύρεση του πλήθους των προγραμμάτων που περιέχονται εντός ενός TS
2	Λήψη πακέτων προγράμματος	Εντοπισμός και λήψη των πακέτων που αντιστοιχούν σε ένα πρόγραμμα
3	Στοιχειώδεις ροές προγράμματος	Εύρεση του πλήθους και των χαρακτηριστικών των στοιχειωδών ροών που ανήκουν σε ένα πρόγραμμα
4	Λήψη πακέτων στοιχειώδους ροής	Εντοπισμός και λήψη των πακέτων που αντιστοιχούν στη στοιχειώδη ροή ενός προγράμματος με στόχο την ανασύνθεση του περιεχομένου της στοιχειώδους ροής και στη συνέχεια της αποκωδικοποίησης αυτής
5	Ορισμός χρονικού σημείου	Ορισμός του χρονικού σημείου κατά το οποίο πρέπει να λάβουν χώρα διάφορες ενέργειες.
6	Συγχρονισμός Πακέτων	Χρήση πληροφορίας συγχρονισμού, ώστε να είναι δυνατή η συγχρονισμένη παρουσίαση του περιεχομένου μιας στοιχειώδους ροής στο πλαίσιο ενός προγράμματος
7	Διαχείριση προσωρινής μνήμης (buffering)	Διαχείριση της προσωρινής μνήμης και αρχικοποίηση αυτής κατά την έναρξη της διαδικασίας αποκωδικοποίησης
8	Αντιμετώπιση Σφαλμάτων	Αντιμετώπιση σφαλμάτων που συμβαίνουν στα περιεχόμενα ενός προγράμματος

Πίνακας 5.2 Απαιτήσεις για τη διαχείριση του περιεχομένου ενός Συρμού Μεταφοράς εκ μέρους του πομπού.

Η πολυπλεξία MPEG-2 είναι Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου (Time Division Multiplexing, TDM). Αυτό σημαίνει ότι δεν εκπέμπεται κάθε πρόγραμμα σε διαφορετική συχνότητα (όπως στην πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας FDM) αλλά τα πακέτα των διαφόρων ροών συνδυάζονται και μεταδίδονται διαδοχικά.

Το αποτέλεσμα είναι ένα σύνθετο MPEG-2 Transport Stream (Multi Program Transport Stream, MPTS) το οποίο αποτελεί και το σήμα βασικής ζώνης στην τελική του μορφή για την ψηφιακή τηλεόραση.

Ο συνολικός ρυθμός της πολυπλεξίας ισούται με το άθροισμα των ρυθμών (bitrate) των ροών εισόδου. Το συνηθέστερο όμως είναι ο πολυπλέκτης να λειτουργεί σε έναν σταθερό ρυθμό εξόδου (μεγαλύτερο ή ίσο του αθροίσματος), ακόμη και αν οι ροές εισόδου έχουν μεταβλητό ρυθμό. Στην περίπτωση αυτή προστίθενται από τον πολυπλέκτη κενά πακέτα για να αναπληρώσουν τη διαφορά.

Στα επόμενα θα εξετάσουμε το μηχανισμό ο οποίος καθοδηγεί τον πομπό (βαθμίδα πολυπλεξίας) να δημιουργήσει τον συρμό μεταφοράς από τις επιμέρους στοιχειώδεις ροές και τον δέκτη (βαθμίδα αποπολυπλεξίας) να αποπλέξει τον λαμβανόμενο συρμό μεταφοράς σε αυτές τις στοιχειώδεις ροές.

Οι διαδικασίες αυτές γίνονται με τη βοήθεια των πληροφοριών συστήματος και των αντίστοιχων πινάκων (Program Specific Information, PSI).

5.4 Δομή Πακέτων Συρμού Μεταφοράς και Πίνακες Πληροφοριών

Όπως συζητήσαμε παραπάνω ένας Συρμός Μεταφοράς αποτελείται από ένα ή περισσότερα προγράμματα και κάθε ένα από αυτά αποτελείται από πακετοποιημένες στοιχειώδεις ροές (PES).

5.4.1 Πακέτα Συρμού Μεταφοράς

Ένα πακέτο TS αποτελείται από το τμήμα επικεφαλίδας και το τμήμα των δεδομένων. Το συνολικό μήκος είναι αυστηρά 188 Bytes. Εξ αυτών η επικεφαλίδα έχει μήκος 4 Bytes. Τα υπόλοιπα 184 Bytes αποτελούν το φορτίο και προέρχονται από το πακέτο PES. Κάποια πακέτα TS είναι δυνατόν να είναι κενά περιεχομένου. Τα πακέτα αυτά χρησιμοποιούνται για να συμπληρώσουν μια ροή μεταφοράς (padding). Τέτοιου είδους πακέτα γίνονται αντιληπτά από την πλευρά του δέκτη, χωρίς βέβαια να λαμβάνεται υπόψη το περιεχόμενό τους.

Στον επόμενο πίνακα περιγράφουμε τα πεδία που αποτελούν την επικεφαλίδα ενός πακέτου Transport Stream, καθώς και το πλήθος των bits από τα οποία αυτά αποτελούνται.

A/A	Όνομα	Πλήθος bits	Περιγραφή
1	Sync_byte(Byte συγχρονισμού)	8	Πεδίο συγχρονισμού με σταθερή τιμή '0100 0111' (0x47): Απέχει 188 Bytes, στην έναρξη δηλαδή κάθε πακέτου του Transport Stream. Η σταθερή τιμή και απόσταση του πεδίου συγχρονισμού βοηθούν στο συγχρονισμό, ο οποίος λαμβάνει χώρα κάθε 5 πακέτα TS. Ας σημειωθεί ότι ενδέχεται να υπάρχουν ένα ή περισσότερα Bytes εντός του πακέτου, τα οποία να έχουν την ίδια τιμή. Για την επιβεβαίωση ότι αυτό είναι το Byte συγχρονισμού ο δέκτης ελέγχει για 5 πακέτα τα Bytes τα οποία απέχουν κατά $n \cdot 188$ (όπου n από 1 έως 5). Εάν και αυτά έχουν την τιμή 0x47 τότε θεωρεί ότι πρόκειται περί Byte συγχρονισμού. Θεωρούμε ότι έχουμε απώλεια του συγχρονισμού μετά την απώλεια 3 πακέτων.
2	Transport_error_indicator (Σημαία ένδειξης σφάλματος)	1	Σημαία ένδειξης σφάλματος ενός bit: Στην περίπτωση που έχει την τιμή 1, δείχνει ότι υπάρχει κατ' ελάχιστον ένα εσφαλμένο bit το οποίο δεν μπορεί να διορθωθεί στο πακέτο TS. Η τιμή του πεδίου δύναται να αλλάξει από οντότητες εκτός του επιπέδου μεταφοράς. Η επαναφορά από το 1 στο 0 γίνεται μόνο στην περίπτωση που έχει διορθωθεί το σφάλμα. Εάν το σφάλμα δεν έχει διορθωθεί ο αποκωδικοποιητής πρέπει να αγνοήσει όλο το πακέτο.
3	Payload_unit_start_indicator (Ένδειξη έναρξης πακέτου)	1	Πεδίο το οποίο έχει διαφορετική σημασία ανάλογα με το είδος των δεδομένων που μεταφέρει το πακέτο TS και συγκεκριμένα εάν είναι τύπου PES ή PSI. Στην πρώτη περίπτωση, η τιμή 1 δείχνει ότι εκκινεί ένα PES πακέτο. Ομοίως στη δεύτερη περίπτωση (όπου έχουμε δεδομένα τύπου PSI), εάν το πεδίο έχει την τιμή 1 δείχνει ότι το πακέτο TS περιέχει τα αρχικά δεδομένα του PSI.

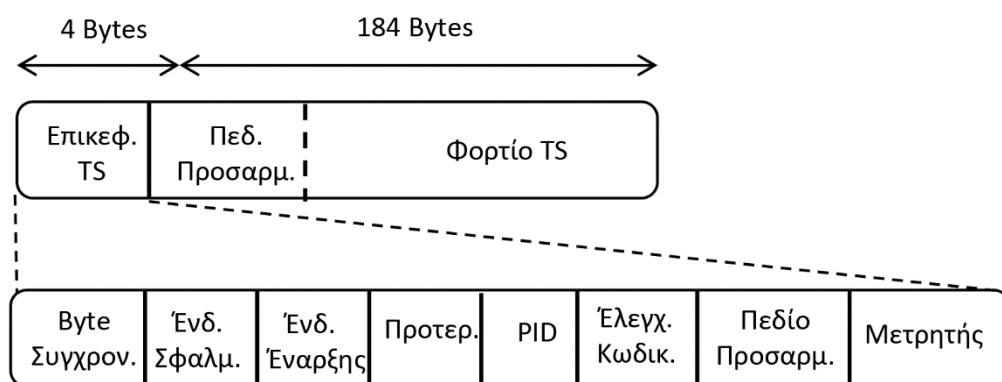
4	Transport_priority (Προτεραιότητα πακέτου)	1	Πεδίο το οποίο αφορά την προτεραιότητα του πακέτου σε σχέση με άλλα πακέτα τα οποία έχουν το ίδιο PID, στην περίπτωση που το συγκεκριμένο πεδίο έχει την τιμή 1. Η τιμή του πεδίου αυτού μπορεί να αλλάξει από κωδικοποιητή ή αποκωδικοποιητή (στα άκρα δηλαδή της αλυσίδας και όχι ενδιάμεσα).
5	PID (Κωδικός στοιχειώδους ροής)	13	Το πεδίο PID έχει μεγάλη σημασία και δείχνει τον τύπο των δεδομένων που περιέχονται εντός του πακέτου. Υπάρχουν δεσμευμένες τιμές του PID αλλά και διαθέσιμες για να αντιστοιχιστούν στις στοιχειώδεις ροές.
6	Transport_scrambling_control (Πεδίο ελέγχου κρυπτογράφησης)	2	Πεδίο το οποίο δείχνει κατά πόσο το περιεχόμενο είναι κρυπτογραφημένο (scrambled). Στην περίπτωση της τιμής 00, το περιεχόμενο δεν είναι κρυπτογραφημένο.
7	Adaptation_field_control (Πεδίο προσαρμογής)	2	Πεδίο το οποίο δείχνει κατά πόσο η επικεφαλίδα του πακέτου TS ακολουθείται από πεδίο προσαρμογής (adaptation field) μαζί με το τμήμα δεδομένων. Το πεδίο προσαρμογής αποτελεί προέκταση του πεδίου της επικεφαλίδας και συμπεριλαμβάνεται μόνο αν απαιτείται.
8	Continuity_counter (Μετρητής)	4	Μετρητής του οποίου η τιμή αυξάνει για κάθε πακέτο με το ίδιο PID. Ο μετρητής επιστρέφει στο 0 μετά τη μέγιστη τιμή. Ο μετρητής παραμένει ο ίδιος μόνο στην περίπτωση πανομοιότυπων πακέτων.

Πίνακας 5.3 Πεδία επικεφαλίδας πακέτου TS.

Καταλαβαίνουμε ότι τα πακέτα TS είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, δεν υπάρχει δηλαδή τρόπος να μπορέσει ο δέκτης να προβλέψει τι είδους δεδομένα θα αποσταλούν στο επόμενο πακέτο. Η σύνδεση του περιεχομένου των πακέτων καθορίζεται μόνο με τη βοήθεια του πεδίου PID. Το γεγονός αυτό από την μία προσδίδει ευελιξία και επεκτασιμότητα (όσον αφορά τους τύπους των δεδομένων που θα περιέχονται εντός του πακέτου).

Από την άλλη, όμως, εξαναγκάζει τον δέκτη να πρέπει να ελέγχει το σύνολο των πακέτων, ώστε να επιλέγει αυτά που τον ενδιαφέρουν. Επιπλέον, δεν είναι δυνατόν κάποιο σχήμα προτεραιοποίησης των πακέτων όσον αφορά τον έλεγχο λαθών. Μπορούμε να πούμε ότι ο μηχανισμός δημιουργίας των πακέτων TS ομοιάζει με αυτόν της δημιουργίας πακέτων στα δίκτυα ATM (Asynchronous Transfer Mode, ATM), όπου τα πακέτα έχουν σταθερό μήκος 53 Bytes εκ των οποίων η επικεφαλίδα είναι 5 Bytes.

Τα πεδία της επικεφαλίδας αναπαρίστανται γραφικά στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 5.8 Δομή πακέτου TS.

Παρατηρούμε ότι μεταξύ άλλων πεδίων η επικεφαλίδα περιλαμβάνει το PacketID (PID), το οποίο αποτελείται από 13 bits. Το πεδίο PID καθορίζει, με τη βοήθεια ενός πίνακα που παρέχει πληροφορία ειδικά για το εκάστοτε πρόγραμμα (Program Specific Information, PSI), το είδος του περιεχομένου του πακέτου TS. Πακέτα TS, των οποίων η επικεφαλίδα περιέχει το ίδιο PID, περιέχουν δεδομένα τα οποία προέρχονται από την

ίδια στοιχειώδη ροή. Είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τις δεσμευμένες τιμές, αφού, όπως θα δούμε και παρακάτω, αυτές μας καθοδηγούν στο να εντοπίσουμε τα πακέτα που μας ενδιαφέρουν.

5.4.2 Πίνακες Πληροφοριών

Οι πληροφορίες προγράμματος χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία του μηχανισμού πολυπλεξίας (στον πομπό) και αποπολυπλεξίας (στον δέκτη). Απαιτούνται επειδή οι συρμοί μεταφοράς αποτελούνται, δυνητικά, από πολλαπλά προγράμματα και κάθε ένα από αυτά αποτελείται από πολλαπλές στοιχειώδεις ροές. Τα πακέτα που ανήκουν σε καθεμία εξ αυτών χαρακτηρίζονται από διαφορετικό PID.

Το ερώτημα όμως που προκύπτει είναι το εξής. *Αφού κάθε στοιχειώδης ροή χαρακτηρίζεται από ένα PID, πώς θα καταλάβει ο αποκωδικοποιητής ποια PID πρέπει να συνδυαστούν μαζί ώστε να δώσουν ένα πρόγραμμα.* Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα στηρίζεται στην ύπαρξη πινάκων οι οποίοι περιέχουν τη σχετική πληροφορία.

Εκτός από τις ροές ήχου και βίντεο, υπάρχουν και ροές οι οποίες περιέχουν μεταδεδομένα, πληροφορίες δηλαδή για τις υπόλοιπες ροές. Υπάρχουν δύο βασικά είδη μεταδεδομένων, τα οποία στοιχειοθετούν σχετικούς πίνακες. Συγκεκριμένα:

- Πίνακες πληροφορίας προγράμματος (Program Specific Information, PSI) οι οποίοι ορίζονται από το MPEG.
- Πίνακες πληροφορίας πρωτοκόλλου προγράμματος και συστήματος (Program and System Information Protocol, PSIP) οι οποίοι αφορούν το περιβάλλον της ψηφιακής τηλεόρασης.

5.4.2.1 Πίνακες Πληροφορίας Προγράμματος

Ας ξεκινήσουμε με τους πίνακες PSI, αυτούς δηλαδή που περιέχουν πληροφορίες σχετικές με τα προγράμματα (Program Specific Information). Δύο είναι οι πιο βασικοί εξ αυτών, οι PAT και PMT.

Ο πρώτος είναι ο Program Association Table (PAT) και ο δεύτερος ο Program Map Table (PMT). Ο επόμενος πίνακας παρουσιάζει τους βασικούς πίνακες πληροφοριών προγράμματος.

Όνομα	PID	Περιγραφή
Program Association Table	0x00	Συσχετίζει το εκάστοτε πρόγραμμα με τον αντίστοιχο πίνακα PMT (και συγκεκριμένα το PID των πακέτων που περιέχουν το PMT του προγράμματος). Ο πίνακας PAT μεταδίδεται ανά 0,5 sec και δείχνει ανά πάσα στιγμή την τρέχουσα δομή της ροής.
Program Map Table	Το PID του πίνακα αυτού περιγράφεται στον πίνακα PAT	Καθορίζει τα PID για τα στοιχεία (στοιχειώδεις ροές) που αποτελούν ένα πρόγραμμα.
Network Information Table	Το PID του πίνακα αυτού περιγράφεται στον πίνακα PAT	Καθορίζει παραμέτρους του δικτύου όπως οι συχνότητες FDM.
Conditional Access Table	0x01	Συσχετίζει μία ή περισσότερες ροές EMM με αντίστοιχα PID.
Transport Stream Description Table	0x02	Συσχετίζει μία ή περισσότερες περιγραφές τύπου TSDT με τον συρμό Μεταφοράς.

Πίνακας 5.4 Πίνακες πληροφοριών (PID και περιγραφή).

Επισημαίνεται ότι πέρα από τους προτυποποιημένους πίνακες ένας Συρμός Μεταφοράς είναι δυνατόν να φέρει επιπλέον ιδιωτικούς πίνακες, η δομή των οποίων δεν είναι προδιαγεγραμμένη από κάποιο πρότυπο, όπως το ISO/IEC 13818-1 που καθορίζει τους προαναφερθέντες πίνακες.

Ο Πίνακας Συσχέτισης Προγραμμάτων (PAT) έχει ένα σταθερό PID το οποίο είναι το 0x0000. Ο σκοπός του είναι να δίνει πληροφορίες για τα προγράμματα που περιέχονται στον συρμό μεταφοράς και παρέχει το PID για τους πίνακες που δίνουν πληροφορίες για τους πίνακες που περιγράφουν αυτά τα προγράμματα. Ενδέχεται να αποτελείται από ένα πακέτο με PID=0x0000 ή περισσότερα (ήτοι αυτά πρέπει να

συνδυαστούν). Κάθε πρόγραμμα χαρακτηρίζεται από έναν αριθμό (program_number) ο οποίος είναι ένας ακέραιος των 16bits.

Ένα υποσύνολο των πεδίων του PAT, φαίνεται στον επόμενο πίνακα:

Όνομα	Περιγραφή
Section length	Μήκος πίνακα (δεν είναι σταθερό, αφού το πλήθος των προγραμμάτων δεν είναι σταθερό).
Transport stream id	ID του Συρμού Μεταφοράς.
Version number	Αριθμός έκδοσης (αυξάνεται κατά 1 κάθε φορά που τροποποιείται το αντίστοιχο PAT).
Program number	Πεδίο 16 bits που καθορίζει το πρόγραμμα στο οποίο αφορά το program map PID. Μόνο στην περίπτωση που έχει την τιμή 0x0000 το PID αφορά το network PID.
Program map PID	Πεδίο 13 bits που καθορίζει το PID του πίνακα που αντιστοιχεί στο πρόγραμμα (κάθε πρόγραμμα έχει ένα μόνο program map PID).

Πίνακας 5.5 Πεδία πίνακα PAT.

Οι πίνακες που περιγράφουν τα προγράμματα είναι οι Πίνακες Αντιστοίχισης Προγραμμάτων (PMT, Program Map Tables). Ο αποκωδικοποιητής ψάχνει για πακέτα με PID ίσο με την τιμή που αναφέρεται στον πίνακα PAT. Οι πίνακες PMT περιγράφουν τις ροές που περιέχονται σε ένα πρόγραμμα, συμπεριλαμβανομένου και του PID τους. Οι αλλαγές στα προγράμματα αποτυπώνονται σε επικαιροποιημένες μορφές των πινάκων PMT.

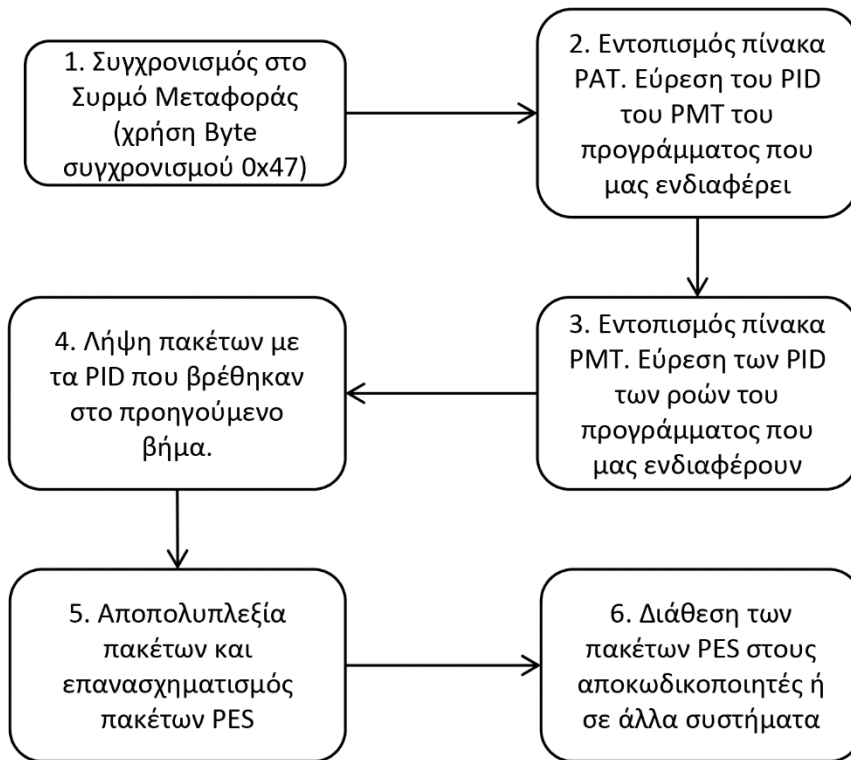
Ο πίνακας περιγραφής του Συρμού Μεταφοράς (Transport Stream Description Table) είναι προαιρετικός. Έχει PID=0x0002 και αφορά το σύνολο του Συρμού Μεταφοράς.

5.4.2.2 Μηχανισμός Εντοπισμού Στοιχειωδών Ροών

Η αλληλουχία των βημάτων που προβλέπονται από τον αποκωδικοποιητή, ώστε να εντοπίσει τα πακέτα που τον ενδιαφέρουν, είναι τα επόμενα:

- Συγχρονισμός στον Συρμό Μεταφοράς.
- Εντοπισμός πίνακα PAT. Εύρεση του PID του PMT του προγράμματος που μας ενδιαφέρει.
- Εντοπισμός πίνακα PMT. Εύρεση των PID των ροών του προγράμματος που μας ενδιαφέρουν (π.χ. PID 0x100 και 0x101).
- Λήψη πακέτων με τα PID που βρέθηκαν στο προηγούμενο βήμα (δηλαδή με PID 0x100 και 0x101).
- Αποπολυπλεξία πακέτων και επανασηματισμός πακέτων PES.
- Διάθεση των πακέτων PES στους αποκωδικοποιητές ή σε άλλα συστήματα. Στην περίπτωση του βίντεο και του ήχου η αποκωδικοποίηση μπορεί να γίνει απευθείας στα επανασηματιζόμενα πακέτα PES. Η μόνη περίπτωση όπου χρειάζεται επιπλέον επεξεργασία είναι όταν έχουμε κρυπτογράφηση.

Τα βήματα δίνονται συνοπτικά στο επόμενο σχήμα:



Εικόνα 5.9 Διαδικασία εύρεσης πακέτων ροών που ανήκουν σε συγκεκριμένο πρόγραμμα.

Επισημαίνεται ότι η δομή του συρμού μεταφοράς αλλά και η δομή ενός προγράμματος ενδέχεται να αλλάξει δυναμικά. Για τον λόγο αυτό ο αποκωδικοποιητής πρέπει να παρακολουθεί τις πληροφορίες που μεταδίδονται μέσω των πακέτων PAT και PMT. Ο εντοπισμός τυχόν διαφοροποιήσεων επιτυγχάνεται με την παρακολούθηση του αριθμού έκδοσης (versionnumber) ο οποίος περιέχεται στην επικεφαλίδα των πινάκων αυτών.

5.4.2.3 Ιδιωτικοί Πίνακες

Η έννοια των ιδιωτικών ενοτήτων και πινάκων (private sections και tables αντίστοιχα) χρησιμοποιείται από το MPEG ως μηχανισμός επέκτασης για την κάλυψη αναγκών που δεν καλύπτονται από το πρότυπο. Κάποιοι πίνακες, για παράδειγμα, δεν προτυποποιούνται από το MPEG αλλά από το DVB.

Ενδεικτικά περιλαμβάνονται οι επόμενοι:

- NIT Network Information Table
- SDT Service Descriptor Table
- BAT Bouquet Association Table
- EIT Event Information Table
- RST Running Status Table
- TDT Time & Date Table

Στη συνέχεια περιγράφουμε συνοπτικά τους πίνακες αυτούς, τις πληροφορίες που παρέχουν και τη σημασία που έχουν για τον δέκτη.

NIT – Network Information Table: Ο πίνακας πληροφοριών δικτύου (NIT) έχει PID 0x10 και περιγράφει τα χαρακτηριστικά του φυσικού διαύλου συμπεριλαμβανομένου του τρόπου μετάδοσης (terrestrial, δορυφορική, καλωδιακή), τη διαμόρφωση, τις παραμέτρους των αλγορίθμων προληπτικής διόρθωσης σφαλμάτων. Ο δέκτης λαμβάνει υπόψη του τις ανωτέρω παραμέτρους και τις αποθηκεύει για κάθε ένα από τα προγράμματα που αποκωδικοποιεί.

SDT– Service Descriptor Table: Ο πίνακας περιγραφής υπηρεσίας (SDT) περιλαμβάνει πληροφορίες για τα προγράμματα που μεταδίδονται, όπως, για παράδειγμα, τα ονόματά τους τα οποία και αντιστοιχούν στον αριθμό προγράμματος. Τα ονόματα είναι πιο εύχρηστα για τον χρήστη / θεατή.

BAT – Bouquet Association Table: Ο πίνακας συσχετισμού δέσμης (BAT) έχει το ίδιο PID με τον SDT (0x11). Ο SDT περιγράφει τις παραμέτρους ενός μόνο φυσικού καναλιού. Από την άλλη, ο BAT περιγράφει τις παραμέτρους ενός μπουκέτου καναλιών.

EIT – Event Information Table: Ο πίνακας πληροφοριών γεγονότων (EIT) περιλαμβάνει το EPG (Electronic Program Guide), δηλαδή τον προγραμματισμό των εκπομπών μαζί και τις σχετικές πληροφορίες που διατίθενται εκ μέρους των καναλιών.

RST – Running Status Table: Επειδή υπάρχουν διαφοροποιήσεις μεταξύ των προγραμματισμένων ωρών έναρξης και λήξης των διάφορων εκπομπών, υπάρχει ο πίνακας κατάστασης εκτέλεσης (Running Status Table) ο οποίος περιλαμβάνει πληροφορίες για την εκπομπή που λαμβάνεται εκείνη τη στιγμή.

TDT– Time & Date Table: Ο πίνακας ώρας και ημερομηνίας (Time & Date Table) μεταδίδει πληροφορίες για την ημερομηνία και την ώρα η οποία αναγνωρίζεται από τον αποκωδικοποιητή.

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζουμε τη συχνότητα (ελάχιστο και μέγιστο χρονικό διάστημα) με την οποία μεταδίδονται περιοδικά οι βοηθητικοί πίνακες, οι οποίοι προαναφέρθηκαν. Παρατηρούμε ότι ως ελάχιστο χρονικό διάστημα τίθεται ομοιόμορφα το διάστημα των 25 ms, ενώ στην περίπτωση του μέγιστου χρονικού διαστήματος έχουμε διαφοροποιήσεις.

Οι πλέον σημαντικοί πίνακες (όπως ο PAT, ο CAT και ο PMT) έχουν και το ελάχιστο άνω όριο στο χρονικό διάστημα αποστολής (συγκεκριμένα τα 0,5 s). Σε κάποιες περιπτώσεις το όριο αυτό μπορεί να ανέλθει σε υψηλές τιμές, όπως, για παράδειγμα, τα 30 s. Οι τιμές προέρχονται από το σχετικό πρότυπο.

Πίνακας	Ελάχιστο χρονικό διάστημα μετάδοσης (ms)	Μέγιστο χρονικό διάστημα μετάδοσης (s)
PAT	25	0.5
PMT	25	0.5
CAT	25	0.5
NIT	25	10
SDT	25	2
BAT	25	10
EIT	25	2
TDT	25	30

Πίνακας 5.6 Ελάχιστα και μέγιστα χρονικά διαστήματα μετάδοσης πινάκων.

Είναι ευνόητο ότι το πλήρες σύνολο των πινάκων μπορεί να μην υλοποιείται από κάποιο σταθμό ή ακόμη να μην αναγνωρίζεται από κάποιους αποκωδικοποιητές. Για παράδειγμα, ο πίνακας RST δεν χρησιμοποιείται στην πράξη στις περισσότερες πραγματικές μεταδόσεις.

5.4.3 Κρυπτογραφημένα Προγράμματα

Στην περίπτωση κρυπτογραφημένων προγραμμάτων (όπως, για παράδειγμα, συμβαίνει στη συνδρομητική τηλεόραση) οι στοιχειώδεις ροές (ή κάποιες εξ αυτών) μεταδίδονται κρυπτογραφημένες. Η αποκρυπτογράφηση απαιτεί τη χρήση συγκεκριμένων μεθοδολογιών και εξοπλισμού (υλικού). Επίσης, απαιτεί τη χρήση πληροφοριών οι οποίες μεταδίδονται εντός του Συρμού Μεταφοράς.

Συγκεκριμένα, η προσπέλαση στις πληροφορίες αυτές γίνεται μέσω ενός ειδικού πίνακα, ο οποίος ονομάζεται CAT, Conditional Access Table (Πίνακας Ελεγχόμενης Πρόσβασης). Ο πίνακας CAT παρέχει τα PID των πακέτων τα οποία μεταδίδονται εντός του συρμού. Αυτά τα πακέτα περιέχουν την πληροφορία αποκρυπτογράφησης. Η πληροφορία αυτή περιλαμβάνεται στα μηνύματα ελέγχου και διαχείρισης δικαιώματος (Entitlement Control και Management Message, ECM και EMM αντίστοιχα).

Κρυπτογράφηση μπορεί να γίνει μόνο στο περιεχόμενο των στοιχειωδών ροών και όχι στις επικεφαλίδες (ή στα πεδία προσαρμογής) των πακέτων του TS ή στους πίνακες που αυτό περιέχει. Η αποκρυπτογράφηση γίνεται μέσω της επεξεργασίας των κωδικοποιημένων ροών από ειδικό υλικό μέσω της

τυποποιημένης διεπαφής (CommonInterface, CI). Η αποκωδικοποίηση γίνεται με διάφορες τεχνικές, η ανάπτυξη των οποίων είναι εκτός των στόχων του συγκεκριμένου συγγράμματος.

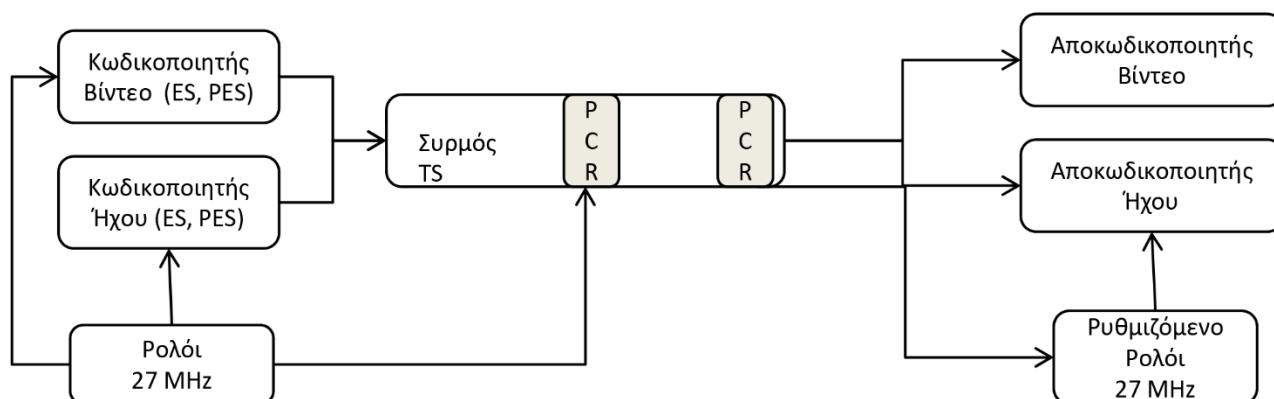
5.5 Συγχρονισμός και Εντοπισμός Σφαλμάτων

5.5.1 Συγχρονισμός Κωδικοποιητή – Αποκωδικοποιητή

Δεδομένου ότι το βίντεο και ο ήχος κωδικοποιούνται και αποστέλλονται ανεξάρτητα, υπάρχει ανάγκη για συγχρονισμό ήχου και βίντεο κατά τη διάρκεια της αναπαραγωγής. Για τον σκοπό αυτό τα ρολόγια του κωδικοποιητή και του αποκωδικοποιητή πρέπει να είναι συγχρονισμένα. Η τιμή της συχνότητας ρολογιού του συστήματος (system clock frequency) σε Hz ανέρχεται στα 27 MHz.

Ο μηχανισμός περιλαμβάνει τα εξής βήματα: Ένας ταλαντωτής στα 27 MHz δίνει την τιμή σε έναν μετρητή της ώρας του συστήματος (STC, System Time Clock) ο οποίος έχει 42 bits (και αρχικοποιείται στις 26.5 ώρες). Ο κωδικοποιητής και ο αποκωδικοποιητής χρησιμοποιούν ένα ρολόι 27 MHz, το οποίο είναι στην ουσία ένας μετρητής ο οποίος έχει βήμα $1/(27 \cdot 10^6)$ second.

Όταν ο κωδικοποιητής δημιουργεί τα πακέτα, ενσωματώνει την τιμή του ρολογιού στον συρμό. Αυτή η τιμή ονομάζεται αναφορά στο ρολόι του προγράμματος (Program Clock Reference, PCR). Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του MPEG υπεισέρχεται μια τιμή ρολογιού το πολύ κάθε 100 ms. Η πληροφορία χρονισμού και συγκεκριμένα στα πεδία Αναφοράς Ρολογιού Συστήματος(PCR) κωδικοποιείται ως ένα δείγμα της τιμής του ρολογιού του προγράμματος. Οι τιμές PCR μεταφέρονται μέσω του πεδίου προσαρμογής (Adaptation Field) του πακέτου TS.



Εικόνα 5.10 Μηχανισμός συγχρονισμού.

Οι διαδικασίες κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης ελέγχονται από την τιμή του ρολογιού. Ο δέκτης εξάγει την τιμή από τα πακέτα PCR και αντιπαραβάλλει τις ληφθείσες τιμές με αυτές του τοπικού ρολογιού. Στην περίπτωση διαφοροποίησης το τοπικό ρολόι πρέπει να επανασυγχρονιστεί (διαδικασία η οποία γίνεται με τη βοήθεια ενός βρόγχου κλειδώματος φάσης (PLL - Phase-Locked Loop).

Προβλήματα με τον συγχρονισμό του ρολογιού μπορεί να δημιουργηθούν είτε στον κωδικοποιητή (εσφαλμένη χρονοσήμανση) είτε στον αποκωδικοποιητή (χρήση της πληροφορίας χρονοσήμανσης) είτε και λόγω απώλειας των σχετικών πακέτων στο δίκτυο. Σε κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις έχουμε *PCR jitter*. Το jitter είναι η διαφορά μεταξύ της πραγματικής τιμής του ρολογιού στον αποκωδικοποιητή με την τιμή που αναμένεται από τον κωδικοποιητή σύμφωνα με τη χρονική στιγμή που λαμβάνεται το πακέτο και τις προηγούμενες τιμές του ρολογιού. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές οι ανεκτές τιμές είναι μέχρι τα 500 ns.

Κατά την πολυπλεξία πολλαπλών ροών, διαφοροποιείται η απόσταση μεταξύ των πακέτων PCR σε σχέση με τις αρχικές αποστάσεις του PCR, αφού αλλάζει η σειρά των πακέτων. Η διαφοροποίηση αυτή στην τοποθέτηση συνεπάγεται χρονική διαφοροποίηση. Για να αποφευχθεί το φαινόμενο αυτό, ο πολυπλέκτης πρέπει να εισάγει εκ νέου τις τιμές του PCR, η οποία είναι μια λειτουργία αρκετά δύσκολη.

Επιπλέον υπάρχει η περίπτωση να έχουμε διαφορά στη συχνότητα του ρολογιού στον αποκωδικοποιητή με βάση τις ληφθείσες PCR τιμές και τις τιμές ενός ιδεατού ρολογιού 27MHz. Η μέγιστη

διαφοροποίηση είναι στα $\pm 810\text{Hz}$. Ο δε ρυθμός μεταβολής της συχνότητας ρολογιού του συστήματος δεν πρέπει να υπερβαίνει τα $75 \cdot 10^{-3}\text{Hz/sec}$.

Για την επίτευξη συγχρονισμού μεταξύ βίντεο και ήχου, πληροφορία χρονισμού εισάγεται στα πακέτα PES βίντεο και ήχου. Αυτή η πληροφορία προέρχεται από το πεδίο STC και συγκεκριμένα είναι τα 33 πιο σημαντικά bits (Most Significant Bits, MSB).

Η πληροφορία αυτή καλείται *Presentation Time Stamp, PTS – Χρονοσήμανση παρουσίασης*. Κάθε πλαίσιο μαρκάρεται με ένα PTS, το οποίο είναι ένας θετικός αριθμός και προέρχεται από την τιμή του ρολογιού του κωδικοποιητή, όταν πραγματοποιείται η κωδικοποίηση. Καθώς τα πακέτα προσέρχονται στον αποκωδικοποιητή, υπάρχει μια θέση στη μνήμη για κάθε ροή, όπου αποθηκεύονται προσωρινά τα πακέτα του βίντεο και του ήχου. Όταν η τιμή του ρολογιού του αποκωδικοποιητή ταιριάζει με την τιμή του PTS του πλαισίου τότε το πλαίσιο αποστέλλεται στο υλικό του αποκωδικοποιητή. Ο δέκτης πρέπει να αποθηκεύει προσωρινά τον ήχο και το βίντεο μέχρι τη στιγμή της παρουσίασης.

Εάν τα δεδομένα εμφανίζονται με καθυστέρηση στον συρμό μεταφοράς, δεν προλαβαίνει να γεμίζει η προσωρινή μνήμη (buffer under flow), ενώ εάν έρχονται πολύ σύντομα έχουμε υπερχείλιση (buffer over flow). Και στις δύο περιπτώσεις έχουμε σφάλμα συγχρονισμού με αλλοίωση της ποιότητας του βίντεο. Στο PCR jitter ενδέχεται να οφείλονται και σφάλματα συγχρονισμού ήχου-εικόνας (lip synch).

Κλείνουμε την ενότητα του συγχρονισμού αναφέροντας την ύπαρξη της χρονοσήμανσης αποκωδικοποίησης (DTS, Decoding Time Stamps). Η πληροφορία αυτή απαιτείται από τον αποκωδικοποιητή ώστε να είναι σε θέση να επαναφέρει τα πακέτα που λαμβάνει στη σειρά με την οποία έγινε η κωδικοποίηση. Όπως θα δούμε σε κάποιες περιπτώσεις, η σειρά κωδικοποίησης δεν είναι η ίδια με τη σειρά αποστολής και λήψης των πακέτων.

5.5.2 Εντοπισμός Σφαλμάτων

Ο εντοπισμός σφαλμάτων γίνεται με τη βοήθεια ενός μετρητή συνέχειας, ο οποίος ονομάζεται Continuity Counter. Κάθε πακέτο του Συρμού Μεταφοράς με το ίδιο PID φέρει έναν μετρητή με μήκος 4 bit. Ο μετρητής αυτός λαμβάνει συνεχόμενες τιμές, συγκεκριμένα από το 0 έως το 15, από πακέτο σε πακέτο (του Συρμού Μεταφοράς). Στη συνέχεια επανεκκινεί από το μηδέν.

Με τη βοήθεια του μετρητή αυτού μπορεί ο δέκτης να αναγνωρίσει την απώλεια πακέτων αλλά και να αναγνωρίσει μια ροή με σφάλματα (όπου, για παράδειγμα, οι τιμές του μετρητή μπορεί να έχουν ασυνέχεια).

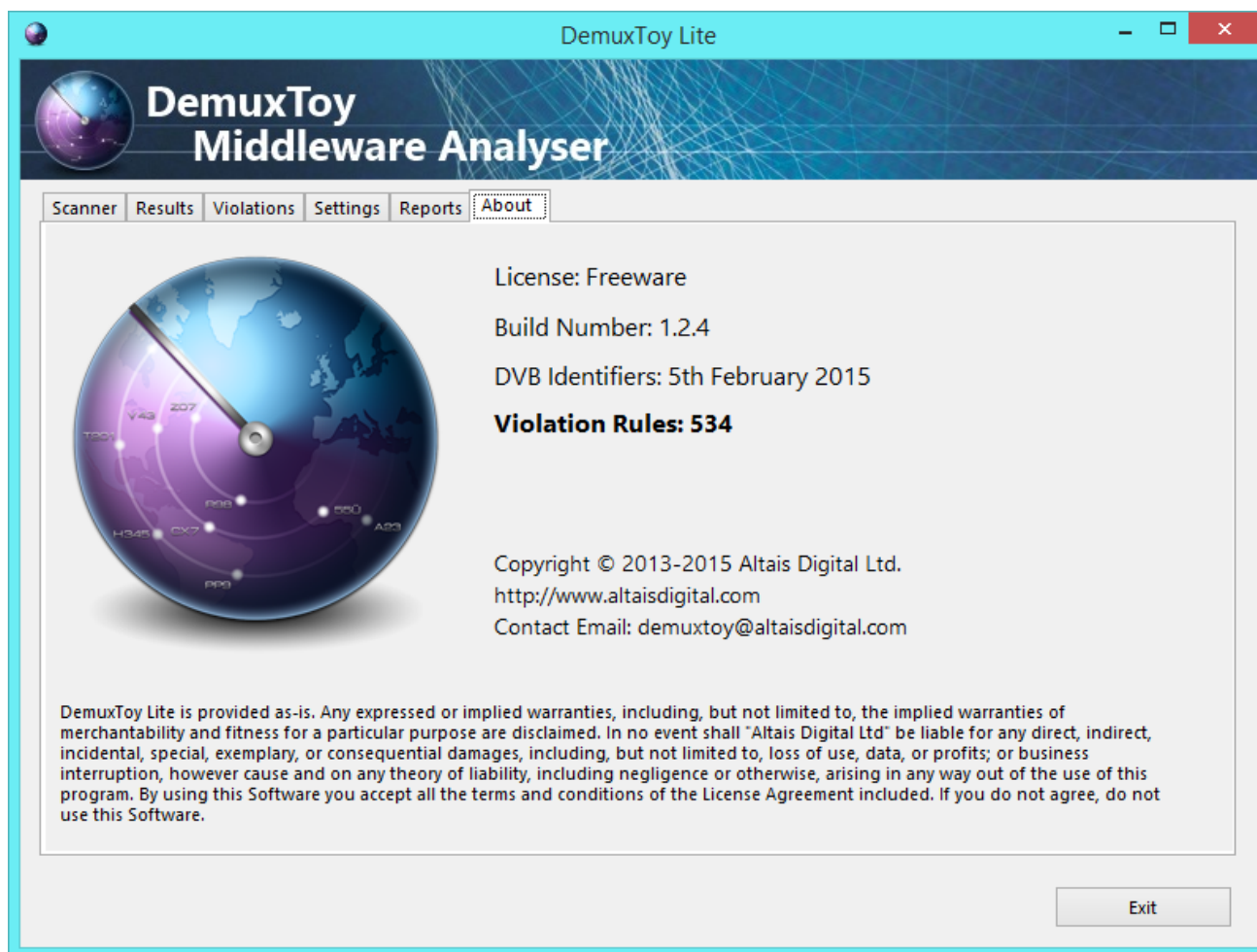
Ας σημειωθεί ότι υπάρχει περίπτωση ασυνέχειας, όταν έχουμε αιφνίδια αλλαγή προγράμματος, για παράδειγμα, λόγω σχετικής επιλογής του χρήστη. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει σχετικό πεδίο, ένδειξη ασυνέχειας, Discontinuity Indicator, στο πεδίο προσαρμογής.

5.6 Παραδείγματα

Στην ενότητα αυτή θα εξετάσουμε ένα από τα διαθέσιμα προγράμματα τα οποία είναι σε θέση να χειρίζονται Συρμούς Μεταφοράς (DVB / MPEG Transport Stream). Ο αναγνώστης καλείται να κάνει τη δική του έρευνα και αξιολόγηση των διαθέσιμων προγραμμάτων.

5.6.1 Εντοπισμός Συρμού Μεταφοράς

Το εργαλείο το οποίο επιλέξαμε για την αναγνώριση των περιεχόμενων ροών ονομάζεται «Demux Τοy Middleware Analyzer» και διατίθεται εδώ (36). Το γραφικό του περιβάλλον και η άδεια χρήσης παρίστανται στην επόμενη εικόνα.



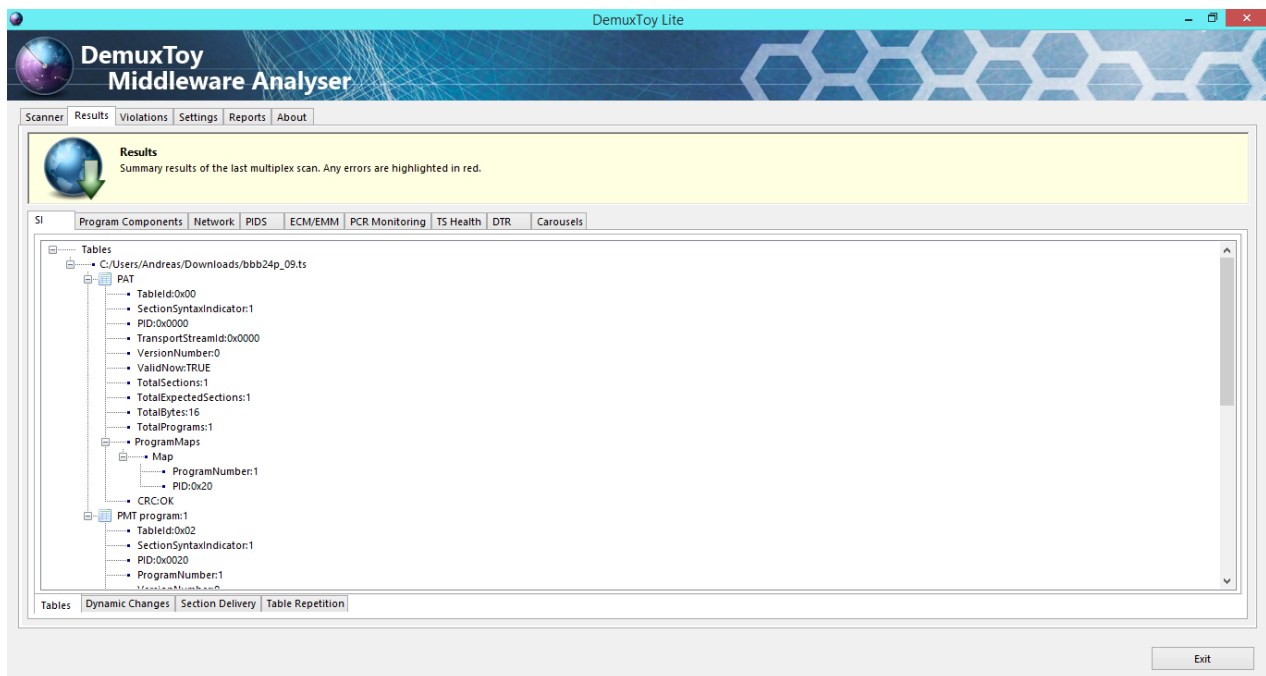
Εικόνα 5.11 Άδεια του εργαλείου για την αναγνώριση των ροών(demuxtoy).

Το συγκεκριμένο λογισμικό λαμβάνει ως είσοδο ένα απόσπασμα από έναν Συρμό Μεταφοράς (αρχείο τύπου ts) και στη συνέχεια μπορεί να αναγνωρίσει και να διαβάσει τους πίνακες πληροφοριών που αναφέραμε στο προηγούμενο τμήμα του Κεφαλαίου αυτού (συμπεριλαμβανομένων των PAT, PMT, CAT, NIT και SDT).

Με βάση το περιεχόμενο αυτών των πινάκων αναγνωρίζει τα περιεχόμενα του Συρμού (τις στοιχειώδεις ροές). Συγκεκριμένα, αναγνωρίζει τα PID των ροών και εντοπίζει πρόσθετες πληροφορίες όπως ο ρυθμός μετάδοσης κάθε ροής. Επίσης αναγνωρίζει περιγραφείς (descriptors) και παρακολουθεί τον μετρητή PCR. Αναγνωρίζει τους κωδικοποιητές ήχου και βίντεο. Αποκωδικοποιεί και διερευνά τις υπηρεσίες που τυχόν περιέχονται εντός του Συρμού, συμπεριλαμβανομένων των υποτίτλων και του Teletext.

Επίσης, ο αναλυτής εντοπίζει σφάλματα στο περιεχόμενο, με χρήση του πεδίου CRC. Εν γένει τέτοιου είδους εργαλεία (αναλυτές συρμών) χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο καλής λειτουργίας και τον εντοπισμό σφαλμάτων στους μηχανισμούς δημιουργίας, επεξεργασίας και ανάγνωσης TS τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη.

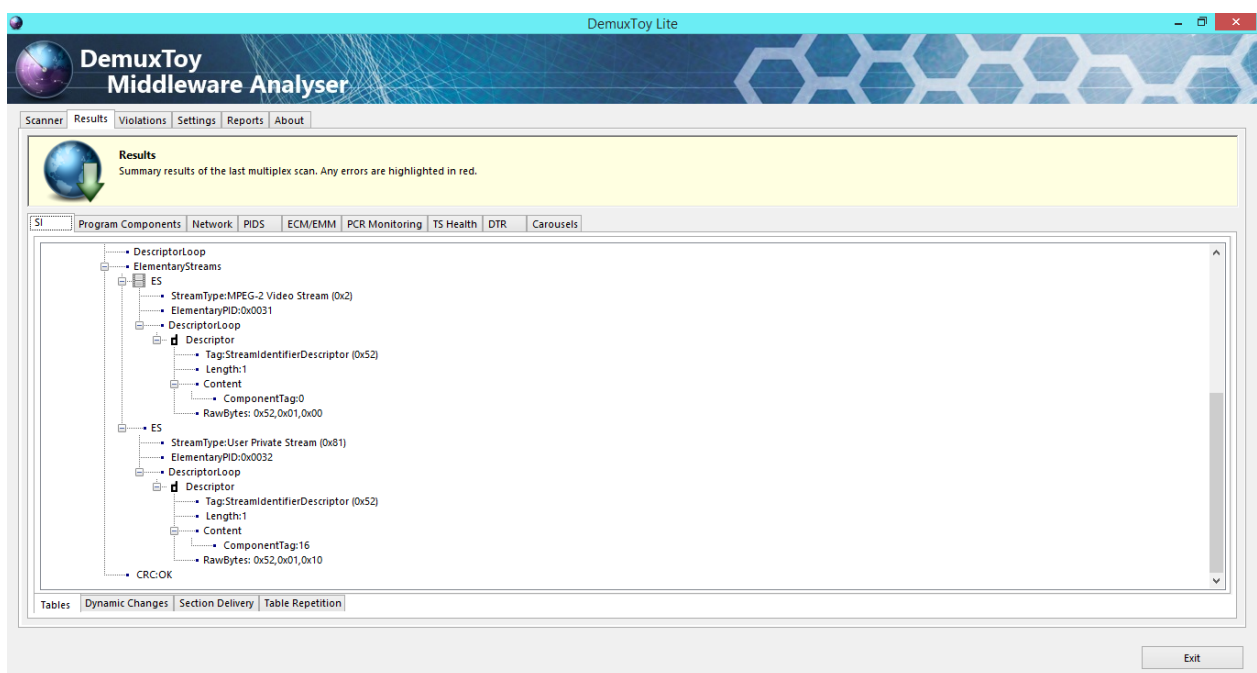
Για την πραγματοποίηση του πειράματος, χρησιμοποιήθηκε ένα απόσπασμα από Συρμό Μεταφοράς τύπου MPEG-2, το οποίο είναι δημόσια διαθέσιμο από τη συλλογή δοκιμών και εργαλείων στο (37). Το συγκεκριμένο απόσπασμα έχει τα εξής χαρακτηριστικά: 1080p@24.0, 4:2:2 chroma, 70 Mbps CBR (χωρίς zero stuffing) σε ένα Transport Stream των 73 Mbps.



Εικόνα 5.12 Πίνακας PAT εντός του Συρμού Μεταφοράς.

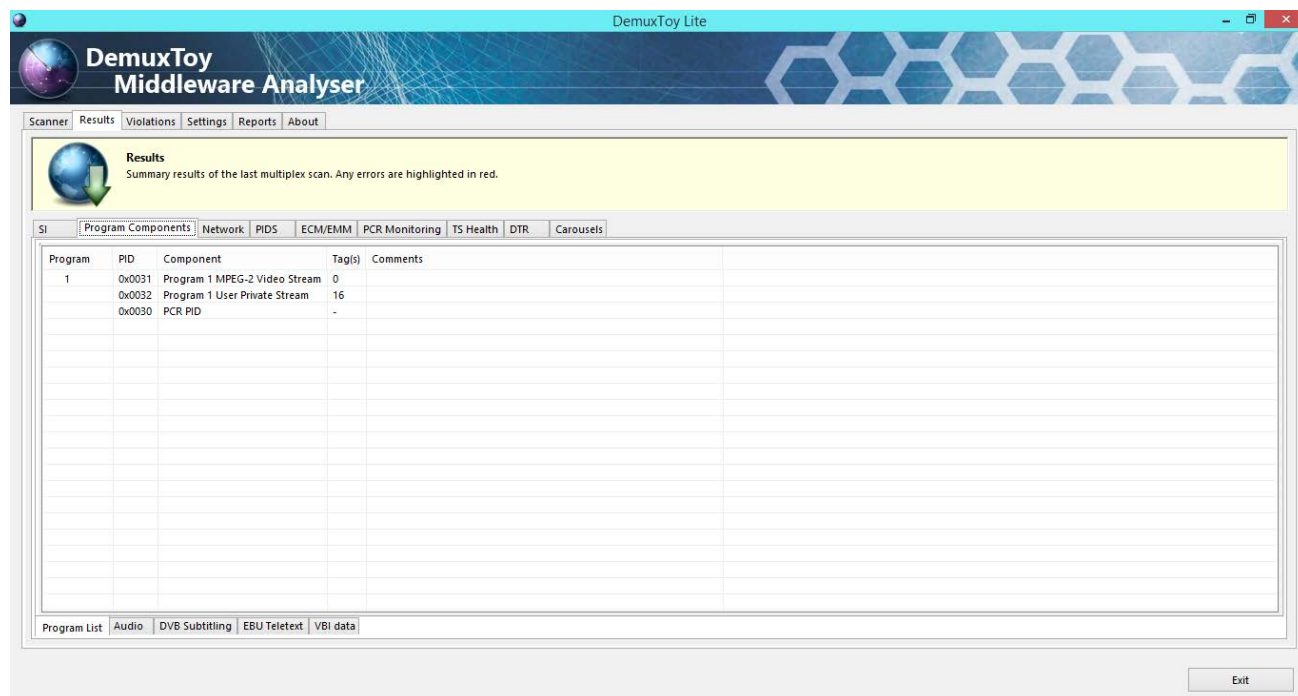
Στην ανωτέρω εικόνα παρουσιάζεται ο εντοπισμός του πίνακα PAT εντός του Συρμού Μεταφοράς. Διακρίνεται το PID του πίνακα PAT το οποίο έχει την τιμή 0x0000, καθώς και το ID του Συρμού (πεδίο Transport Stream Id). Ο αριθμός έκδοσης είναι 0. Ο Συρμός περιλαμβάνει ένα πρόγραμμα, του οποίου ο πίνακας PMT (Program Map Table) έχει PID=0x020.

Τα πακέτα που αποτελούν αυτόν τον πίνακα πρέπει να αναζητηθούν στη συνέχεια, ώστε να εντοπιστούν οι στοιχειώδεις ροές που αποτελούν το πρόγραμμα. Οι σχετικές πληροφορίες παρουσιάζονται στο κάτω μέρος της εικόνας, αλλά και στην επόμενη. Συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι το πρόγραμμα αποτελείται από δύο στοιχειώδεις ροές με PID 0x0031 και 0x0032 αντίστοιχα, με την πρώτη εκ των οποίων να είναι βίντεο, ενώ η δεύτερη να περιλαμβάνει ιδιωτικά δεδομένα.



Εικόνα 5.13 Στοιχειώδεις ροές εντός του προγράμματος.

Πέραν των δύο στοιχειωδών ροών, που φαίνονται στο επόμενο σχήμα, υφίσταται μία ακόμη που αφορά στο PCR με PID 0x0030.

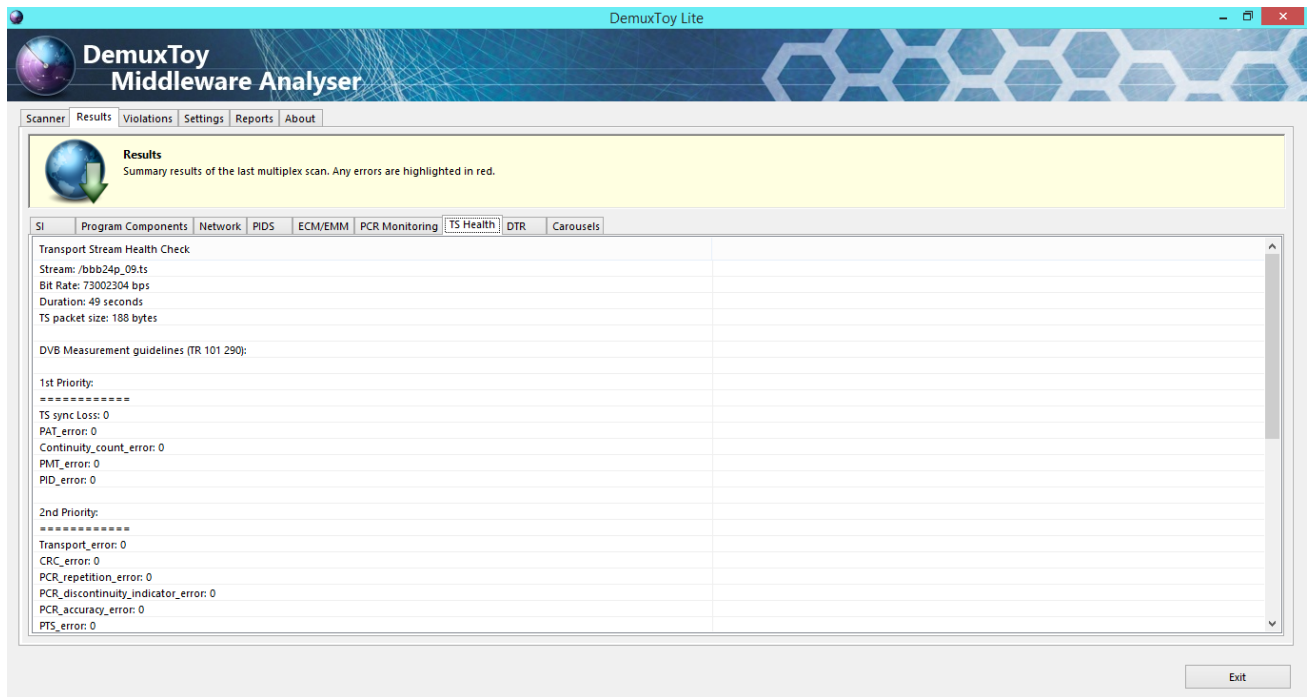


Εικόνα 5.14 Στοιχειώδεις ροές βίντεο και ήχου.

Πριν κλείσουμε αυτό το σύντομο παράδειγμα αξίζει να αναφερθούμε ότι με χρήση των πεδίων PCR αλλά και CRC είναι δυνατόν το εκάστοτε εργαλείο που χρησιμοποιούμε να εντοπίσει τυχόν σφάλματα. Τέτοια σφάλματα, βέβαια, αν δεν χρησιμοποιείται επιπλέον πληροφορία προληπτικής διόρθωσης σφαλμάτων, δεν είναι δυνατόν να διορθωθούν.

Στην επόμενη εικόνα παρατηρούμε κάποιες επιπλέον πληροφορίες, συμπεριλαμβανομένων των επομένων:

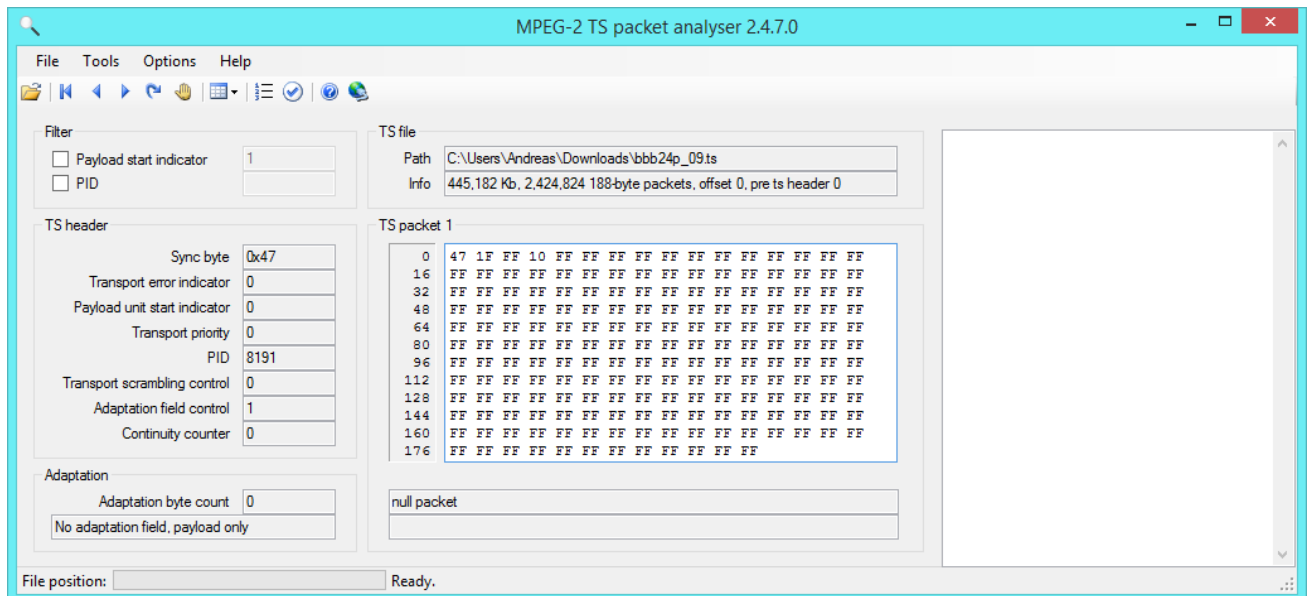
- μέγεθος πακέτου 188 Bytes
- bit rate 73002320 bps
- διάρκεια 49 sec
- σφάλματα συγχρονισμού, απώλειας πακέτων, στους πίνακες (PAT, PMT ως πρώτη προτεραιότητα) αλλά και στις στοιχειώδεις ροές (ως δεύτερη προτεραιότητα).



Εικόνα 5.15 Έλεγχος συνέχειας για τα πακέτα του συρμού μεταφοράς .

5.6.2 Ανάλυση Πακέτων Συρμού Μεταφοράς

Στο δεύτερο παράδειγμα εξετάζουμε το πρόγραμμα MPEG2 Transport Stream Analyzer [38]. Αυτό το λογισμικό μάς επιτρέπει να αναλύσουμε το περιεχόμενο ενός πακέτου του Συρμού Μεταφοράς και δίνει τις τιμές των 188 Bytes που περιέχονται. Παρατηρούμε ότι το πακέτο εκκινεί με το Byte συγχρονισμού (0x47), οι δε υπόλοιπες τιμές είναι FF (stuffing).



Εικόνα 5.16 Ανάλυση του περιεχομένου ενός πακέτου TS.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

34. International Standards Organization / International Electrotechnical Commission. *Information technology — Generic coding of moving pictures and associated audio information: Systems*, International Standards Organization / International Electrotechnical Commission ISO/IEC, 13818-1, 2000.
35. European Telecommunications Standards Institute (ETSI) *TS 101 154 Digital Video Broadcasting (DVB). Specification for the use of Video and Audio Coding in Broadcasting Applications based on the MPEG-2 Transport Stream*. European Telecommunications Standards Institut, 2009.
36. DemuxToy TS Analyzer. *Εργαλείο ανάλυσης Συρμών Μεταφοράς από την εταιρεία Altais*, <http://altaisdigital.com>. Διαθέσιμο στο διαδίκτυο, 2015.
37. MPEG-2 Transport Stream Test Patterns and Tools. *Δοκίμια και εργαλεία για τον έλεγχο Συρμών Μεταφοράς*, <http://www.w6rz.net/>. Διαθέσιμο στο διαδίκτυο, 2015.
38. MPEG-2 Transport Stream packet analyser. *Ανάλυση πακέτων τύπου MPEGTransportStream*, <http://www.pjdaniel.org.uk/mpeg/>. Διαθέσιμο στο διαδίκτυο, 2015.

Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1

Πώς θα βρούμε τον ήχο (audio 1) του προγράμματος 20 σε έναν Συρμό Μεταφοράς;

Απάντηση/Λύση

Τα βήματα που ακολουθούμε είναι τα επόμενα:

- Βρίσκουμε πρώτα το πακέτο με $PID=0$, το οποίο είναι το PAT.
- Από το PAT βρίσκουμε το PID_{PMT} που αντιστοιχεί στο PMT του προγράμματος που ψάχνουμε (πρόγραμμα 20) π.χ. 200.
- Βρίσκουμε το εν λόγω PMT.
- Διαβάζοντας τα πακέτα του TS με $PID=200$.
- Από το PMT βρίσκουμε τα Elementary Streams του προγράμματος και τα PID τους.
- Βρίσκουμε το $PID_{ES-AUDIO}$ του ES ήχου π.χ. έστω 510.
- Αποκωδικοποιούμε τα πακέτα με αυτό το $PID_{ES-AUDIO}$.

Παρατηρούμε ότι μέχρι να πραγματοποιηθούν τα προηγούμενα βήματα, ένα σύνολο από πακέτα Transport Stream θα χρειαστεί να αγνοηθεί από τον δέκτη.

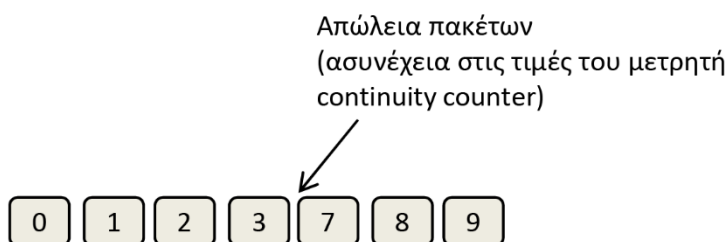
Κριτήριο αξιολόγησης 2

Πώς δύναται ο δέκτης να αντιληφθεί ότι έχει χαθεί ένα πακέτο σε μια συγκεκριμένη στοιχειώδη ροή; Τι συμβαίνει σε αυτήν την περίπτωση;

Απάντηση/Λύση

Χρησιμοποιείται το πεδίο Continuity Counter. Το πεδίο αυτό έχει 4 bits και αυξάνει κατά 1 κάθε φορά που εμφανίζεται ένα πακέτο με συγκεκριμένο PID. Όταν για κάποιο PID απουσιάζει ένα νούμερο τότε έχουμε σφάλμα συνέχειας, το οποίο σημαίνει ότι ένα πακέτο έχει χαθεί.

Ο μετρητής αυτός εντοπίζει απώλεια πακέτων, χωρίς όμως να δίνει πληροφορίες για το πλήθος των πακέτων που απωλέσθησαν.



Εικόνα 5.1.3 Εντοπισμός απώλειας πακέτων λόγω ασυνέχειας των τιμών του μετρητή.

Η αντιμετώπιση των σφαλμάτων που οφείλονται σε απώλεια πακέτων έχει τη μεγαλύτερη προτεραιότητα.

Κριτήριο αξιολόγησης 3

Υποθέτουμε ένα TS το οποίο ακολουθεί μια παραπλήσια δομή με αυτή του MPEG με μικρότερα σε μέγεθος πακέτα. Συγκεκριμένα, έστω επικεφαλίδα 2 Bytes η οποία περιλαμβάνει μόνο το PID και τμήμα δεδομένων 12 Bytes. Βρείτε:

- Πόσα προγράμματα περιέχονται στο TS
- Υποθέστε ότι ο αριθμός προγράμματος αντιστοιχεί σε ένα Byte
- Πόσες και ποιες ροές αποτελούν το πρόγραμμα 3
- Ποια πακέτα αντιστοιχούν στον ήχο του προγράμματος 4 (ο οποίος υποθέστε ότι αντιστοιχεί στη δεύτερη ροή του)

Θεωρήστε ότι οι τιμές δίνονται στο 8-δικό σύστημα

Απάντηση/Λύση

Θεωρούμε τον επόμενο πίνακα.

0	7	1	6	3	2	1	2	4	5	0	0	1	2
0	0	1	0	7	2	1	0	3	1	1	4	2	1
0	7	1	6	3	2	1	2	4	5	0	0	1	2
2	1	1	1	3	2	2	4	3	2	5	4	1	6
1	0	1	4	5	2	3	3	3	2	7	4	2	2
1	6	1	0	7	2	1	0	3	1	1	4	2	1
2	4	1	6	3	2	1	2	4	5	0	0	1	2
2	2	7	2	1	0	3	1	1	4	2	1	3	4
1	1	1	0	9	2	3	7	3	2	5	X	X	X
5	4	1	6	3	2	1	2	4	5	0	0	1	2
1	7	6	3	2	1	2	2	4	5	0	0	1	2
6	3	3	7	3	2	5	4	1	7	0	0	1	2
2	4	1	6	3	2	1	2	4	5	0	0	1	2
2	3	1	4	5	2	3	3	3	1	0	0	1	2
2	5	3	2	5	4	1	7	3	2	5	4	1	7



[Παρατίθεται το βίντεο το οποίο επεξηγεί την επίλυση της άσκησης.](#)

Κριτήριο αξιολόγησης 4

Επεξηγήστε την επιλογή της συχνότητας ρολογιού στα 27 MHz.

Απάντηση/Λύση

Η δειγματοληψία του σήματος φωτεινότητας γίνεται στα 13 MHz ενώ η δειγματοληψία των χρωμοδιαφορών γίνεται στα 6,75 MHz (στο ήμισυ, δηλαδή, της συχνότητας δειγματοληψίας της φωτεινότητας). Τα 27 MHz αποτελούν πολλαπλάσιο και των δύο αυτών τιμών.

Κριτήριο αξιολόγησης 5

Αναζητήστε το κατάλληλο εργαλείο και χρησιμοποιήστε το ώστε να δημιουργήσετε έναν Συρμό Μεταφοράς (απόσπασμα) χρησιμοποιώντας ένα αρχείο εισόδου βίντεο και ένα ήχου. Στη συνέχεια αναλύστε τον Συρμό Μεταφοράς που δημιουργήσατε.

Απάντηση/Λύση

Το FFmpeg Project παρέχει ένα σύνολο από εργαλεία για τη διαχείριση πολυμεσικού υλικού (multimedia). Με την έννοια διαχείριση εννοούμε την κωδικοποίηση, την αποκωδικοποίηση, την πολυπλεξία, την αποπολυπλεξία, το φιλτράρισμα, τη ροή, καθώς και την αναπαραγωγή πολυμέσων.

Ας εστιάσουμε στη δημιουργία Συρμών Μεταφοράς, η οποία γίνεται χρησιμοποιώντας το όρισμα `mpregs`, όπως φαίνεται στον επόμενο κώδικα.

```
ffmpeg -i input.avi -vcodec copy -acodec copy -f mpegts output-file.ts
```

Στην περίπτωση του κώδικα που περιγράφεται στον ανωτέρω πίνακα το αρχείο `input.avi` μετατρέπεται σε Συρμό Μεταφοράς, ο οποίος αποθηκεύεται στο αρχείο `output.ts`. Τα ορίσματα τα οποία αφορούν την κωδικοποίηση βίντεο και ήχου (`vcodec` και `acodec`, αντίστοιχα) σημαίνουν ότι θα χρησιμοποιηθεί η αρχική κωδικοποίηση (αυτή δηλαδή της εισόδου) χωρίς να γίνει κάποια μετατροπή (transcoding).

Στην περίπτωση που επιθυμούμε κάποια μετατροπή στην κωδικοποίηση είναι δυνατή η χρήση της επόμενης εντολής, όπου θέτουμε την κωδικοποίηση και του βίντεο και του ήχου με αυτή του MPEG-2. Επιπλέον τίθενται οι ρυθμοί του βίντεο στα 10 Mbps (`-b:v 10M`) και του ήχου στα 192 Kbps (`-b:a 192 Kb`).

```
ffmpeg -iinput.avi -vcodecmpeg2video -acodecmp2 -b:v 10M -b:a 192k -muxrate 10M -fmpegtsoutput.ts
```

Πέρα από τα θέματα των κωδικοποιήσεων μπορούμε να θέσουμε μια σειρά από παραμέτρους, οι οποίες αφορούν τον Συρμό Μεταφοράς. Αυτές περιλαμβάνουν:

- Το Id του δικτύου (πεδίο `network_id`), το οποίο αποτελεί και ένα μοναδικό χαρακτηριστικό του καναλιού. Έχει εξ ορισμού τιμή την 0x0001.
- Το Id του TS (πεδίο `transport_stream_id`), το οποίο αποτελεί και ένα μοναδικό χαρακτηριστικό του Συρμού Μεταφοράς. Έχει οξ ορισμού τιμή την 0x0001. Σε συνδυασμό με το Id του δικτύου καθορίζουν έναν μοναδικό συνδυασμό.
- Το Id της υπηρεσίας (στην ονοματολογία του MPEG) και του προγράμματος (στην ονοματολογία του DVB). Το `service_id` αποτελεί και ένα μοναδικό χαρακτηριστικό του προγράμματος.
- Ο τύπος του προγράμματος (πεδίο `service_type`).
- Το πρώτο PID για τον πίνακα PMT (πεδίο `pmt_start_pid`).
- Το πρώτο PID για τα πακέτα δεδομένων (πεδίο `start_pid`).
- Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των αποστολών της πληροφορίας χρονισμού (`pcr_period`) σε `millisecond`. Εξ ορισμού τιμή είναι τα 20 ms.

- Το ελάχιστο μέγεθος του τμήματος δεδομένων του πακέτου τύπου PES (πεδίου `pes_payload_size`) σε Bytes.
- Ο αριθμός έκδοσης των πινάκων PAT, PMT και SDT (πεδίο `tables_version`). Ο αριθμός έκδοσης λαμβάνει τιμές από το 0 μέχρι και το 31, με εξ ορισμού τιμή το 0. Η αλλαγή έκδοσης των εν λόγω πινάκων εξασφαλίζει ότι σε περίπτωση που η δομή του περιεχομένου του καναλιού διαφοροποιηθεί (είτε αφορά το πλήθος των προγραμμάτων που περιλαμβάνονται είτε το περιεχόμενο κάποιου συγκεκριμένου προγράμματος) ο δέκτης όχι μόνο θα λάβει την πληροφορία μέσω των πινάκων αλλά θα καταλάβει ότι έχει γίνει η αλλαγή (λόγω της αλλαγής στον αριθμό έκδοσης του πίνακα).
- Το όνομα του παρόχου (πεδίο `provider_name`).
- Το όνομα του καναλιού (πεδίο `channel_name`).

Η εντολή με τα σχετικά ορίσματα φαίνεται στη συνέχεια:

```
ffmpeg -i file.mpg -c copy \
-mpegts_original_network_id 0x1122 \
-mpegts_transport_stream_id 0x3344 \
-mpegts_service_id 0x5566 \
-mpegts_pmt_start_pid 0x1500 \
-mpegts_start_pid 0x150 \
-metadata service_provider=" provider name" \
-metadata service_name="channel name" \
-y out.ts
```

Κεφάλαιο 6 – Κωδικοποίηση Καναλιού

Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζουμε τις διαδικασίες και τους μηχανισμούς της κωδικοποίησης καναλιού (channel coding). Η κωδικοποίηση καναλιού λαμβάνει χώρα πριν τη μετάδοση και στοχεύει στην ενίσχυση του σήματος με πλεονάζουσα πληροφορία η οποία χρησιμοποιείται από τον δέκτη, στις αντίστοιχες βαθμίδες για τον εντοπισμό και τη διόρθωση τυχόν σφαλμάτων. Η ύπαρξη της πλεονάζουσας πληροφορίας αυξάνει αναπόφευκτα το σύνολο της πληροφορίας κατά ένα ελέγχσιμο (και αν γένει παραμετροποιήσιμο) ποσοστό.

Η κωδικοποίηση καναλιού διακρίνεται σε πέντε βασικά στάδια και υπάρχουν οι αντίστοιχες βαθμίδες στην πλευρά του πομπού: τη διασπορά ενέργειας (ή, αλλιώς, την τυχαιοποίηση των δεδομένων), την εξωτερική κωδικοποίηση, την εξωτερική διεμπλοκή, την εσωτερική κωδικοποίηση και την εσωτερική διεμπλοκή. Η αντίστροφη λειτουργικότητα βρίσκεται από την πλευρά του δέκτη. Συγκεκριμένα η επανατοποθέτηση της ροής στην αρχική σειρά, η εξωτερική αποκωδικοποίηση, η συνελικτική απεμπλοκή, καθώς και η εσωτερική αποκωδικοποίηση και η εσωτερική απεμπλοκή. Οι όροι διεμπλοκή και απεμπλοκή παραπέμπουν σε μια αντιμετάθεση συμβόλων ή bits (ανάλογα με το σημείο στο οποίο λαμβάνουν χώρα) με τέτοιο τρόπο ώστε να μετριάζεται το αποτέλεσμα συνεχόμενων σφαλμάτων (π.χ. μιας ριπής σφαλμάτων) και βέβαια να είναι δυνατή η επανατοποθέτηση των συμβόλων ή των bits στον δέκτη, ώστε να γίνεται διαθέσιμη η ροή στην αρχική της μορφή.

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζουμε τους σχετικούς μηχανισμούς, δείχνουμε την αναγκαιότητά τους και τα οφέλη που παρέχουν. Με τη βοήθεια παραδειγμάτων, τα οποία βασίζονται στη χρήση περιβάλλοντος προσομοίωσης, γίνεται επεξήγηση αυτών των μηχανισμών σε μικρότερη κλίμακα, ώστε να γίνει πιο εύκολη η κατανόηση και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Προαπαιτούμενη γνώση

Το κεφάλαιο της Κωδικοποίησης Καναλιού είναι σε μεγάλο βαθμό αυτόνομο, αφού δεν εξετάζουμε τα δεδομένα τα οποία κωδικοποιούνται από τους χρησιμοποιούμενους μηχανισμούς. Επιπλέον η διεπαφή με το επόμενο σύνολο βαθμίδων, το οποίο έχει να κάνει με τη μετάδοση, καθορίζεται με σαφήνεια και δεν επηρεάζει τους μηχανισμούς της κωδικοποίησης καναλιού.

Ο αναγνώστης ενδείκνυται να έχει κάποιες πρότερες γνώσεις αναφορικά με τους συρμούς μεταφοράς που δίνουν την είσοδο στις βαθμίδες της κωδικοποίησης καναλιού. Επίσης είναι χρήσιμες βασικές γνώσεις στην περιοχή των μηχανισμών εντοπισμού και διόρθωσης σφαλμάτων.

6.1 Εισαγωγή

Με τον όρο κωδικοποίηση καναλιού αναφερόμαστε στην εισαγωγή, πριν τη μετάδοση (ή εν γένει την περαιτέρω επεξεργασία) πλεονάζουσας πληροφορίας, η οποία χρησιμοποιείται στον δέκτη, κατά τις αντίστοιχες διαδικασίες αποκωδικοποίησης καναλιού, ώστε να εντοπίσει και εάν είναι δυνατόν να διορθώσει σφάλματα τα οποία έχουν συμβεί κατά τη μετάδοση (ή την οποιαδήποτε επεξεργασία). Ο στόχος είναι να αυξήσουμε την αξιοπιστία του συστήματος και να βελτιώσουμε την ποιότητα του αναπαραγόμενου υλικού στον δέκτη (μέσω της μείωσης των σφαλμάτων που αναπόφευκτα έχουν προκύψει κατά τη μετάδοση). Λόγω ακριβώς της εισαγωγής της πλεονάζουσας πληροφορίας αυξάνει ο όγκος των δεδομένων σε σχέση με τον αρχικό όγκο της πληροφορίας.

Οι λειτουργίες της κωδικοποίησης καναλιού εντάσσονται στη λογική της προληπτικής διόρθωσης σφαλμάτων (Forward Error Correction, FEC). Τέτοιες τεχνικές χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου είναι πιθανή η εμφάνιση σφαλμάτων, είτε εμπλέκεται μετάδοση της πληροφορίας είτε όχι (για παράδειγμα, χρησιμοποιούνται και στην περίπτωση της αποθήκευσης της πληροφορίας).

Η αλληλουχία των ενεργειών παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 6.1 Κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση καναλιού.

Οι μηχανισμοί προληπτικής διόρθωσης σφαλμάτων δεν χαρακτηρίζουν μόνο την ψηφιακή τηλεόραση, αφού χρησιμοποιούνται εκτενώς για τη μετάδοση αλλά και την αποθήκευση δεδομένων. Ο πιο γνωστός ίσως μηχανισμός προληπτικής διόρθωσης σφαλμάτων είναι ο έλεγχος ισοτιμίας (parity check). Κατά τον έλεγχο αυτό προστίθεται ένα bit ισοτιμίας ώστε να θέτουμε το συνολικό πλήθος των bits της λέξης ως περιττό ή άρτιο αριθμό. Αν το συνολικό πλήθος των bits με τιμή 1, είναι περιττό μιλάμε για περιττή ισοτιμία, ενώ αν είναι άρτιο μιλάμε για άρτια ισοτιμία (odd και even parity αντίστοιχα). Το είδος της ισοτιμίας συμφωνείται εκ των προτέρων μεταξύ του πομπού και του δέκτη (ή εν γένει του αποστολέα και του παραλήπτη).

Είναι σαφές ότι ο μηχανισμός αυτός είναι πολύ απλός και μπορεί να εντοπίσει περιττό αριθμό σφαλμάτων, αφού στην περίπτωση του ζυγού αριθμού σφαλμάτων αυτά αλληλοαναιρούνται. Παρόλο που πλέον χρησιμοποιείται για λόγους συμβατότητας μπορεί να μας δώσει το γενικό πλαίσιο λειτουργίας των μηχανισμών προληπτικής διόρθωσης σφαλμάτων.

Άλλο ένα εξίσου απλό παράδειγμα τέτοιου μηχανισμού είναι η αποστολή της ίδιας πληροφορίας περισσότερες από μία φορές. Για παράδειγμα, κάθε bit μπορεί να αποστέλλεται τρεις φορές αντί για μία. Ο δέκτης αποφασίζει την τιμή 0 ή 1 κατά πλειοψηφία. Στην περίπτωση αυτή αντιμετωπίζεται (εντοπίζεται και διορθώνεται) η ύπαρξη ενός μόνο σφάλματος. Από την άλλη, βέβαια, αυξάνεται δραματικά ο όγκος των δεδομένων, στην περίπτωσή μας, δε, τριπλασιάζεται.

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζεται μια μέθοδος προστασίας από σφάλματα με τον τριπλασιασμό των δεδομένων. Παρατηρούμε τις τιμές της κωδικοποιημένης πληροφορίας και τι συμβαίνει στην περίπτωση που έχουμε ένα ή κανένα σφάλμα. Στην περίπτωση δύο σφαλμάτων, ο αλγόριθμος δεν δύναται να τα αντιμετωπίσει (θεωρεί, δηλαδή, ότι έχει σταλεί διαφορετική τιμή).

Τιμή προς αποστολή	Κωδικοποιημένο bit προς αποστολή	Διάυλος	Λαμβανόμενη πληροφορία	Μεταφραζόμενη πληροφορία
0	000	Κανένα σφάλμα	000	0
		Ένα σφάλμα	001	0
		Ένα σφάλμα	010	0
		Ένα σφάλμα	100	0
1	111	Κανένα σφάλμα	111	1
		Ένα σφάλμα	110	1
		Ένα σφάλμα	101	1
		Ένα σφάλμα	011	1

Πίνακας 6.1 Προστασία δεδομένων με τριπλασιασμό δεδομένων και αντιμετώπιση σφαλμάτων.

Επανερχόμενοι στην κωδικοποίηση καναλιού, οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα κυρίως με το τμήμα της πληροφορίας όπου εφαρμόζονται, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο προστίθεται η πλεονάζουσα πληροφορία. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι ακόλουθες:

- Κώδικες μπλοκ (block code)
- Συνελικτικοί κώδικες (convolutional code)

Η σημαντικότερη διαφορά μεταξύ αυτών των κατηγοριών εντοπίζεται στο γεγονός ότι οι πρώτοι χωρίζουν την πληροφορία σε τμήματα, συγκεκριμένου μεγέθους (μπλοκ). Στα τμήματα αυτά γίνεται η κωδικοποίηση για να ληφθούν οι αντίστοιχες κωδικές λέξεις (κωδικολέξη). Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει στην περίπτωση των συνελικτικών μηχανισμών, αφού η κωδικοποίηση και η αποκωδικοποίηση λαμβάνουν χώρα στη συνολική ροή (συνήθως σε επίπεδο bit).

Παράλληλα με την ανωτέρω διαφοροποίηση, υπάρχει ακόμα μία η οποία αφορά τη μνήμη. Συγκεκριμένα, οι συνελικτικοί κωδικοποιητές έχουν κατάσταση (άρα μνήμη). Αυτό σημαίνει ότι η έξοδος δεν εξαρτάται μόνο από την τιμή της εισόδου τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή αλλά και από αντίστοιχες τιμές σε προηγούμενο χρόνο. Αυτό δεν συμβαίνει στους κώδικες τύπου μπλοκ, όπου κάθε κωδικολέξη είναι ανεξάρτητη από την προηγούμενη και την επόμενη.

Η σύγκριση μεταξύ των δύο μηχανισμών παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα.

Κριτήριο	Κωδικοποίηση Τμήματος Δεδομένων (blockcode)	Συνελικτική κωδικοποίηση (Convolutional code)
Δεδομένα στα οποία εφαρμόζεται	Τα δεδομένα που ανήκουν στο τρέχον μπλοκ (τμήμα), χωρίς συσχέτιση με προηγούμενα δεδομένα	Τρέχοντα δεδομένα της ροής καθώς αυτά εισέρχονται στον κωδικοποιητή
Μνήμη	Όχι (κάθε μπλοκ πληροφορίας κωδικοποιείται ανεξάρτητα)	Ναι (η κωδικοποίηση των δεδομένων συνήθως εξαρτάται και από τα προηγούμενα δεδομένα)
Συμπεριφορά στις ριπές σφαλμάτων	Μη ικανοποιητική	Μη ικανοποιητική

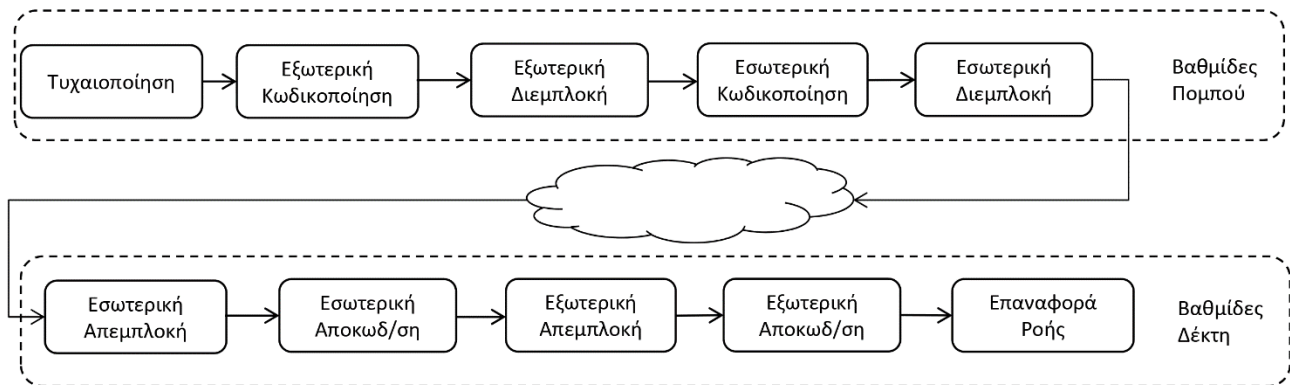
Πίνακας 6.2 Σύγκριση χαρακτηριστικών, κωδικοποίηση τμήματος δεδομένων και συνελικτικής κωδικοποίησης.

Όπως θα δούμε στη συνέχεια, η απόδοση και των δύο τύπων κωδικοποίησης επηρεάζεται στην περίπτωση που έχουμε ριπές θορύβου. Για την αντιμετώπιση αυτού του χαρακτηριστικού λαμβάνει χώρα ένα ανακάτεμα, αντιμετάθεση ή αλλιώς *διεμπλοκή* (interleaving) της πληροφορίας, πριν την αποστολή. Η πληροφορία επανέρχεται στη σωστή σειρά στον αποκωδικοποιητή με τη διαδικασία που ονομάζουμε *απεμπλοκή* (de-interleaving).

Στην περίπτωση της ψηφιακής τηλεόρασης χρησιμοποιούνται και οι δύο τύποι κωδικοποίησης (μπλοκ και συνελικτικοί), διαδοχικά, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα. Μεταξύ αυτών λαμβάνει χώρα η διεμπλοκή για τους λόγους που προαναφέρθηκαν (δηλαδή την αντιμετώπιση ριπών σφαλμάτων). Κατά την αποκωδικοποίηση στον δέκτη λαμβάνουν χώρα οι αντίστροφες διαδικασίες.



[Παρατίθεται ένα εκπαιδευτικό βίντεο για την κωδικοποίηση καναλιού στις ψηφιακές επικοινωνίες.](#)



Εικόνα 6.2 Βασικές βαθμίδες κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης καναλιού.

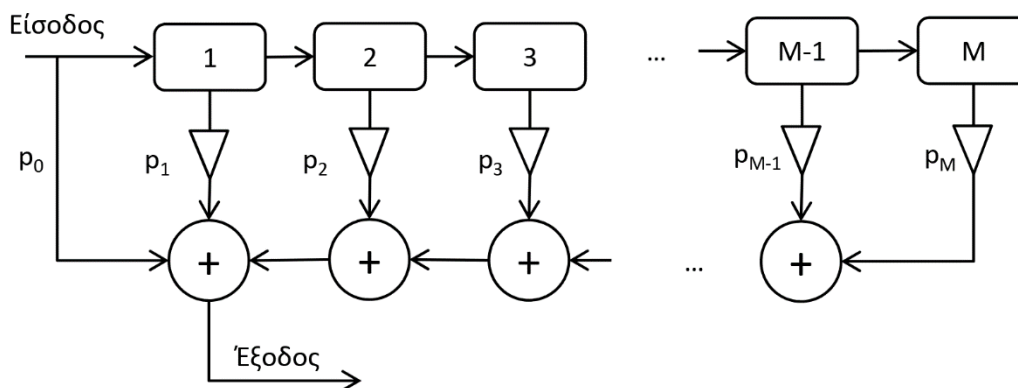
Οι λειτουργίες που λαμβάνουν χώρα περιλαμβάνουν τα επόμενα στάδια: (α) τυχαιοποίηση (randomization) των δεδομένων (η οποία επιτυγχάνει διασπορά της ενέργειας), (β) εξωτερική κωδικοποίηση, (γ) εξωτερική διεμπλοκή, (δ) εσωτερική κωδικοποίηση και (ε) εσωτερική διεμπλοκή από την πλευρά του πομπού. Αντίστοιχα, από την πλευρά του δέκτη, έχουμε κατά σειρά: (α) την εσωτερική απεμπλοκή, (β) την εσωτερική αποκωδικοποίηση, (γ) την εξωτερική απεμπλοκή, (δ) την εξωτερική αποκωδικοποίηση και (ε) την επαναφορά της ροής (39).

6.2 Τυχαιοποίηση - Διασπορά Ενέργειας

6.2.1 Βαθμίδα Τυχαιοποίησης

Η πρώτη βαθμίδα του μηχανισμού της κωδικοποίησης καναλιού έχει να κάνει με τη διασπορά της ενέργειας στα δυαδικά δεδομένα. Η διασπορά της ενέργειας συνίσταται στην αποφυγή μεγάλου συνεχόμενου πλήθους από μηδέν ή ένα στα δεδομένα (ροή bits). Η ενέργεια αυτή ισοδυναμεί με την τυχαιοποίηση της σειράς (scrambling) των δεδομένων, την εισαγωγή, δηλαδή, κάποιας τυχαιότητας στα δεδομένα.

Η διασπορά της ενέργειας επιτυγχάνεται με βαθμίδα τυχαιοποίησης η οποία εφαρμόζεται στη ροή από bits, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 6.3 Βαθμίδα τυχαιοποίησης.

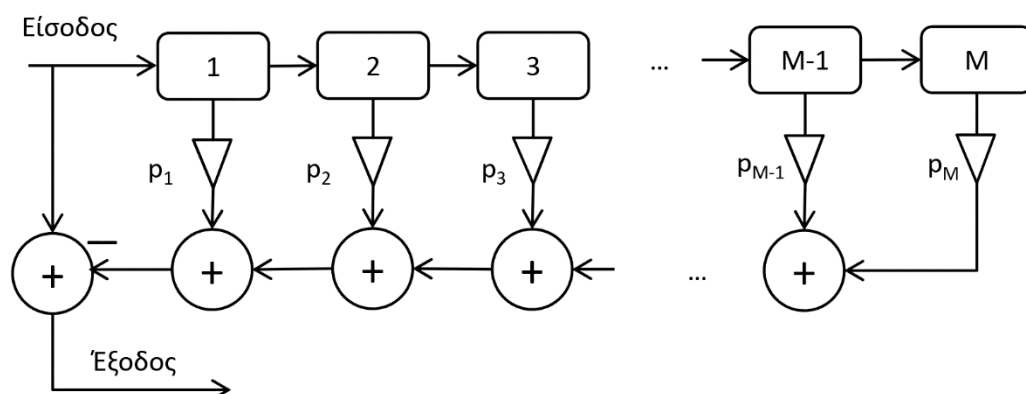
Η βαθμίδα τυχαιοποίησης αποτελείται από μια σειρά M καταχωρητών, αθροιστών και πολλαπλασιαστών. Η βάση υπολογισμού της βαθμίδας είναι N και οι τιμές της εισόδου κυμαίνονται στο

διάστημα $[0, N-1]$. Σε αυτήν την περίπτωση οι αθροιστές έχουν βάση το N (είναι δηλαδή αθροιστές modulo N). Οι συντελεστές $p_0, p_1, \dots, p_{M-1}$ και p_M καθορίζουν ποιες από τις τιμές των καταχωρητών λαμβάνονται υπόψη στα αθροίσματα. Το άθροισμα, δηλαδή, καθορίζεται από το αντίστοιχο πολυώνυμο γεννήτορα, το οποίο ορίζεται με χρήση των ανωτέρω συντελεστών:

$$p_0 + p_1 z^{-1} + \dots + p_{M-1} z^{M-1} + p_M z^M \quad (1)$$

Καθώς εισέρχεται το σήμα εισόδου στη βαθμίδα, το περιεχόμενο των καταχωρητών μετατοπίζεται προς τα δεξιά και γίνονται οι αντίστοιχοι υπολογισμοί της εξόδου. Άλλη μία παράμετρος η οποία έχει σημασία στους σχετικούς υπολογισμούς είναι η αρχική κατάσταση των καταχωρητών.

Η αντίστροφη διαδικασία γίνεται στον δέκτη στη βαθμίδα επαναφοράς της ροής (descrambler) ώστε να επανακτηθεί η αρχική ροή. Η διαδικασία που ακολουθείται παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα. Παρατηρούμε την ομοιότητα των δύο βαθμίδων με σημείο διαφοροποίησης τη μετατροπή του αθροίσματος σε διαφορά.



Εικόνα 6.4 Βαθμίδα επαναφοράς της ροής και αφαίρεσης της τυχαιότητας.

Στην περίπτωση της ψηφιακής τηλεόρασης, η είσοδος του συστήματος κωδικοποίησης καναλιού είναι ο Συρμός Μεταφοράς (MPEG2 Transport Stream, MPEG2-TS). Τα πακέτα του συρμού, όπως εξετάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι σταθερού μήκους, συγκεκριμένα 188 Bytes. Το πρώτο Byte κάθε πακέτου είναι το Byte συγχρονισμού και έχει την τιμή 0x47.

Η βαθμίδα τυχαιοποίησης (scrambler) αποτελείται από μια ψευδοτυχαία δυαδική ακολουθία των 16-bit (Pseudo Random Binary Sequence, PRBS) με ένα πολυώνυμο γεννήτορα 15ου βαθμού με τους επόμενους συντελεστές:

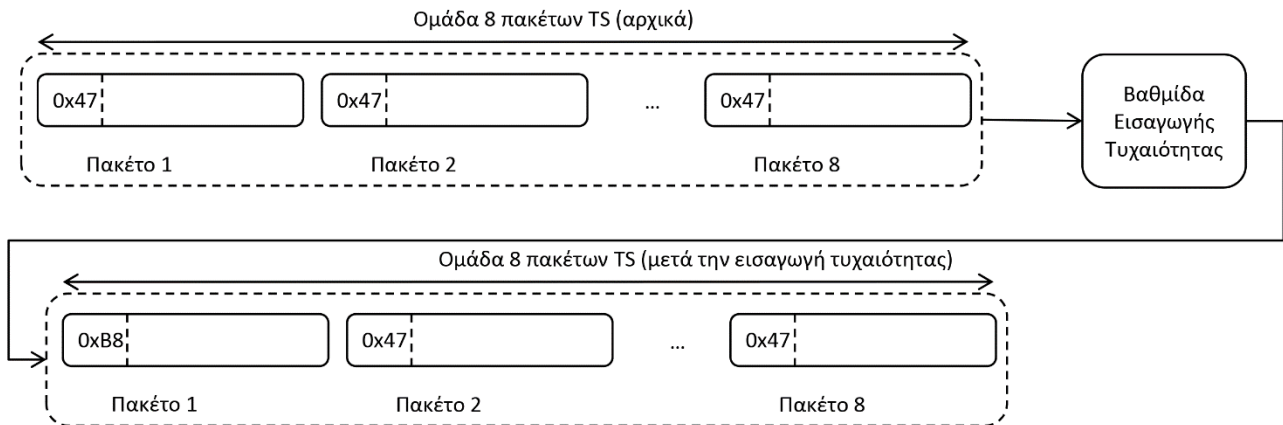
$$\begin{aligned} p_0 &= 1 \\ p_{14} &= 1 \\ p_{15} &= 1 \end{aligned} \quad (2)$$

Στον καταχωρητή PRBS φορτώνεται η αρχική ακολουθία «1001010 1000 0000» και αρχικοποιείται εκ νέου με την έναρξη κάθε ομάδας 8 πακέτων MPEG2-TS. Η τιμή του πρώτου Byte συγχρονισμού στην ομάδα των 8 πακέτων αντιστρέφεται δυαδικά (χωρίς, δηλαδή, να επηρεάζεται από τη λειτουργία της βαθμίδας) από 0x47 σε 0xB8. Η συγκεκριμένη αυτή τιμή χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των τυχαιοποιημένων ομάδων πακέτων.

Η δυαδική αντιστροφή του Byte συγχρονισμού απεικονίζεται παρακάτω:

$$0x47 = 0100\ 0111_{<2>} \rightarrow 10111000_{<2>} = 0xB8$$

Αυτό σημαίνει ότι η συγκεκριμένη τιμή (0xB8) επαναλαμβάνεται περιοδικά μετά από 8 TS πακέτα, δηλαδή μετά από $8 \times 188 - 1 = 1.503$ Bytes.



Εικόνα 6.5 Bytes συγχρονισμού πριν και μετά την εισαγωγή τυχαιότητας.

Η βαθμίδα επαναφοράς της ακολουθίας πρέπει να είναι συγχρονισμένη με την αρχική, οπότε ο συγχρονισμός αυτός επιτυγχάνεται με τον μηχανισμό της αναστροφής του πρώτου Byte κάθε ομάδας 8 πακέτων όπως συζητήσαμε παραπάνω. Το πρώτο Byte των υπόλοιπων πακέτων της ομάδας δεν αντιστρέφεται, ούτε επηρεάζεται από τη λειτουργία της βαθμίδας και παραμένει στην τιμή 0x47.

6.2.2 Παράδειγμα

Στο παράδειγμα αυτό θα υλοποιήσουμε μια βαθμίδα τυχαιοποίησης αξιοποιώντας τις εντολές που παρέχονται από τις βιβλιοθήκες του Matlab και θα υπολογίσουμε την τιμή που θα προκύψει για είσοδο 0x3A, θεωρώντας ότι αυτή είναι το πρώτο Byte μετά το Byte συγχρονισμού.

Ο κώδικας παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα, ενώ οι σχετικές επεξηγήσεις των παραμέτρων και των εντολών ακολουθούν.

Κώδικας
<pre> N = 2; hSCR = comm.Scrambler(N, [1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1], [1 0 0 1 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0]); hDSCR = comm.Descrambler(N, [1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1], [1 0 0 1 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0]); data = [0 0 1 1 1 0 10]; % 0x3A scrData = step(hSCR, data); deScrData = step(hDSCR, scrData); data, scrData, deScrData </pre>

Πίνακας 6.3 Κώδικας τυχαιοποίησης ροής δυαδικών δεδομένων.

Παρατηρούμε ότι ο κώδικας αποτελείται από τα εξής επιμέρους τμήματα:

- Αρχικά δηλώνεται η βάση υπολογισμού της βαθμίδας, $N=2$. Αυτό συνεπάγεται ότι οι τιμές της εισόδου και της εξόδου πρέπει να είναι 0 ή 1 (μέχρι δηλαδή και $N-1$).
- Δημιουργούνται οι βαθμίδες δημιουργίας και απομάκρυνσης της τυχαιότητας από τις ροές.
- Κατά την αρχικοποίηση δίνονται.
 - ο Τα πολώνυμα γεννήτορες $[1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1] \rightarrow 1+z^{-14}+z^{-15}$.
 - ο Η αρχική τιμή των καταχωρητών $[1 0 0 1 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0]$.
 - ο Τα δεδομένα εισόδου (0x3A).

Μετά τις αρχικοποιήσεις, γίνεται η τυχαιοποίηση των αρχικών δεδομένων (μεταβλητή data) οπότε προκύπτει η ακολουθία hSCR (παρατηρούμε ότι μετατρέπουμε τον πίνακα γραμμή σε πίνακα στήλη ώστε να λειτουργήσει σωστά η βαθμίδα) και στη συνέχεια τα δεδομένα που προκύπτουν επανέρχονται στην αρχική τους μορφή (deScrData).

Οι τιμές στην είσοδο και την έξοδο παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Αποτελέσματα		
Είσοδος	Έξοδος βαθμίδας τυχαιοποίησης	Επαναφορά αρχικών δεδομένων
0	0	0
0	0	0
1	1	1
1	1	1
1	1	1
0	0	0
1	0	1
0	1	0

Πίνακας 6.4 Αποτελέσματα βαθμίδας τυχαιοποίησης και επαναφορά στην αρχική μορφή.

Παρατηρούμε όπως αναμένουμε ότι (α) η μορφή των δεδομένων διαφοροποιείται σημαντικά μετά την εισαγωγή της τυχαιότητας και (β) ότι τα δεδομένα επανέρχονται στην αρχική τους τιμή αφού γίνει η αποκατάστασή τους.

6.3 Εξωτερική Κωδικοποίηση

6.3.1 Εξωτερική Κωδικοποίηση

Όπως συζητήθηκε στα προηγούμενα, η προληπτική διόρθωση σφαλμάτων (Forward Error Correction) με την προσθήκη πλεονάζουσας πληροφορίας στο σήμα από τον πομπό, δίνει τη δυνατότητα στον δέκτη να εντοπίσει και να διορθώσει σφάλματα τα οποία έχουν συμβεί κατά τη μετάδοση. Πολλές κωδικοποιήσεις έχουν σχεδιαστεί για αυτόν τον σκοπό με την κωδικοποίηση Reed Solomon να αποτελεί μια από τις πλέον συχνά χρησιμοποιούμενες, αφού ισορροπεί αρμονικά ανάμεσα στην απόδοση και στην πολυπλοκότητα. Η μεν απόδοση σχετίζεται με το πλήθος της πλεονάζουσας πληροφορίας που απαιτείται (και η οποία συνεπάγεται την αύξηση του όγκου), η δε πολυπλοκότητα σχετίζεται με τη δυσκολία στην κωδικοποίηση και την αποκωδικοποίηση.

Η κωδικοποίηση Reed Solomon χρησιμοποιείται στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση (DVB-T, ATSC) (40). Ο αλγόριθμος Reed Solomon είναι από τους πλέον συχνά χρησιμοποιούμενους αλγόριθμους και χρησιμοποιείται εκτός από την ψηφιακή τηλεόραση σε μια σειρά εφαρμογών συμπεριλαμβανομένων και των επομένων: CD, DVD, BlueDisc, DSL και WiMAX. Τόσο η κωδικοποίηση όσο και η αποκωδικοποίηση λαμβάνει χώρα με τη βοήθεια υλικού (hardware) για καλύτερη απόδοση.

Η κωδικοποίηση Reed Solomon είναι κωδικοποίηση τύπου μπλοκ, όπου η πληροφορία χωρίζεται σε τμήματα συγκεκριμένου μήκους και σε αυτά τα τμήματα λαμβάνει χώρα η κωδικοποίηση και η αποκωδικοποίηση (ανεξάρτητα σε κάθε τμήμα). Σε κάθε ένα από αυτά τα τμήματα προστίθεται ένα τμήμα προστασίας (parity information) και αυτό μαζί με την αρχική πληροφορία σχηματίζει ένα νέο μπλοκ το οποίο αποστέλλεται και κωδικοποιείται ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα.

Στην περίπτωση που η αρχική πληροφορία δεν υφίσταται κάποια αλλαγή στο νέο ενισχυμένο μπλοκ, δηλαδή απλώς προστίθεται το τμήμα των δεδομένων που αφορά τον εντοπισμό και τη διόρθωση των σφαλμάτων είτε στο αρχικό τμήμα του μπλοκ είτε στο τέλος αυτού, τότε ο κώδικας ονομάζεται συστηματικός. Αυτό σημαίνει ότι (πέρα από τον έλεγχο και τη διόρθωση των τυχόν σφαλμάτων) κατά την αποκωδικοποίηση το πλεονάζον αυτό τμήμα πληροφορίας αφαιρείται. Ο αλγόριθμος Reed Solomon είναι συστηματικός.

Ο RS είναι επιπλέον γραμμικός, δηλαδή η προσθήκη δύο κωδικών λέξεων τμημάτων δημιουργεί μια νέα κωδική λέξη. Επίσης είναι κυκλικός, με την έννοια ότι αν γίνει κυκλική μετατόπιση των συμβόλων η

λέξη που θα προκύψει θα είναι επίσης μια κωδική λέξη. Η κωδικοποίηση RS ανήκει στην οικογένεια κωδικοποιήσεων Bose-Chaudhuri-Hocquenghem (BCH).

Αν σε μια κωδική λέξη έστω και ένα από τα περιεχόμενα bits είναι εσφαλμένα, αυτό λογίζεται ως μια εσφαλμένη κωδική λέξη.

6.3.1.1 Κωδικοποίηση

Ας δώσουμε κάποιους ορισμούς. Λέμε ότι μια κωδικοποίηση Reed Solomon (RS) έχει χαρακτηριστικά (n, k) όπου:

- n : Είναι το μήκος κωδικής λέξης (codeword), η οποία συμπεριλαμβάνει την αρχική πληροφορία αλλά και την πλεονάζουσα.
- k : πλήθος συμβόλων πληροφορίας στη κωδική λέξη.
- m : πλήθος bits σε ένα σύμβολο πληροφορίας.

Εν γένει πρέπει να ισχύει:

$$n \leq 2^m - 1 \quad (4)$$

Με βάση τα παραπάνω εκ του συνόλου των συμβόλων (n) σε μία κωδική λέξη, τα k είναι ωφέλιμα (αντιστοιχούν, δηλαδή, στην πληροφορία). Άρα το πλήθος των συμβόλων διόρθωσης σφαλμάτων είναι $n-k$. Το πλήθος των εσφαλμένων συμβόλων τα οποία μπορούν να διορθωθούν είναι t όπου δίνεται από την παρακάτω σχέση. Το πρώτο σκέλος της εξίσωσης ισχύει στην περίπτωση που η διαφορά $n-k$ είναι ζυγός αριθμός, ενώ το δεύτερο στην περίπτωση που η διαφορά είναι περιττός αριθμός.

$$t = \begin{cases} \frac{n-k}{2} \\ \frac{n-k-1}{2} \end{cases} \quad (5)$$

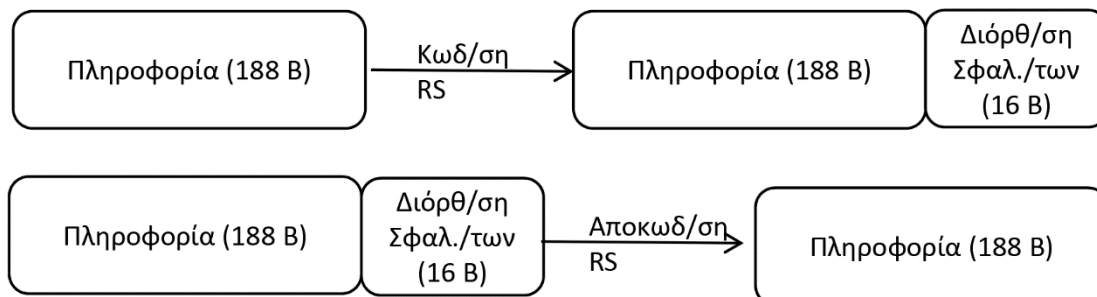
Όσον αφορά τη λειτουργία της συγκεκριμένης κωδικοποίησης, ο κώδικας Reed Solomon βασίζεται σε μια εξειδικευμένη περιοχή των μαθηματικών γνωστή ως Σώματα Galois ή κλειστά σύνολα. Ένα κλειστό σύνολο έχει την ιδιότητα ότι όλες οι αριθμητικές πράξεις (πρόσθεση, αφαίρεση, πολλαπλασιασμός και διαίρεση) στα στοιχεία του συνόλου δίνουν αποτέλεσμα μέσα στο σύνολο.

Η λογική του αλγορίθμου είναι συνοπτικά η εξής:

- Γνωρίζουμε ότι K σημεία ορίζουν ένα πολυώνυμο (μιας μεταβλητής) μεγίστου βαθμού $K-1$. Ο αποστολέας ορίζει ένα πολυώνυμο βαθμού $K-1$, από ένα πεπερασμένο σύνολο πολυωνύμων.
- Στη συνέχεια γίνεται υπερδειγματοληψία: Το πολυώνυμο κωδικοποιείται από την αποτίμηση τιμών σε διάφορα σημεία, περισσότερα από αυτά που είναι απαραίτητα για να καθοριστεί ποιο είναι αυτό το πολυώνυμο.
- Οι τιμές αυτές, οι οποίες είναι περισσότερες από K , αποστέλλονται από τον πομπό στον δέκτη. Αποτελούν την πλεονάζουσα πληροφορία η οποία προστίθεται από τον αλγόριθμο RS.
- Κατά τη μετάδοση ενδεχομένως γίνονται λάθη τα οποία μπορεί να αφορούν τον κύριο όγκο των δεδομένων (το αρχικό δηλαδή μήνυμα) ή και στα πλεονάζοντα δεδομένα.
- Εάν έχουν αποσταλεί αρκετές τιμές, ο δέκτης μπορεί να συμπεράνει το πολυώνυμο και να εξαγάγει τις αρχικές τιμές, διορθώνοντας έτσι τα σφάλματα που έλαβαν χώρα.

Το πρότυπο που καθορίζει την κωδικοποίηση καναλιού στο DVB-T έχει ορίσει συγκεκριμένες τιμές για τις παραπάνω παραμέτρους. Συγκεκριμένα, η πληροφορία αποτελείται από 188 Bytes, στα οποία προστίθενται τα 16 Bytes για τη διόρθωση σφαλμάτων. Αυτό σημαίνει ότι το πλήθος των σφαλμάτων που είναι δυνατόν να διορθωθούν είναι 8 Bytes.

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται η διαδικασία:



Εικόνα 6.6 Κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση πακέτου TS.

Στην περίπτωση του DVB, στο πακέτο του Συρμού Μεταφοράς των 188 Bytes προηγούνται 51 Bytes τα οποία δεν έχουν πληροφορία (Null Bytes), δημιουργώντας ένα σύνολο 239 Bytes. Σε αυτό το σύνολο των 239 Bytes είναι που υπολογίζεται ο κώδικας Reed Solomon των 16 Bytes. Το επιπλέον 51 Bytes δεν αποστέλλονται και αφού η τιμή τους είναι γνωστή μπορούν να δημιουργηθούν εκ νέου στον δέκτη.

Αυτό σημαίνει ότι ο κώδικας RS στην πράξη υπολογίζεται για τα υπόλοιπα 188 Bytes. Η επιλογή των παραμέτρων εκ μέρους του DVB-T έγινε για συμβατότητα με τις επιλογές που είχαν γίνει από το DVB-S (ψηφιακή μετάδοση σε δορυφορικά συστήματα).

Η πιθανότητα ενός λάθους στα κωδικοποιημένα δεδομένα είναι (συχνά) πολύ χαμηλότερη σε σχέση με την πιθανότητα λάθους στην περίπτωση μη χρήσης αυτής. Αυτό είναι στην ουσία το κέρδος της κωδικοποίησης.

6.3.1.2 Αποκωδικοποίηση

Κατά την αποκωδικοποίηση μιας κωδικής λέξης, υπάρχουν 3 πιθανές περιπτώσεις. Η πρώτη περίπτωση έχει να κάνει με το να μην υπάρχουν σφάλματα ή το πλήθος των σφαλμάτων να είναι επαρκώς μικρό ώστε να μπορεί να διορθωθούν. Στην περίπτωση αυτή η αρχικά μεταδιδόμενη κωδική λέξη μπορεί να ανακτηθεί όπως ακριβώς εστάλη από τον πομπό.

Στη δεύτερη περίπτωση έχουμε πάλι σφάλματα, το πλήθος των οποίων υπερβαίνει το επιτρεπτό οπότε δεν είναι δυνατή η διόρθωσή τους. Ο αποκωδικοποιητής θα ανιχνεύσει ότι δεν μπορεί να ανακτήσει τον αρχικό κώδικα και θα δηλώσει το γεγονός. Συγκεκριμένα, θα θέσει την τιμή 1 στο πεδίο Transport Error Indicator (TEI) στην επικεφαλίδα του πακέτου TS.

Υπάρχει, επίσης, μια τρίτη περίπτωση στην οποία έχουμε πάλι σφάλματα των οποίων το πλήθος είναι μεγαλύτερο από το επιτρεπτό (όπως και στη δεύτερη περίπτωση). Εδώ όμως ο αποκωδικοποιητής δεν είναι σε θέση να αντιληφθεί το σφάλμα. Αυτό σημαίνει ότι προβαίνει στην αποκωδικοποίηση και ανακτά μια εσφαλμένη κωδική λέξη χωρίς κάποια περαιτέρω ένδειξη.

6.3.2 Παραδείγματα

6.3.2.1 Χρήση κώδικα για κωδικοποίηση RS

Χρησιμοποιούμε την κωδικοποίηση RS με παραμέτρους (7, 3). Στη συνέχεια προσθέτουμε θόρυβο στις κωδικοποιημένες λέξεις (1 σφάλμα στην πρώτη, 2 στη δεύτερη και 3 στην τρίτη) και προβαίνουμε στην αποκωδικοποίηση. Θα εξετάσουμε τη λειτουργία του RS (41).

Αρχικά δημιουργούμε την κωδικοποίηση θέτοντας το πλήθος των bits ανά σύμβολο, το πλήθος των συμβόλων ανά λέξη και το πλήθος των συμβόλων ανά κωδικοποιημένη λέξη, όπως παριστάνεται στον επόμενο πίνακα.

Δημιουργία Κωδικοποίησης

```

m = 3; % πλήθος bits ανά σύμβολο
k = 3; % πλήθος συμβόλων ανά λέξη (πριν την κωδικοποίηση)
n = 2^m-1; % πλήθος συμβόλων ανά κωδικοποιημένη λέξη
msg = gf([2 7 3; 4 0 6; 5 1 1],m); % 3 λέξεις προς κωδικοποίηση
code = rsenc(msg,n,k); % κωδικοποιημένες λέξεις

```

Πίνακας 6.5 Κώδικας παραδείγματος RS.

Στη συνέχεια δημιουργούμε και προσθέτουμε τον θόρυβο στο αρχικό μας σήμα. Ακολουθεί η αποκωδικοποίηση.

Δημιουργία σήματος θορύβου και αποκωδικοποίηση

```

errors = gf([2 0 0 0 0 0; 3 4 0 0 0 0; 5 6 7 0 0 0],m); %
noisycode = code + errors;
[dec,cnumerr] = rsdec(noisycode,n,k)

```

Πίνακας 6.6 Δημιουργία θορύβου και προσθήκη αυτού στα αρχικά δεδομένα πριν την αποκωδικοποίηση RS.

Τα αποτελέσματα του κώδικα φαίνονται στον επόμενο πίνακα, όπου εμφανίζονται σε δύο μεταβλητές η αποκωδικοποιημένη ακολουθία και το πλήθος των σφαλμάτων.

Αποτελέσματα αποκωδικοποίησης RS σε δεδομένα με θόρυβο

```

Array elements =
2       7       3
4        0       6
0        7       6

cnumerr =
1
2
-1

```

Πίνακας 6.7 Δημιουργία θορύβου και προσθήκη αυτού στα αρχικά δεδομένα πριν την αποκωδικοποίηση RS.

Παρατηρούμε ότι στην πρώτη και τη δεύτερη περίπτωση τα σφάλματα διορθώθηκαν, συγκεκριμένα στην πρώτη περίπτωση είχαμε ένα σφάλμα, ενώ στη δεύτερη δύο. Στην τρίτη περίπτωση ο αλγόριθμος δεν λειτούργησε σωστά, διαφοροποιήθηκε η αρχική πληροφορία, αφού το πλήθος των σφαλμάτων ξεπέρασε το ήμισυ των Bytes που προστέθηκαν για τη διόρθωση των σφαλμάτων.

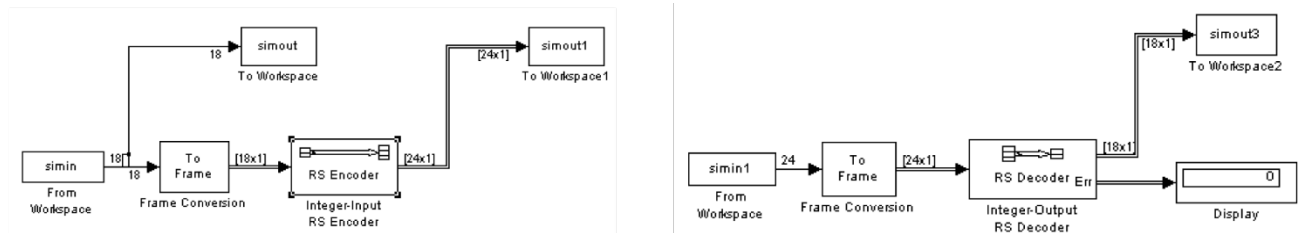
Χρήσιμες πληροφορίες προέκυψαν και από τη μεταβλητή cnumerr η οποία δίνει το πλήθος των σφαλμάτων που αντιμετωπίστηκαν ή -1 για σφάλμα στη λειτουργία του αλγορίθμου.

6.3.2.2 Δημιουργία μοντέλου για υλοποίηση RS

Θα δημιουργήσουμε ένα μοντέλο στο Simulink. Το Simulink αποτελεί τμήμα του Matlab στο οποίο μπορεί να γίνει υλοποίηση μοντέλων, τα οποία εκτελούνται με γραφικό τρόπο. Πραγματοποιούμε τα επόμενα σήματα:

- Εισάγουμε τις βαθμίδες που απεικονίζονται στα σχήματα και συγκεκριμένα τις βαθμίδες «From Workspace», «Frame Conversion» και «RS Encoder».
- Ορίζουμε ένα πίνακα a 1X19 με τιμές από 0 έως 31.
- Χρησιμοποιούμε τον πίνακα που ορίσαμε ως είσοδο στο διάγραμμα του RS encoder, μέσω της μεταβλητής simin (simin=a). Το πρώτο στοιχείο του πίνακα δεν λαμβάνεται υπόψη (θεωρείται time stamp - όπως φαίνεται, μεταφέρονται 18 αριθμοί).
- Θέτουμε sample time = 18 στο block From Workspace.

Αφού πραγματοποιηθούν τα παραπάνω βήματα προκύπτουν τα συστήματα του πομπού και του δέκτη όπως παριστάνονται στο επόμενο σχήμα (αριστερά ο πομπός και δεξιά ο δέκτης).



Εικόνα 6.7 Κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση RS με χρήση βαθμίδων του Simulink.

Η είσοδος του κωδικοποιητή (RS Encoder) αποτελείται από τιμές που συγκροτούν έναν πίνακα 18×1 . Θέτουμε στον κωδικοποιητή τις παραμέτρους $N=24$, $K=18$. Με βάση τις τιμές αυτές, ο κωδικοποιητής προσθέτει 6 bytes πληροφορίας και προκύπτει ένας πίνακας 24×1 . Τα νέα δεδομένα φαίνονται στο workspace στη μεταβλητή `simout1`. Αυτή είναι μια ενδιάμεση μεταβλητή για την μεταφορά των αποτελεσμάτων από το ένα σύστημα στο άλλο. Στο `blocksimout`, `simout1` θέτουμε `SaveFormat = Array`.

Στη συνέχεια αλλάζοντας διαδοχικά έναν, δύο και πέντε αριθμούς (λάθη κατά τη μετάδοση) του πίνακα αυτού, εισάγουμε στη μεταβλητή `simin` (αφού προσθέσουμε ένα αρχικό στοιχείο, μια δηλαδή νέα πρώτη γραμμή), `simin1=simout1` ώστε να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος στο διάγραμμα του `RSdecoder`.

Ο αποκωδικοποιητής λειτουργεί λαμβάνοντας υπόψη τα σφάλματα που έχουν συμβεί κατά τη μετάδοση. Εάν το πλήθος τους είναι κάτω από το μισό των προστιθέμενων δεδομένων (από τον αλγόριθμο RS) τότε μπορούμε να επαναφέρουμε τα αρχικά δεδομένα. Αλλιώς τα σφάλματα δεν μπορούν να διορθωθούν από το λαμβανόμενο σήμα.



[Παρατίθεται βίντεο το οποίο επεξηγεί παράδειγμα το οποίο χρησιμοποιεί το ανωτέρω μοντέλο την κωδικοποίηση / αποκωδικοποίηση RS.](#)

6.4 Εξωτερική Διεμπλοκή

Κατά τη μετάδοση υπάρχει πιθανότητα έξαρσης λαθών (έκρηξης, δηλαδή, σφαλμάτων) τα οποία ενδεχομένως να μην μπορούν να διορθωθούν από τον RS. Είναι ευνόητο ότι σε μια τέτοια περίπτωση θα προτιμούσαμε τα σφάλματα να είναι τοποθετημένα διεσπαρμένα και όχι συνεχόμενα. Σε μια τέτοια περίπτωση θα υπήρχαν περισσότερες πιθανότητες ο αλγόριθμος να μπορεί να διορθώσει τα σφάλματα, εάν μάλιστα στην περίπτωση των συνεχόμενων σφαλμάτων το πλήθος του ξεπερνάει το ήμισυ των δεδομένων για τη διόρθωση σφαλμάτων που εισάγει ο αλγόριθμος.

Η τεχνική του interleaving χρησιμοποιείται για να προσθέσει τυχαιότητα στις θέσεις των σφαλμάτων, ιδίως στην περίπτωση που αυτά παρουσιάζουν πυκνώματα σε μία διάσταση (τυπικά στον χρόνο). Παράδειγμα τέτοιας περίπτωσης είναι οι ριπές σφαλμάτων ή η απώλεια μια συχνότητας στη μετάδοση με διαμόρφωση OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), η οποία χρησιμοποιείται στην ψηφιακή τηλεόραση. Εάν τα σφάλματα αυτά καταφέρουμε να τα διασπείρουμε, να τα απομακρύνουμε, δηλαδή, αρκετά το ένα από το άλλο, υπάρχουν περισσότερες δυνατότητες να διορθωθούν (με τους τυπικούς αλγόριθμους προληπτικής διόρθωσης σφαλμάτων).

Έτσι στον πομπό, τα κωδικοποιημένα bits αναδιατάσσονται με συγκεκριμένο τρόπο. Στον δέκτη επανέρχονται στην αρχική τους θέση με την αντίστροφη διαδικασία πριν την αποκωδικοποίηση. Συγκεκριμένα η διεμπλοκή (interleaving) είναι μια περιοδική και αναστρέψιμη αντιμετάθεση συμβόλων ή bits. Τα σύμβολα ή τα bits επανέρχονται στη σωστή σειρά στον δέκτη.

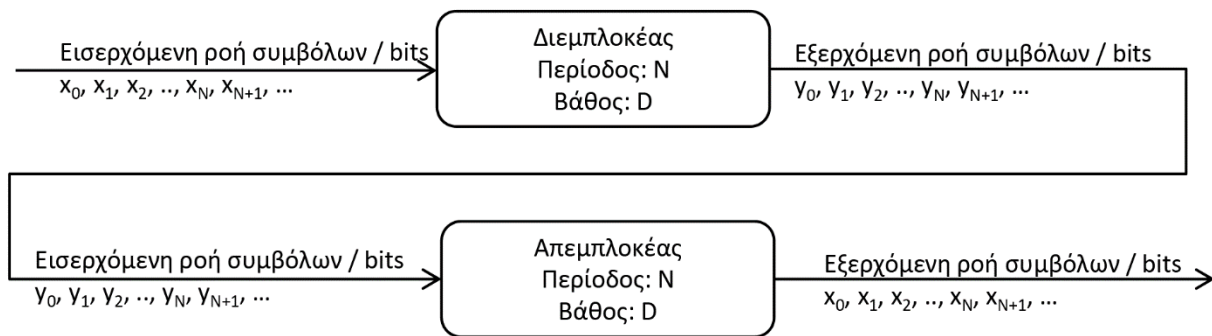
Ας δούμε κάποιους ορισμούς:

- **Περίοδος (period):** Η περίοδος του διεμπλοκέα, έστω L , είναι το πιο σύντομο χρονικό διάστημα εντός του οποίου ο αλγόριθμος αναδιάταξης των συμβόλων ή bits επαναλαμβάνεται. Συχνά η περίοδος L αντιστοιχεί στο μέγεθος μιας κωδικής λέξης (codeword).

- Βάθος (depth): Ως βάθος του διεμπλοκέα, έστω J , ορίζουμε την ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο συμβόλων (ή bits) στην έξοδο του διεμπλοκέα, όταν τα σύμβολα (ή bits) αυτά ήταν συνεχόμενα στην είσοδο αυτού.

Η περίοδος καθορίζεται από τη δομή του διεμπλοκέα και μας δίνει το σύνολο των συμβόλων (ή bits) στο οποίο εφαρμόζεται κάθε φορά ο αλγόριθμος της αντιμετάθεσης. Το βάθος του διεμπλοκέα είναι σημαντικό στην αντιμετώπιση ριπών σφαλμάτων. Συγκεκριμένα, εάν μια ριπή σφαλμάτων έχει μήκος μικρότερο από το βάθος του διεμπλοκέα, τότε δεν θα υπάρχουν συνεχόμενα εσφαλμένα σύμβολα στην έξοδο του διεμπλοκέα (που να οφείλονται βέβαια σε αυτήν τη ριπή σφαλμάτων).

Η διεμπλοκή και η απεμπλοκή των δεδομένων παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 6.8 Διεμπλοκή και απεμπλοκή δεδομένων.

Παρατηρούμε ότι η εισερχόμενη ροή συμβόλων / bits είναι $x_0, x_1, x_2, \dots, x_N, x_{N+1}, \dots$ ενώ η εξερχόμενη ροή συμβόλων / bits από τον διεμπλοκέα είναι $y_0, y_1, y_2, \dots, y_N, y_{N+1}, \dots$.

Διακρίνουμε δύο είδη τέτοιων βαθμίδων:

- Μπλοκ διεμπλοκέας, ο οποίος χρησιμοποιείται μετά τη συνελκτική κωδικοποίηση και θα εξεταστεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στη συνέχεια.
- Συνελκτικός διεμπλοκέας, ο οποίος χρησιμοποιείται σε αυτό το στάδιο και θα το εξετάσουμε στη συνέχεια αμέσως μετά.

Στην επόμενη ενότητα επεξηγείται ο διεμπλοκέας τύπου μπλοκ, ο οποίος και εφαρμόζεται στα δεδομένα που προκύπτουν από τον αλγόριθμο RS.

6.4.1 Εξωτερική Διεμπλοκή

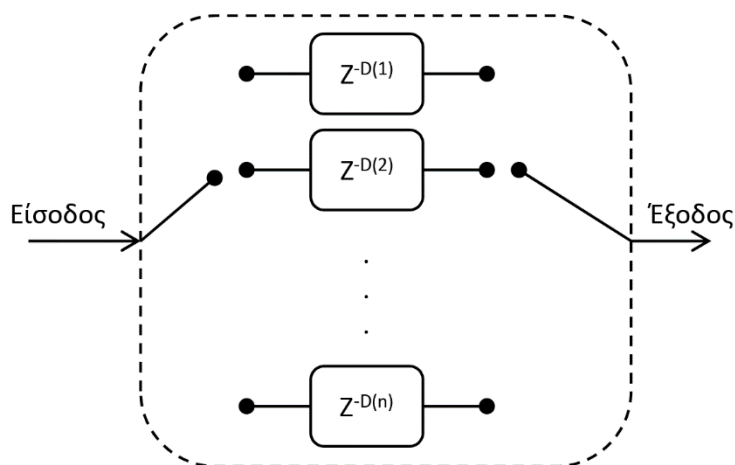
Ο διεμπλοκέας αποτελείται από ένα σύνολο καταχωρητών ολίσθησης με μια σταθερή καθυστέρηση. Οι καθυστερήσεις αυτές συνήθως είναι ακέραια πολλαπλάσια μιας ελάχιστης καθυστέρησης, χωρίς θεωρητικά να αποκλείεται και η υποστήριξη αυθαίρετων τιμών για την καθυστέρηση κάθε κλάδου. Η λειτουργία της εξωτερικής διεμπλοκής αποτελείται από τα εξής βήματα:

- Κάθε εισερχόμενο σύμβολο (ή bit) εγγράφεται στον τρέχοντα καταχωρητή (δηλαδή το επόμενο σύμβολο θα καταχωρηθεί στον επόμενο καταχωρητή και ούτω κάθε εξής).
- Με την καταχώρηση του εισερχόμενου συμβόλου, το παλαιότερο σύμβολο στον τρέχοντα καταχωρητή εγγράφεται στην έξοδο.

Η ανωτέρω διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ολοκληρωθεί το σύνολο των συμβόλων. Στην έξοδο ακολουθείται η αντίστοιχη διαδικασία, μόνο που, όπως θα παρατηρήσουμε, ο απεμπλοκέας αποτελείται από κλάδους με καθυστερήσεις στην ανάστροφη σειρά (σε σχέση με τον διεμπλοκέα).

Η υλοποίηση ενός συνελκτικού διεμπλοκέα μπορεί να γίνει με τη χρήση δύο περιστρεφόμενων διακοπών, ένα στην είσοδο και έναν στην έξοδο του. Το πλήθος διακλαδώσεων (συνήθως 12) συνδέονται κυκλικά και δρουν ως καταχωρητές ολίσθησης τύπου FIFO (First In First Out). Υπάρχει, επίσης, η δυνατότητα κάποια σύμβολα, όπως, για παράδειγμα, τα σύμβολα που αφορούν τον συγχρονισμό να διέρχονται χωρίς καθυστέρηση.

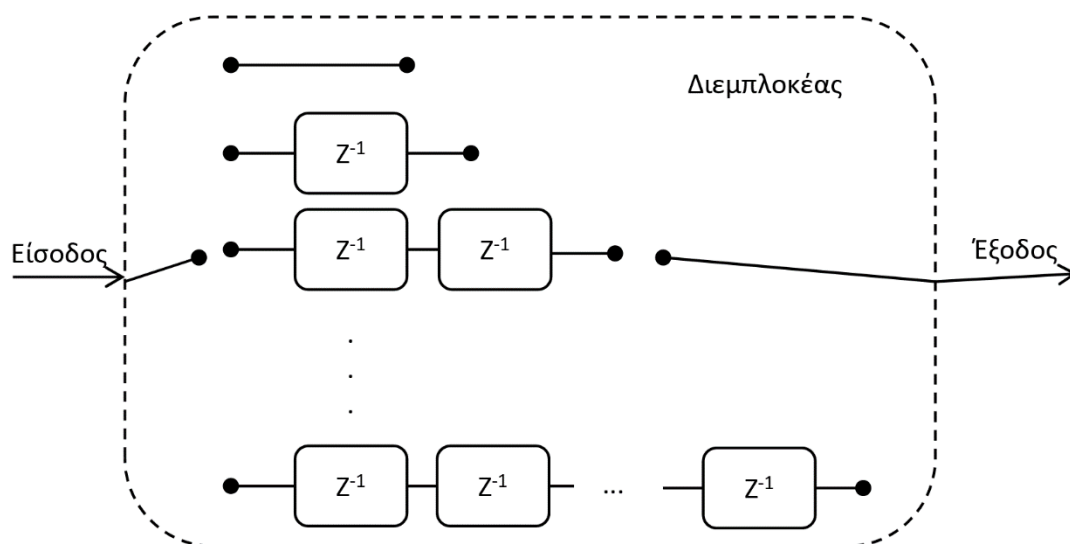
Στο επόμενο σχήμα παρίσταται ένας γενικός διεμπλοκέας, με αυθαίρετες καθυστερήσεις σε κάθε κλάδο (1, 2, .. n). Ένας τέτοιος διεμπλοκέας ονομάζεται διεμπλοκέας *Forney* (42).



Εικόνα 6.9 Διεμπλοκέας *Forney*.

Στην περίπτωση που οι καθυστερήσεις αυξάνουν γραμμικά σε κάθε κλάδο έχουμε το επόμενο σχήμα. Ο διεμπλοκέας αυτός είναι ο τύπος που θα εξετάσουμε και στη συνέχεια.

Παρατηρούμε ότι είναι δυνατόν από μια διακλάδωση (στην προκειμένη περίπτωση την πρώτη) να μην έχουμε καθόλου καθυστέρηση. Τα Bytes συγχρονισμού διέρχονται από τον κλάδο υπ' αριθμό 0 ώστε να μην έχουν κάποια καθυστέρηση.



Εικόνα 6.10 Διεμπλοκέας *Forney* με γραμμικά αυξανόμενη καθυστέρηση ανά κλάδο.

Στον διεμπλοκέα Forney, μετά τη διέλευση ενός πλήθους από σύμβολα από τον διεμπλοκέα και την επαναφορά της αρχικής διάταξης από τον απεμπλοκέα, υπεισέρχεται κάποια καθυστέρηση, μεταξύ της αρχικής και της τελικής αλληλουχίας συμβόλων. Η καθυστέρηση αυτή υπολογίζεται με βάση τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του διεμπλοκέα.

Στη γενική περίπτωση η σχέση υπολογισμού είναι η επόμενη:

$$\text{Καθυστέρηση} = \text{Πλήθος καταχωρητών} * \text{Μέγιστη καθυστέρηση καταχωρητή} \quad (6)$$

Στην περίπτωση που έχουμε μια πιο απλοποιημένη μορφή, όπως στο προηγούμενο σχήμα, τότε η σχέση υπολογισμού της καθυστέρησης απλοποιείται στην επόμενη:

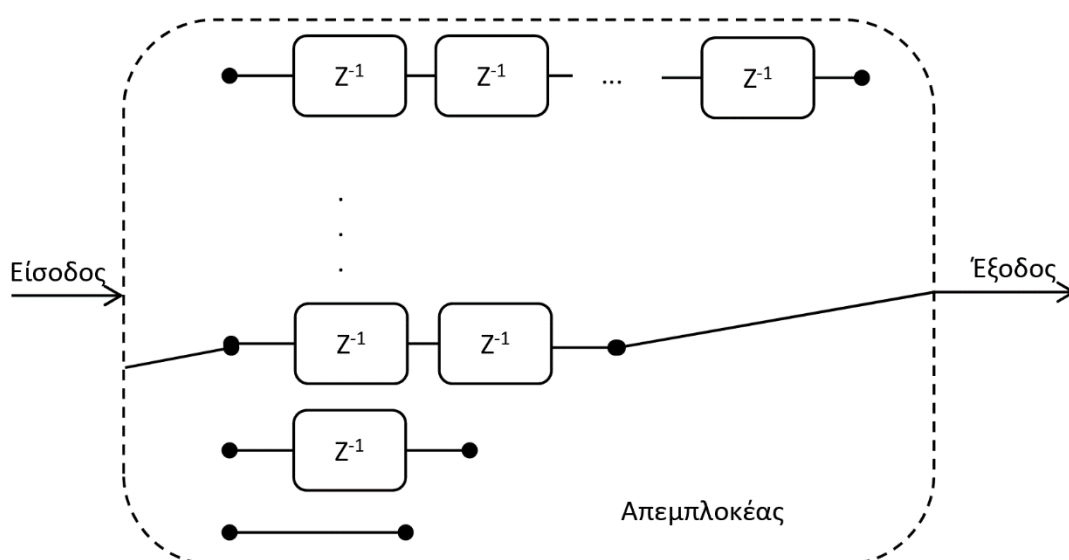
$$\text{Καθυστέρηση} = T * (\text{Πληθος καταχωρητών} * (\text{Πλήθος καταχωρητών} - 1)) \quad (7)$$

Θεωρούμε ότι N είναι το πλήθος των καταχωρητών και T η καθυστέρηση σε κάθε καταχωρητή. Το αποτέλεσμα αυτό προκύπτει αθροίζοντας την καθυστέρηση που υπεισέρχεται σε κάθε κλάδο, τόσο στον διεμπλοκέα όσο και στον απεμπλοκέα. Τα αθροίσματα αυτά αποτελούν άθροισμα όρων αριθμητικής προόδου και η σχέση προκύπτει με βάση τη σχέση υπολογισμού του αθροίσματος.

6.4.2 Εξωτερική Απεμπλοκή

Ο απεμπλοκέας έχει μορφή αντίστοιχη με τον διεμπλοκέα με αντίστροφη σειρά όμως των κλάδων. Συνολικά, το πλήθος των κλάδων είναι ίσο στον διεμπλοκέα και τον απεμπλοκέα όπως και η προκαλούμενη καθυστέρηση.

Στο επόμενο σχήμα παρίσταται η γενική μορφή ενός απεμπλοκέα.



Εικόνα 6.11 Διεμπλοκέας Forney με γραμμικά αυξανόμενη καθυστέρηση ανά κλάδο.

Στην περίπτωση του DVB-T, ο διεμπλοκέας αποτελείται από 12 κλάδους και η αύξηση της καθυστέρησης σε κάθε έναν από αυτούς είναι $M=17$.

6.4.3 Παραδείγματα

Στην ενότητα αυτή θα εξετάσουμε τρία παραδείγματα. Το πρώτο αφορά την εκτέλεση στο χαρτί ενός απλού παραδείγματος διεμπλοκής και απεμπλοκής. Στο δεύτερο και το τρίτο παράδειγμα θα δούμε υλοποιήσεις διεμπλοκής και απεμπλοκής στο Matlab και το Simulink αντίστοιχα.

6.4.3.1 Απλό παράδειγμα διεμπλοκής - απεμπλοκής

Ας θεωρήσουμε ένα ζευγάρι απλών διεμπλοκών Forney, έκαστος με τρεις κλάδους, με 1, 2 και 3 καθυστερήσεις αντίστοιχα. Ας θεωρήσουμε, επίσης, ότι εισέρχεται συρμός δεδομένων αποτελούμενος από 15 Bytes. Στο πλαίσιο του παραδείγματος θα δούμε την αντιμετάθεση που υφίστανται τα δεδομένα εισόδου και τον τρόπο που αυτά επανέρχονται στην αρχική του κατάσταση, καθώς και την προκαλούμενη καθυστέρηση.

Έχουμε, λοιπόν, τα επόμενα:

Είσοδος: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15

Επεξεργαζόμαστε τα δεδομένα σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας που επξηγήσαμε παραπάνω στους τρεις κλάδους του διεμπλοκέα. Η έξοδος του διεμπλοκέα είναι και η είσοδος στη βαθμίδα επαναφοράς. Εφαρμόζοντας την αντίστοιχη λογική στον απεμπλοκέα λαμβάνουμε τα αρχικά δεδομένα.

Έξοδος απεμπλοκέα: 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15

Παρατηρούμε ότι προηγούνται 6 μηδενικές τιμές, οι οποίες αφορούν στην καθυστέρηση. Για απλότητα, χωρίς όμως βλάβη της γενικότητας, θεωρήσαμε τις αρχικές τιμές στους καταχωρητές των βαθμίδων να είναι μηδενικές.

6.4.3.2 Παράδειγμα στο Matlab

Στο παράδειγμα αυτό δημιουργούμε τυχαία δεδομένα, ορίζουμε τον διεμπλοκέα, ο οποίος στην περίπτωσή μας αποτελείται από 5 κλάδους με έναν καταχωρητή έκαστος εξ αυτών. Το μέγεθος των καταχωρητών (άρα και οι αντίστοιχες καθυστερήσεις των κλάδων) είναι 0, 3, 6, 9 και 12.

Στη συνέχεια γίνεται η διεμπλοκή των δεδομένων και η απεμπλοκή αυτών, με προηγούμενη παραμετροποίηση του απεμπλοκέα. Το παράδειγμα ολοκληρώνεται με τον έλεγχο για το κατά πόσο τα δεδομένα εισόδου ισούνται με τα δεδομένα εξόδου (44).

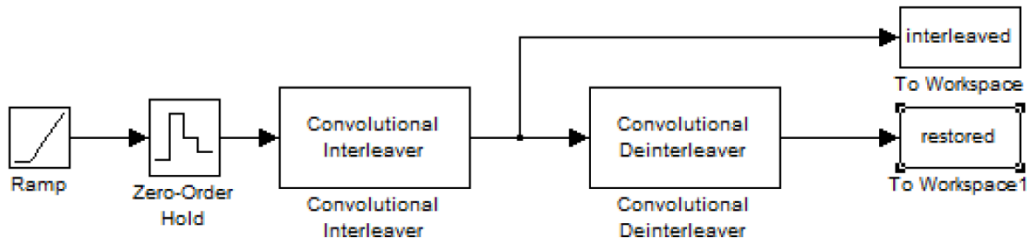
Κώδικας Matlab για διεμπλοκή και απεμπλοκή δεδομένων
<pre>x = randint(100,1); % δημιουργία τυχαίων δεδομένων nrows = 5; % χρήση 5 καταχωρητών slope = 3; % θέτουμε τις καθυστερήσεις των κλάδων στις εξής τιμές 0, 3, 6, 9 και 12. y = convintrlv(x,nrows,slope); % Διεμπλοκή δεδομένων εισόδου delay = [0:3:12]; % καθυστέρηση x1 = muxintrlv(y,delay); % Απεμπλοκή των δεδομένων isequal(x,x1) % έλεγχος κατά πόσο τα δεδομένα εισόδου ισούνται με τα δεδομένα εξόδου</pre>

Πίνακας 6.8 Διεμπλοκή και απεμπλοκή στο Matlab.

Η διεμπλοκή και η απεμπλοκή μπορεί να συνδυαστεί ως συνέχεια του παρόντος παραδείγματος για να φανεί η επίδραση που έχει η διεμπλοκή στην αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου ReedSolomon. Συγκεκριμένα, με τα δεδομένα του προηγούμενου παραδείγματος ο RS μπορεί να διορθώσει τα σφάλματα μόνο εάν έχουμε 2 συνεχόμενα σφάλματα.

6.4.3.3 Παράδειγμα στο Simulink

Ο συνελκτικός διεμπλοκίας συνήθως παρέχεται ως βαθμίδα, αποτελούμενη από καταχωρητές, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 6.12 Μοντέλο συνελκτικής διεμπλοκής.

Το μοντέλο αποτελείται από τα ακόλουθα τμήματα:

- Πηγή πληροφορίας: Η πηγή πληροφορίας παρέχει μια αλληλουχία συμβόλων, τα σύμβολα αυτά πρόκειται να υποστούν την αντιμετάθεση στο πλαίσιο της διεμπλοκής. Στην περίπτωση του παραδείγματος, η πηγή είναι μια συνάρτησης ράμπας, όπου η έξοδος ξεκινώντας από μια αρχική τιμή αυξάνει με μια δεδομένη κλίση.
- Zero-order hold: Μετατρέπει το διακριτό σήμα εισόδου σε συνεχές, κρατώντας την ίδια τιμή για κάθε περίοδο. Είναι μετατροπέας σήματος από διακριτό σε συνεχές (digital to analog converter).
- Convolutional interleaver: Συνελκτικός διεμπλοκίας
- Convolutional deinterleaver: Συνελκτικός απεμπλοκίας
- Το workspace: Βαθμίδα εμφάνισης αποτελεσμάτων

Η εισερχόμενη είσοδος αντιμετωπίζεται και στη συνέχεια επανέρχεται στην αρχική της κατάσταση. Στις βαθμίδες εξόδου παρατηρούμε την έξοδο του διεμπλοκία και του απεμπλοκία.

Παράμετρος	Βαθμίδα	Τιμή	Επεξήγηση
Initial output	Ramp	0	Τιμή εκκίνησης
Slope	Ramp	1	Κλίση, ρυθμός αλλαγής της εξόδου
Start time	Ramp	0	Χρονική στιγμή έναρξης
Sample time	Zero-order hold	1	Χρόνος δειγματοληψίας
Rows of shift registers	Convolutional interleaver	3	Πλήθος καταχωρητών
Register length step	Convolutional interleaver	2	Μήκος βημάτων καταχωρητή. Δίνει την καθυστέρηση σε κάθε καταχωρητή, ώστε η είσοδος να εμφανιστεί στην έξοδο. Για τον καταχωρητή υπ' αριθμό N ισούται με το γινόμενο του (N-1) επί το μήκος του καταχωρητή. Θεωρούμε ότι ο πρώτος καταχωρητής έχει μηδενική καθυστέρηση.
Initial conditions	Αρχικές τιμές		Οι αρχικές τιμές του καταχωρητή. Η τιμή είναι δυνατόν να είναι βαθμωτή μεταβλητή (οπότε λαμβάνεται από όλους τους καταχωρητές) ή πίνακας όπου κάθε τιμή αντιστοιχεί σε έναν καταχωρητή. Επειδή ο πρώτος καταχωρητής δεν έχει καθυστέρηση, δεν έχει σημασία η αρχική του τιμή.

Πίνακας 6.9 Παράμετροι μοντέλου συνελκτικού διεμπλοκία.

Τα αποτελέσματα από την εκτέλεση του μοντέλου, με είσοδο τους ακέραιους από το 0 έως το 20, απεικονίζονται στον επόμενο πίνακα.

Παράμετρος	Τιμές
Αρχικές τιμές	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20
Μετά την αντιμετάθεση	0, -2, -3, 3, -2, -3, 6, 1, -3, 9, 4, -3, 12, 7, 2, 15, 10, 5, 18, 13, 8
Τελική έξοδος	-1, -2, -3, -1, -2, -3, -1, -2, -3, -1, -2, -3, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8

Πίνακας 6.10 Αποτελέσματα μοντέλου συνελκτικού διεμπλοκέα.

Παρατηρούμε ότι η τελική καθυστέρηση είναι 12 περίοδοι. Ο συνελκτικός διεμπλοκέας έχει τρεις γραμμές. Στην πρώτη δεν έχουμε καθυστέρηση, στη δεύτερη έχουμε καθυστέρηση δύο χρονικών μονάδων και στην τρίτη έχουμε καθυστέρηση τεσσάρων χρονικών μονάδων. Οι επιμέρους αυτές καθυστερήσεις δίνουν άθροισμα 12 χρονικών μονάδων (περιόδων).

Αναφορικά με την τελική έξοδο μετά την απεμπλοκή, παρατηρούμε ότι προηγούνται 12 αρνητικοί αριθμοί οι οποίοι αποτελούν την καθυστέρηση. Το (απόλυτο) μέγεθος των αριθμών αυτών μας δίνει το βάθος του καταχωρητή στον διεμπλοκέα και τον απεμπλοκέα.

6.5 Εσωτερική Κωδικοποίηση

6.5.1 Εσωτερική Κωδικοποίηση

Η εσωτερική κωδικοποίηση αποσκοπεί στη διόρθωση λαθών και δρα συμπληρωματικά ως προς την κωδικοποίηση κατά Reed Solomon. Χρησιμοποιείται στο ψηφιακό βίντεο, στις ασύρματες και δορυφορικές επικοινωνίες. Η εσωτερική κωδικοποίηση ακολουθεί την εξωτερική διεμπλοκή. Πρόκειται περί συνελκτικής κωδικοποίησης (convolutional encoding) (45).

Για τη μεν κωδικοποίηση χρησιμοποιείται ο κωδικοποιητής Trellis για την αποκωδικοποίηση ο αποκωδικοποιητής Viterbi. Επειδή η εσωτερική κωδικοποίηση κατά κανόνα δύναται να διπλασιάσει το πλήθος των δεδομένων, είναι δυνατόν να γίνει *διάτρηση (puncturing)* ώστε να μειωθεί ο ρυθμός, όπως θα φανεί στα επόμενα.

Η λογική του συνελκτικού κωδικοποιητή είναι η χρήση καταχωρητών, κάθε ένας εκ των οποίων μπορεί να αποθηκεύσει ένα bit. Ο κωδικοποιητής έχει 2 αθροιστές (πύλες Exclusive Or – XOR), οι οποίες λαμβάνουν δεδομένα από κάποιους από τους καταχωρητές, χρησιμοποιώντας πολυώνυμα – γεννήτορες. Υπενθυμίζεται το αποτέλεσμα της πράξης σε μία πύλη XOR, δύο εισόδων:

Είσοδος 1	Είσοδος 2	Έξοδος
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Πίνακας 6.11 Πύλη XOR.

Οι συνελκτικοί κωδικοποιητές είναι δυνατόν να χρησιμοποιούν ανάδραση ή όχι. Η μη χρήση ανάδρασης τους κάνει πιο απλούς στη δομή. Από συστημική άποψη οι κωδικοποιητές χωρίς ανάδραση μπορούν να θεωρηθούν ψηφιακά φίλτρα πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (FIR, Finite Impulse Response). Οι κωδικοποιητές με ανάδραση είναι ψηφιακά φίλτρα μη πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (IIR, Infinite Impulse Response). Ένας άλλος τρόπος να θεωρήσουμε τον κωδικοποιητή είναι ως μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων.

Η έξοδος προκύπτει από τις πράξεις που εκτελούνται στους αθροιστές και με χρήση των τιμών που είναι αποθηκευμένες στους καταχωρητές. Σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί κάποια bits να τροφοδοτούν απευθείας την έξοδο. Το πλήθος των bits της εξόδου προκύπτει από το πλήθος της εισόδου επί το πλήθος των αθροιστών. Αυτό σημαίνει ότι στην τυπική περίπτωση που έχουμε δύο αθροιστές ο ρυθμός (σε bits per second) της εξόδου θα είναι διπλάσιος σε σχέση με αυτόν της εισόδου.

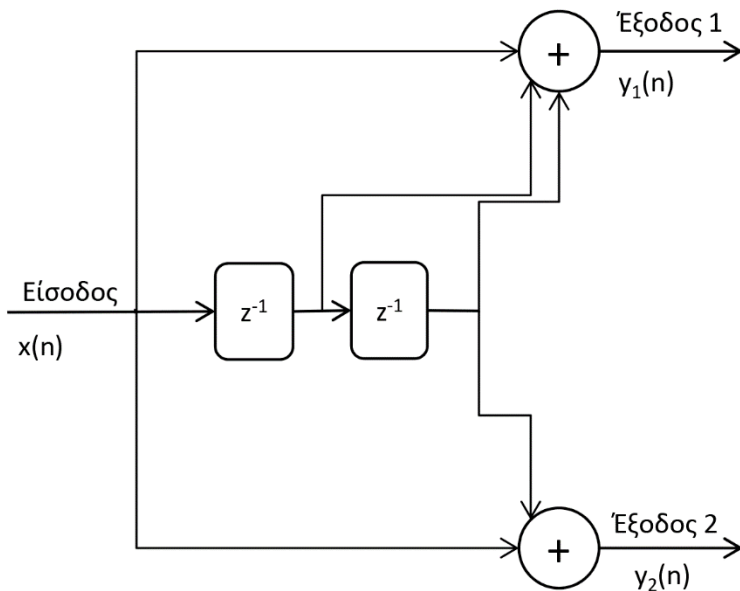
Ο συνελκτικός κωδικοποιητής χαρακτηρίζεται από το πλήθος των μνημών που διαθέτει. Το πλήθος των μνημών καθορίζει και το πλήθος των πιθανών καταστάσεων στις οποίες μπορεί να βρεθεί ο κωδικοποιητής. Δίνουμε κάποιους χρήσιμους ορισμούς:

- Ρυθμός κώδικα (code rate) k/n , όπου k ο ρυθμός των εισερχόμενων δεδομένων στον κωδικοποιητή (σε bits / sec) και n ο ρυθμός των δεδομένων που εξέρχονται από τον κωδικοποιητή (σε bits / sec). Ο ρυθμός κώδικα εξαρτάται από το πλήθος των εξόδων του κωδικοποιητή. Η είσοδος θεωρούμε ότι αποτελείται από μία και μόνο ροή. Η βασική τιμή του ρυθμού κώδικα είναι $1/2$ (ένα προς δύο).
- Μήκος περιορισμού (constraint length) M , το οποίο αντιστοιχεί στις θέσεις μνήμης, δηλαδή, στο πλήθος bits που είναι αποθηκευμένα και επηρεάζουν την έξοδο του κωδικοποιητή. Το μήκος περιορισμού καθορίζει και τις καταστάσεις τις οποίες μπορεί να λάβει ο κωδικοποιητής.

Όπως και στην περίπτωση του κώδικα Reed Solomon, εάν τα δεδομένα της εισόδου χρησιμοποιούνται ως έχουν στην έξοδο, η κωδικοποίηση ονομάζεται *συστηματική*. Δεδομένου ότι ο εσωτερικός κωδικοποιητής ο οποίος προβλέπεται από το πρότυπο είναι αρκετά σύνθετος ώστε να δούμε απευθείας τον μηχανισμό λειτουργίας του, θα εξετάσουμε ένα πιο απλό και ευκολότερα παρουσιάσιμο παράδειγμα.

6.5.1.1 Παράδειγμα Συνελικτικού Κωδικοποιητή

Το παράδειγμα που θα εξετάσουμε έχει ρυθμό κώδικα $k/n=1/2$ και μήκος περιορισμού $M=2$. Παρατηρούμε ότι από συστημική πλευρά είναι ένα Γραμμικό Χρονικά Αναλλοίωτο Σύστημα (Linear Time Invariant, LTI) και συγκεκριμένα ένα φίλτρο πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (Finite Impulse Response, FIR). Ο κωδικοποιητής απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 6.13 Κωδικοποιητής με $M=2$.

Ο κωδικοποιητής περιγράφεται με τις επόμενες σχέσεις. Αρχικά στο πεδίο του χρόνου προκύπτουν οι εξής σχέσεις (το n αντιστοιχεί στον διακριτό χρόνο, αφού τα συστήματα είναι διακριτού χρόνου).

$$\begin{aligned} y_1(n) &= x(n) + x(n-1) + x(n-2) \\ y_2(n) &= x(n) + x(n-2) \end{aligned} \quad (8)$$

Λαμβάνουμε τον μετασχηματισμό Z στις δύο παραπάνω σχέσεις, όπου έστω $X(z)$ και $Y(z)$ οι μετασχηματισμοί Z της εισόδου και της εξόδου αντίστοιχα.

$$Y_1(z)=X(Z)+z^{-1}X(Z)+z^{-2}X(Z)$$

$$Y_2(z)=X(Z)+z^{-2}X(Z)$$

(9)

Οι συναρτήσεις μεταφοράς είναι οι επόμενες:

$$H_1(z)=1+z^{-1}+z^{-2}$$

$$H_2(z)=1+z^{-2}$$

(10)

Προκειμένου να εξηγήσουμε τη λειτουργία του κωδικοποιητή και αντίστοιχα του αποκωδικοποιητή, θα κατασκευάσουμε αρχικά τον πίνακα καταστάσεων (ή, αλλιώς, τον πίνακα μετάβασης καταστάσεων), καθώς και τον πίνακα εξόδων. Ο πρώτος, ο πίνακας καταστάσεων, δείχνει τη μεταβολή των καταστάσεων του αποκωδικοποιητή καθώς εισέρχονται είσοδοι με διαφορετικές τιμές. Ο δεύτερος, ο πίνακας εξόδων, δείχνει τις εξόδους του κωδικοποιητή για τις διαφορετικές εισόδους που δέχεται.

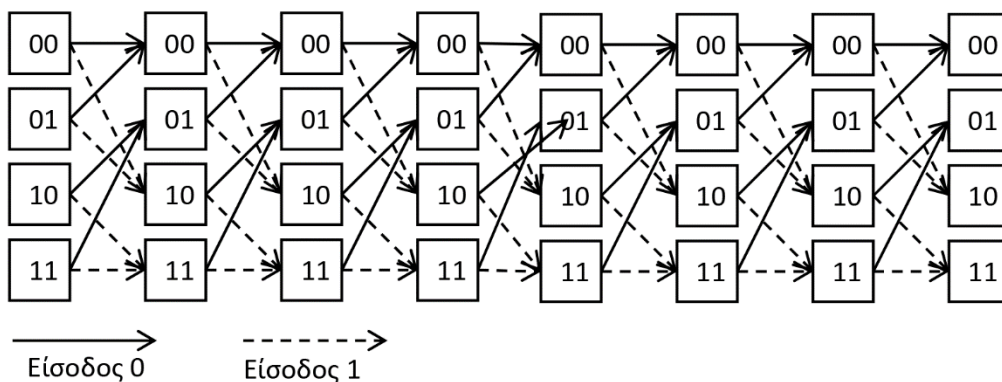
Οι έξοδοι του κωδικοποιητή αποστέλλονται (εν γένει αφού υποστούν περαιτέρω επεξεργασία, την οποία στο παράδειγμά μας δεν λαμβάνουμε υπόψη) και αποτελούν την είσοδο του αποκωδικοποιητή. Με βάση την είσοδο που δέχεται ο αποκωδικοποιητής και τη γνώση της δομής του κωδικοποιητή, πρέπει να είναι σε θέση να δημιουργήσει εκ νέου την αρχική είσοδο του κωδικοποιητή αλλά και να διορθώσει μέχρι κάποιο πλήθος τυχόν σφαλμάτων, τα οποία έχουν λάβει χώρα κατά την μετάδοση.

Ο πίνακας καταστάσεων παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Είσοδος	Τρέχουσα Κατάσταση		Επόμενη Κατάσταση	
0	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	1	0	0	1
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	1	0
1	1	0	1	1
1	1	1	1	1

Πίνακας 6.12 Πίνακας καταστάσεων.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα μπορούμε να φτιάξουμε το διάγραμμα Trellis (διάγραμμα καταστάσεων) το οποίο δείχνει την αλληλουχία των καταστάσεων, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα. Το διάγραμμα καταστάσεων δείχνει την αλληλουχία καταστάσεων με βάση την εκάστοτε είσοδο στον κωδικοποιητή.



Εικόνα 6.14 Διάγραμμα Trellis.

Οι εξόδοι του κωδικοποιητή υπολογίζονται με χρήση των προηγούμενων εξισώσεων. Προκύπτει ο επόμενος πίνακας:

Είσοδος	Τρέχουσα Κατάσταση		Έξοδοι	
0	0	0	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	1
1	0	1	0	0
1	1	0	0	1
1	1	1	1	0

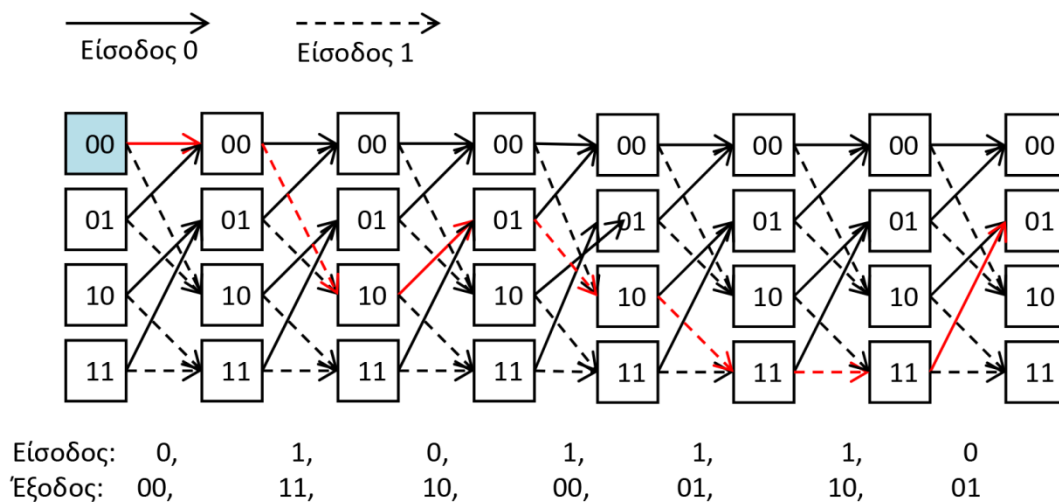
Πίνακας 6.13 Πίνακας εξόδων.

Μια κωδικοποίηση παρίσταται στον αποκωδικοποιητή ως αλληλουχία βημάτων στο γράφημα (στο διάγραμμα Trellis). Στην περίπτωση του παραδείγματος αναπαρίσταται με την κόκκινη γραμμή (συνεχή και διακεκομμένη). Εάν δεν έχει προκύψει κάποιο σφάλμα κατά τη μετάδοση και την εν γένει επεξεργασία των δεδομένων, τότε τα δεδομένα που εισέρχονται στον αποκωδικοποιητή ταιριάζουν απόλυτα με κάποιο από τα μονοπάτια, οπότε μπορεί να γίνει με ξεκάθαρο τρόπο η αποκωδικοποίηση.

Στην περίπτωση όμως που έχουν υπεισέλθει σφάλματα, το μονοπάτι δεν θα ταιριάζει απόλυτα. Θα υπάρχουν διαφοροποιήσεις οι οποίες ορίζουν τις αποστάσεις. Η δυνατότητα διόρθωσης σφαλμάτων του αλγορίθμου υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση, όπου d είναι η ελάχιστη απόσταση Hamming μεταξύ των διαφορετικών μονοπατιών.

$$t = (d-1)/2 \quad (11)$$

Ο αλγόριθμος αποκωδικοποίησης ταιριάζει τη λαμβανόμενη ακολουθία με τα διάφορα πιθανά μονοπάτια προσπαθώντας να ελαχιστοποιήσει τις αποστάσεις (τις διαφοροποιήσεις, δηλαδή, μεταξύ τους). Θεωρώντας αρχική κατάσταση στο (0, 0) και είσοδο (0, 1, 0, 1, 1, 1, 0) θα δημιουργήσουμε το διάγραμμα Trellis και τις αντίστοιχες εξόδους.



Εικόνα 6.15 Διάγραμμα Trellis.

Η λειτουργία του αποκωδικοποιείται και βασίζεται στις εξής αρχές. Ο αποκωδικοποιητής γνωρίζει το διάγραμμα καταστάσεων. Υπολογίζει την ομοιότητα, την απόσταση Hamming, μεταξύ του λαμβανόμενου σήματος κάποια χρονική στιγμή και των μονοπατιών που οδηγούν σε κάθε κατάσταση την ίδια χρονική στιγμή. Αποκλείει τα μονοπάτια που απέχουν από την πιο πιθανά σωστή επιλογή. Η πολυπλοκότητα της αποκωδικοποίησης μειώνεται όσο πιο σύντομα αποκλείονται τα ανεπιθύμητα μονοπάτια.

Ας θεωρήσουμε ότι στο παράδειγμά μας αντί να πάρουμε την πραγματική έξοδο του κωδικοποιητή, η οποία είναι 00, 11, 10, 00, λαμβάνουμε εσφαλμένη είσοδο 00, 11, 11, 00.

Για $n=0$ θεωρούμε ότι είμαστε στη μηδενική κατάσταση. Τη χρονική στιγμή $n=1$ ο αποκωδικοποιητής μπορεί να μεταβεί σε 2 καταστάσεις

- την κατάσταση 00, με έξοδο 00 και
- την κατάσταση 10 με έξοδο 11

Ο αποκωδικοποιητής έλαβε το 00, οπότε οι αποστάσεις είναι 0 και 2 αντίστοιχα. Τη χρονική στιγμή $n=2$ ο αποκωδικοποιητής μπορεί να μεταβεί σε 4 καταστάσεις

- Για προηγούμενη κατάσταση 00
 - ο την κατάσταση 00, με έξοδο 00 και
 - ο την κατάσταση 10 με έξοδο 11
- Για προηγούμενη κατάσταση 10
 - ο την κατάσταση 01, με έξοδο 10 και
 - ο την κατάσταση 11 με έξοδο 01

Ο αποκωδικοποιητής έλαβε το 11, οπότε οι αποστάσεις (αθροιζόμενες) είναι 0+2, 0+0, 1+2, 1+2 αντίστοιχα. Ο αλγόριθμος υπολογίζει τις αποστάσεις και διατηρεί, π.χ., ανά δύο χρονικές στιγμές αυτές με τη μικρότερη απόσταση, δηλαδή τη 10.

Τη χρονική στιγμή $n=3$ ο αποκωδικοποιητής είναι στη 10 και μπορεί να μεταβεί σε δύο καταστάσεις:

- την 11, με έξοδο 01 και
- την 01 με έξοδο 10

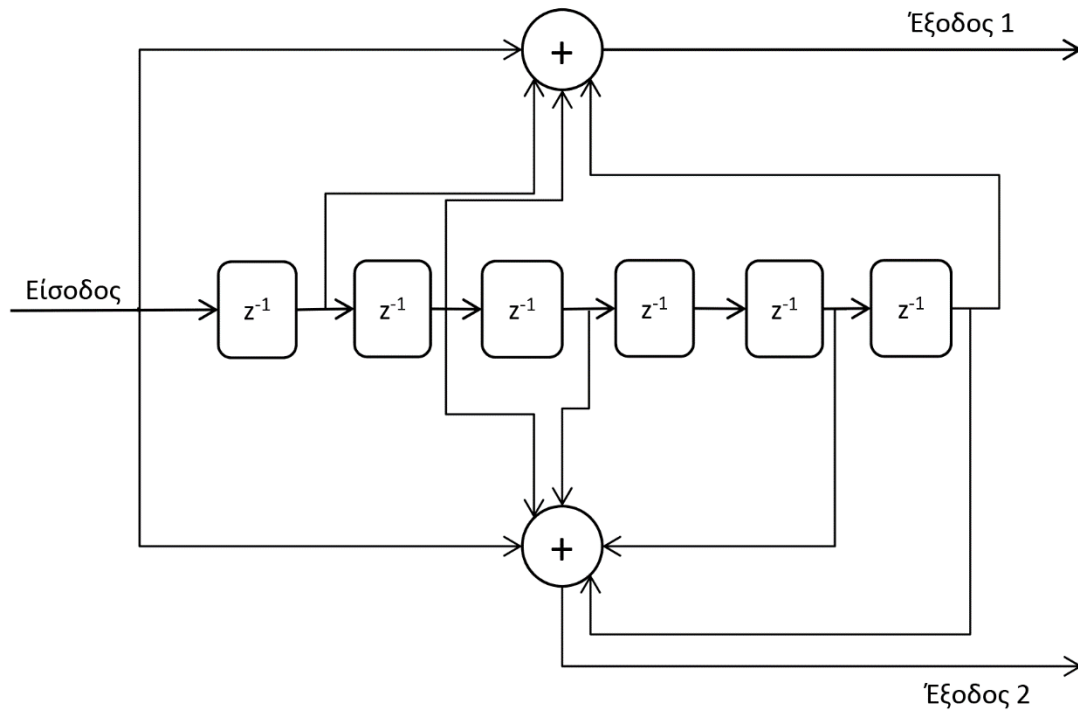
Ο αποκωδικοποιητής έστω ότι έλαβε το 11, αντί για το 10, οπότε οι αποστάσεις είναι 1 και 1 αντίστοιχα 1 και 1. Τη χρονική στιγμή $n=4$ ο αποκωδικοποιητής μπορεί να μεταβεί σε 4 καταστάσεις:

- Για προηγούμενη κατάσταση 11
 - ο την κατάσταση 11, με έξοδο 10 και
 - ο την κατάσταση 01 με έξοδο 01
- Για προηγούμενη κατάσταση 01
 - ο την 10, με έξοδο 00 και
 - ο την 00 με έξοδο 11

Ο αποκωδικοποιητής έλαβε το 00, οπότε οι αποστάσεις είναι 1+1, 1+1, 0+1, 2+1 αντίστοιχα. Επιλέγει την κατάσταση 10 και ως προηγούμενη κατάσταση την 01.

6.5.1.2 Συνελικτικός Κωδικοποιητής Προτύπου του ETSI

Ο τυπικός συνελικτικός κωδικοποιητής ο οποίος περιγράφεται στο σχετικό πρότυπο (46) παρίσταται στο επόμενο σχήμα. Η ύπαρξη 6 μνημών δημιουργεί 64 καταστάσεις.



Εικόνα 6.16 Εσωτερικός κωδικοποιητής σύμφωνα με το πρότυπο της ψηφιακής τηλεόρασης.

Οι συναρτήσεις μεταφοράς είναι:

$$\begin{aligned} Y_1(z) &= X(Z) + z^{-1}X(Z) + z^{-2}X(Z) + z^{-3}X(Z) + z^{-6}X(Z) \\ Y_2(z) &= X(Z) + z^{-2}X(Z) + z^{-3}X(Z) + z^{-5}X(Z) + z^{-6}X(Z) \end{aligned} \quad (12)$$

Οι παραπάνω σχέσεις εισόδου και εξόδου δίνουν τις επόμενες συναρτήσεις μεταφοράς

$$\begin{aligned} H_1(z) &= 1 + z^{-1} + z^{-2} + z^{-3} + z^{-6} \\ H_2(z) &= 1 + z^{-2} + z^{-3} + z^{-5} + z^{-6} \end{aligned} \quad (13)$$

Στο πεδίο του χρόνου προκύπτουν οι εξής σχέσεις:

$$\begin{aligned} y_1(n) &= x(n) + x(n-1) + x(n-2) + x(n-3) + x(n-6) \\ y_2(n) &= x(n) + x(n-2) + x(n-3) + x(n-5) + x(n-6) \end{aligned} \quad (14)$$

Η συνελκτική κωδικοποίηση δεν εφαρμόζεται σε τμήματα (μπλοκ) δεδομένων αλλά σε συνεχόμενη ροή bit. Οπότε η δυνατότητα διόρθωσης σφαλμάτων εκ μέρους του κώδικα αφορά σφάλματα που λαμβάνουν χώρα κοντά το ένα με το άλλο. Στην περίπτωση μεγαλύτερων αποστάσεων μεταξύ των σφαλμάτων αυτά μπορούν να διορθωθούν σχετικά εύκολα. Για αυτό και στην περίπτωση αυτή πρέπει να γίνει διεμπλοκή των bits, την οποία θα εξετάσουμε στην επόμενη ενότητα.

6.5.2 Διάτρηση

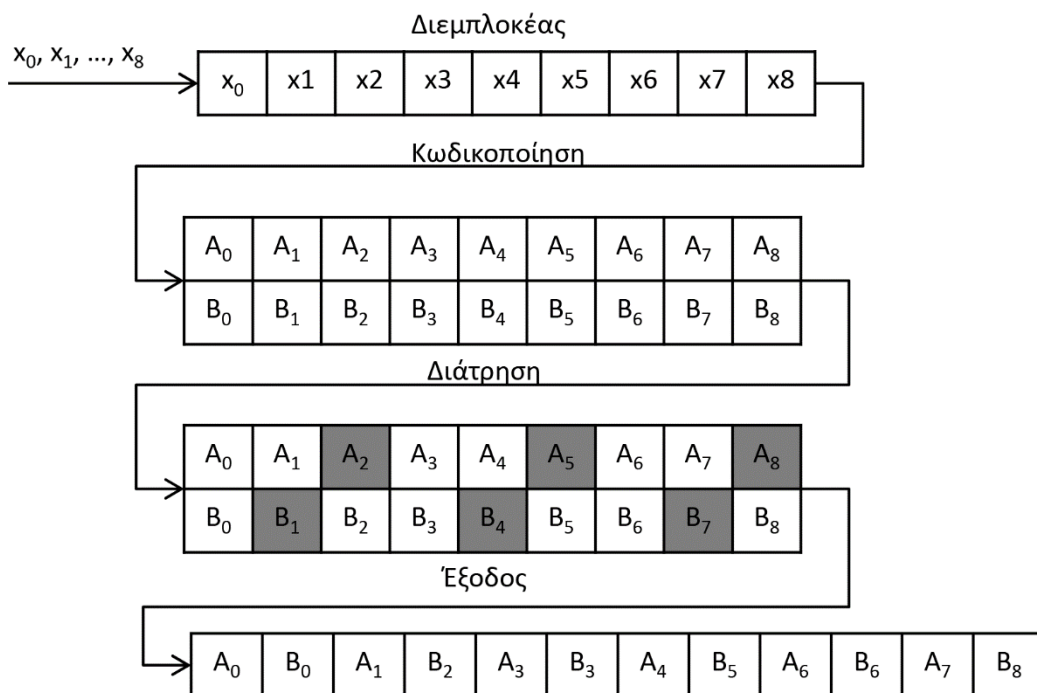
Η διάτρηση είναι μια τεχνική για τη δημιουργία ενός συνελκτικού κώδικα ρυθμού m/n από τον βασικό ρυθμό $1/2$, π.χ. $2/3$, $3/4$, $5/6$, $7/8$. Εφαρμόζεται με βάση συγκεκριμένα πρότυπα, βάσει των οποίων επιλέγονται κάποια από τα bits της εξόδου (που αντιστοιχούν στις θέσεις με 1 του παρακάτω πίνακα, οι τιμές στις θέσεις 0 αγνοούνται).

Ο ρυθμός της διάτρησης εξηγείται με τη βοήθεια του επόμενου πίνακα. Για παράδειγμα, για τον κώδικα $2/3$ ο μετατροπέας εξάγει τα bits $X_1Y_1Y_2$ και παραλείπεται το X_2 .

Ρυθμοί κωδικοποίησης (Code rate)	Πρότυπο Διάτρησης	Μεταδιδόμενη αλληλουχία
1/2	X: 1 Y: 1	X_1Y_1
2/3	X: 1 0 Y: 1 1	$X_1Y_1Y_2$
3/4	X: 1 0 1 Y: 1 1 0	$X_1Y_1Y_2X_3$
5/6	X: 1 0 1 0 1 Y: 1 1 0 1 0	$X_1Y_1Y_2X_3Y_4X_5$
7/8	X: 1 0 0 0 1 0 1 Y: 1 1 1 1 0 1 0	$X_1Y_1Y_2Y_3Y_4X_5Y_6X_7$

Πίνακας 6.14 Επεξήγηση λειτουργίας διάτρησης.

Η χρήση της λειτουργίας της διάτρησης μετά την κωδικοποίηση, με ρυθμό κωδικοποίησης $3/4$ παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα. Τα πακέτα τα οποία είναι σκιασμένα (με γκρι δηλαδή χρώμα) είναι αυτά τα οποία παραλείπονται.



Εικόνα 6.17 Διάτρηση με ρυθμό $3/4$.

Παρατηρούμε ότι το πλήθος των στοιχείων της εξόδου έχει αυξηθεί κατά 4/3 (τέσσερα προς τρία). Στο συγκεκριμένο παράδειγμα το πλήθος των στοιχείων της εισόδου είναι 9 και το αντίστοιχο πλήθος των στοιχείων της εξόδου είναι 12.

6.5.3 Παραδείγματα

Στο επόμενο παράδειγμα θεωρούμε συνελικτική κωδικοποίηση η οποία περιγράφεται με τις εξής παραμέτρους.

$$\begin{aligned}n_1 &= m_1 + m_0 + m_{-1} \\n_1 &= m_0 + m_{-1} \\n_1 &= m_1 + m_{-1}\end{aligned}\tag{15}$$

Ο κώδικας Matlab ο οποίος υλοποιεί το συγκεκριμένο συνελικτικό κωδικοποιητή, δίνεται στον επόμενο πίνακα.

Κώδικας Matlab
<pre>G1 = 7;% ορίζει τους συντελεστές που δίνουν την πρώτη έξοδο n₁ = m₁ + m₀ + m₋₁ G2 = 3;% ορίζει τους συντελεστές που δίνουν τη δεύτερη έξοδο n₂ = m₀ + m₋₁ G3 = 5;% ορίζει τους συντελεστές που δίνουν την τρίτη έξοδο n₃ = m₁ + m₋₁ constLen = 3; % δημιουργία διαγράμματος Trellis convCodeTrellis = poly2trellis(constLen, [G1 G2 G3]); uncodedWord = [1]; % codedWord1 = convenc(uncodedWord, convCodeTrellis) uncodedWord = [1 0 0 0]; codedWord2 = convenc(uncodedWord, convCodeTrellis)</pre>

Πίνακας 6.15 Κώδικας Matlab για χρήση στην εσωτερική κωδικοποίηση.

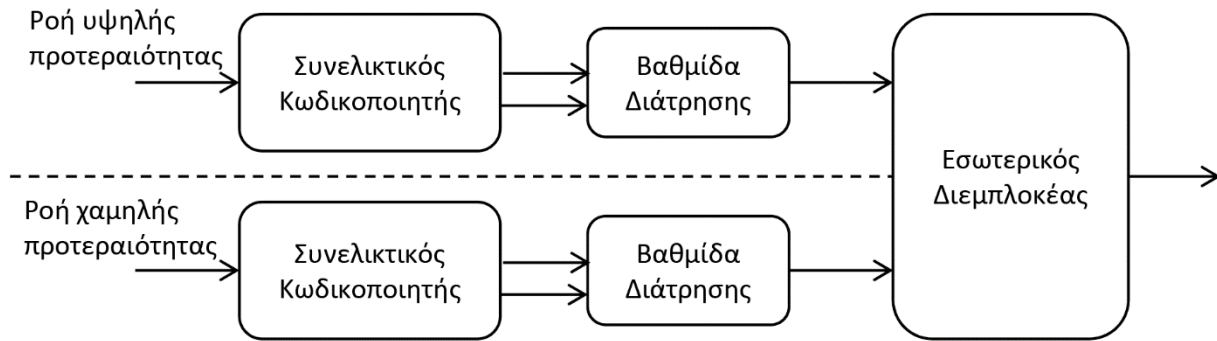
Ο κώδικας δίνει τους συντελεστές που ορίζουν τον κωδικοποιητή, ορίζει το διάγραμμα Trellis (με χρήση της σχετικής συνάρτησης). Αφού ορίσει την αρχική λέξη, υπολογίζει τις δύο εξόδους του κωδικοποιητή.

6.6 Εσωτερική Διεμπλοκή

Η εσωτερική διεμπλοκή λαμβάνει ως είσοδο τη ροή που έχει υποστεί διάτρηση και δημιουργεί μία αντιμετάθεση στη ροή των bits, αλλά και των συμβόλων. Η αντιστοίχιση συμβόλων και bits εξαρτάται από το είδος της διαμόρφωσης (QPSK, 16-QAM, 64-QAM) και θα συζητηθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Ο εσωτερικός διεμπλοκέας είναι το σημείο όπου συνδυάζονται οι ροές που αποτελούν την ιεραρχική μετάδοση (hierarchical mode). Η ιεραρχική μετάδοση προβλέπει την ύπαρξη δύο ροών, αυτή της υψηλής προτεραιότητας (high priority) και της χαμηλής προτεραιότητας (low priority). Η πρώτη προσφέρει καλύτερη προστασία από τον θόρυβο και έχει χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης (λόγω του αυξημένου ποσοστού από πληροφορία προληπτικής διόρθωσης σφαλμάτων). Για τον σκοπό αυτό η ροή υψηλής προτεραιότητας μπορεί να καλύψει μεγαλύτερες γεωγραφικές περιοχές.

Στη βαθμίδα του εσωτερικού διεμπλοκέα είναι που οι δύο αυτές ροές, εάν βέβαια υφίσταται σενάριο ιεραρχικής μετάδοσης, συγκλίνουν σε μια ενιαία ροή συμβόλων, η οποία και διαμορφώνεται στη συνέχεια. Ο συνδυασμός των ροών στην ιεραρχική μετάδοση απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 6.18 Συνδυασμός ροών κατά την ιεραρχική μετάδοση.

Ο εσωτερικός διεμπλοκέας στη συνέχεια κάνει αποπολυπλεξία της ροής σε επιμέρους διακλαδώσεις το πλήθος των οποίων εξαρτάται από το είδος της διαμόρφωσης (π.χ. QPSK, 16-QAM, 64-QAM). Το πλήθος των διακλαδώσεων ταυτίζεται με το πλήθος των bits ανά σύμβολο για κάθε διαμόρφωση. Συγκεκριμένα, είναι 2 για την QPSK, 4 για τη 16-QAM και 6 για τη 64 QAM.

Οι επιμέρους αυτές ροές υφίστανται σε πρώτη φάση αντιμετάθεση σε επίπεδο bits και σε δεύτερη φάση αντιμετάθεση σε επίπεδο συμβόλων, αφού βέβαια γίνει η αντιστοίχιση των ομάδων bits σε σύμβολα (λειτουργία την οποία θα εξετάσουμε διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο). Συγκεκριμένα, ο εσωτερικός διεμπλοκέας αποτελείται από δύο διακριτές βαθμίδες: τον διεμπλοκέα ψηφίων (bitinterleaver) και τον διεμπλοκέα συμβόλων (symbolinterleaver).

6.6.1 Αντιστοίχιση bits σε επιμέρους ροές

Σύμφωνα με το πρότυπο η αντιστοίχιση (αποπολυπλεξία) γίνεται με την εξής σχέση, στις περιπτώσεις της ιεραρχικής και της μη ιεραρχικής μετάδοσης αντίστοιχα:

Για τη μη ιεραρχική μετάδοση

$$x_{di} = b[di(mod)v](div)(v/2)+2[di(mod)(v/2)], di(div)v \quad (16)$$

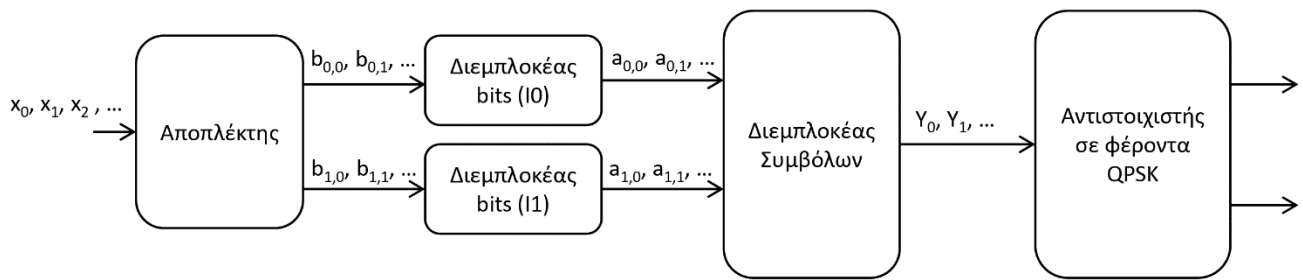
Για την ιεραρχική μετάδοση:

$$\begin{aligned} x'_{di} &= bdi(mod)2, di(div)2 \\ x''_{di} &= b[di(mod)(v-2)](div)((v-2)/2)+2[di(mod)((v-2)/2)]+2, di(div)(v-2) \end{aligned} \quad (17)$$

όπου

- x_{di} η είσοδος στον αποπλέκτη στην περίπτωση της μη ιεραρχικής μετάδοσης
- x'_{di} η ροή υψηλής προτεραιότητας (στην ιεραρχική μετάδοση)
- x''_{di} η ροή χαμηλής προτεραιότητας
- di είναι ο αριθμός bit της εισόδου
- mod ο απλός αθροιστής
- div ο διαιρέτης

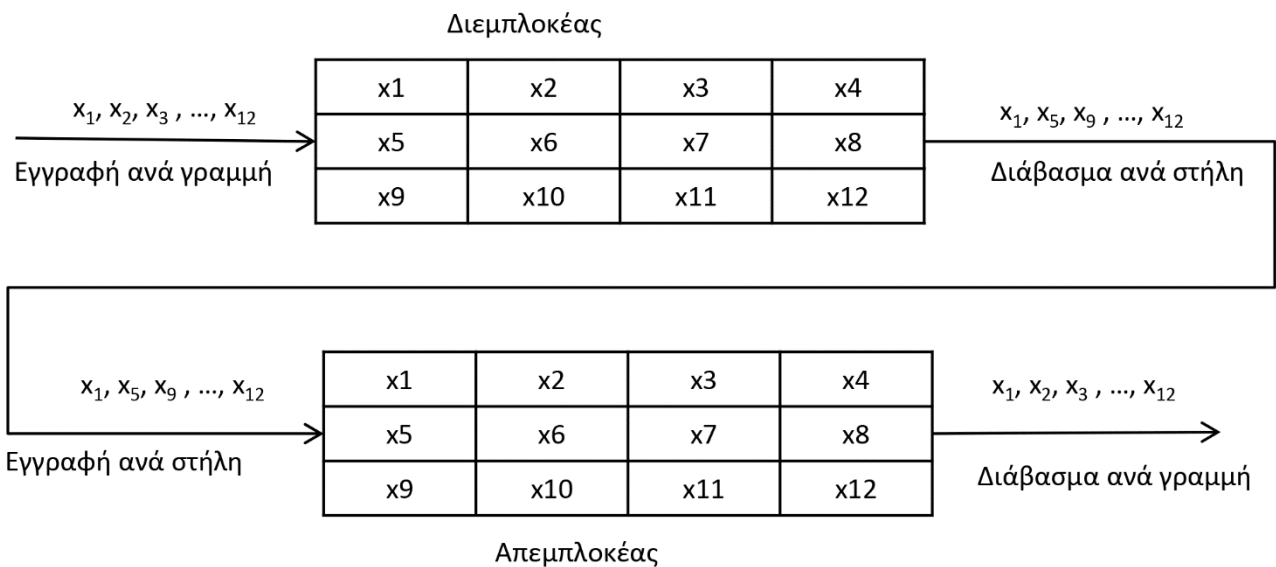
Η αντιστοίχιση της ροής σε σύμβολα απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα για την περίπτωση της διαμόρφωσης QPSK (Quadrature Phase Shift Keying).



Εικόνα 6.19 Αντιστοίχιση ροής σε σύμβολα.

Παρατηρούμε ότι με βάση τον παραπάνω μηχανισμό έχουμε την εξής αντιστοίχιση: το x_0 στο $b_{0,0}$ και το x_1 στο $b_{1,0}$. Εκτενέστερη ανάλυση για τους μηχανισμούς αυτούς θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο όπου θα συζητηθούν τα θέματα της διαμόρφωσης.

Ο διεμπλοκέας bit απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα, σε μια απλοποιημένη μορφή. Ο μηχανισμός είναι ο εξής: Η είσοδος εγγράφεται στον διεμπλοκέα, ο οποίος υλοποιείται ως ένας καταχωρητής, κατά γραμμή και διαβάζεται κατά στήλη.



Εικόνα 6.20 Διεμπλοκέας και απεμπλοκέας bits με χρήση πίνακα.

Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει η έξοδος του διεμπλοκέα. Η έξοδος αυτή δίνεται ως είσοδος στον απεμπλοκέα, ο οποίος επίσης παρίσταται στο σχήμα και λειτουργεί με την αντίστροφη λογική. Συγκεκριμένα στον απεμπλοκέα η είσοδος γράφεται ανά στήλη και διαβάζεται ανά γραμμή. Έτσι η έξοδος του διεμπλοκέα επανέρχεται στην αρχική της μορφή.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

39. ETSI - European Telecommunications Standards Institute. *Digital broadcasting systems for television, sound and data services; Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television*. European Telecommunication Standard ETS 300 744, 1997.
40. C.K.P. Clark. *Reed Solomon Error Correction*. Research and Development BBC, White Paper, WHP 031. Research and Development BBC, 2002.
41. Matlab Documentation Mathworks. *Παραδείγματα χρήσης του αλγορίθμου Reed Solomon με χρήση κώδικα και μοντέλων του Simulink* <http://www.mathworks.com/help/comm/ref/rsenc.html>. Mathworks, 2015.
42. G. D. Forney. *Burst-Correcting Codes for the Classic Bursty Channel*. IEEE Transactions on Communications, vol. 19, 1971.
43. J. L. Ramsey. *Realization of Optimum Interleavers*. IEEE Transactions on Information Theory, IT-16 (3), 338-345, 1970
44. Matlab Documentation Mathworks. *Παραδείγματα χρήσης του διεμπλοκέα με χρήση κώδικα και μοντέλων του Simulink* <http://www.mathworks.com/help/comm/ug/interleaving.html>. Mathworks, 2015.
45. European Telecommunications Standards Institute (ETSI). *Rec. 301 210, Digital Video Broadcasting (DVB), Framing structure, channel coding and modulation*. European Telecommunications Standards Institute, 1999.
46. European Telecommunications Standards Institute (ETSI). *EN 300 744, Digital Video Broadcasting (DVB), Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television*. European Telecommunications Standards Institute, 2009.

Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1

Ποιο είναι το μέγιστο πλήθος συμβόλων σε μια κωδική λέξη στον κώδικα Reed Solomon;

Απάντηση/Λύση

Το μέγιστο μήκος μιας κωδικής λέξης (πλήθος συμβόλων) για κώδικα με σύμβολα 8-bit ($s=8$) είναι 255 σύμβολα. Στο DVB χρησιμοποιείται ο RS (204, 188).

Κριτήριο αξιολόγησης 2

Επεξηγήστε κατά πόσο ο αλγόριθμος RS είναι συστηματικός και ποιον πλεονασμό δημιουργεί. Από τι εξαρτάται η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς για κωδικοποίηση / αποκωδικοποίηση; Πόσα λάθη μπορούν να διορθωθούν με τον κώδικα RS (1024, 788);

Απάντηση/Λύση

Ο κώδικας RS είναι συστηματικός, αφού η πληροφορία διόρθωσης σφαλμάτων απλώς προστίθεται πριν ή μετά την πληροφορία. Ο κώδικας είναι συστηματικός καθώς τα δεδομένα παραμένουν αμετάβλητα και απλώς προστίθενται τα σύμβολα ισοτιμίας. Τα σύμβολα ισοτιμίας μπορεί να προστεθούν χωρίς καμία βλάβη του κώδικα και στην αρχή των δεδομένων.

Ο κώδικας RS των 16 Bytes που προστίθενται στα 188 Bytes δημιουργεί έναν πλεονασμό $(204-188)/188=8.5\%$ κατά τον οποίο αυξάνεται ο όγκος του πακέτου.

Η υπολογιστική ισχύς σχετίζεται με τον αριθμό των συμβόλων ισοτιμίας ανά κωδική λέξη. Μεγάλος αριθμός λαθών που μπορούν να διορθωθούν χρειάζεται και μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Μπορούν να διορθωθούν $(1024-788)/2$ σφάλματα.

Κριτήριο αξιολόγησης 3

Ένα σύστημα ψηφιακής επικοινωνίας είναι σχεδιασμένο για να λειτουργεί με BER της τάξης του 10^{-9} , (ένα bit λάθους κάθε 109 bits). Πώς μπορούμε να το εξασφαλίσουμε εάν ο τρέχων διάυλος έχει υποδεέστερο ρυθμό εμφάνισης σφαλμάτων;

Απάντηση/Λύση

Η μείωση του ρυθμού σφαλμάτων μπορεί να επιτευχθεί:

- Με αύξηση της ισχύος εκπομπής
- Με την προσθήκη κωδικοποίησης όπως η Reed Solomon (ή άλλου τύπου διόρθωσης). Η κωδικοποίηση επιτρέπει στο σύστημα να επιτύχει το BER στόχο με χαμηλότερη ισχύ εκπομπής.

Κεφάλαιο 7 – Μετάδοση

Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζουμε τα θέματα που αφορούν τη μετάδοση του τηλεοπτικού σήματος τόσο σε αναλογική όσο και στην ψηφιακή μορφή. Και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιείται το φάσμα των VHF/UHF με τις ίδιες χωρητικές καναλιών, αλλά επιτυγχάνοντας οικονομία του φάσματος στην περίπτωση του ψηφιακού σήματος.

Ξεκινώντας με τη μετάδοση του αναλογικού σήματος, περιγράφεται η διαμόρφωση του σήματος φωτεινότητας και στη συνέχεια των σημάτων του χρώματος (των χρωμοδιαφορών) και του ήχου. Επίσης, εξετάζουμε τη χρήση του φάσματος και τον διαμοιρασμό αυτού για τα περιεχόμενα σήματα.

Στο δεύτερο μισό του κεφαλαίου εξετάζουμε την ψηφιακή μετάδοση και τις σχετικές τεχνικές διαμόρφωσης. Περιγράφονται οι αντιστοιχίσεις των bits στα διαμορφωμένα σύμβολα, ανάλογα και με τα σενάρια διαμόρφωσης που επιλέγονται καθώς και η χρήση των μηχανισμών του OFDM για αυτή καθεαυτή τη μετάδοση. Όπως και στην περίπτωση της αναλογικής μετάδοσης, εξετάζεται η χρήση του φάσματος των τηλεοπτικών καναλιών.

Προαπαιτούμενη γνώση

Η κατανόηση του συγκεκριμένου κεφαλαίου προϋποθέτει κάποιες βασικές γνώσεις για τα θέματα της μετάδοσης τόσο της αναλογικής όσο και της ψηφιακής. Επίσης, είναι σημαντική η κατανόηση της μορφής και της δομής των τηλεοπτικών σημάτων τόσο στην αναλογική όσο και την ψηφιακή μορφή. Ενδείκνυται ακόμη γνώση της γενικής εικόνας του συστήματος και των επιμέρους βαθμίδων που το αποτελούν τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη, ώστε να γίνει αντιληπτή η σημασία της λειτουργικότητας που περιγράφουμε σε αυτό το κεφάλαιο.

7.1 Εισαγωγή

Το τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας του τηλεοπτικού σήματος στον πομπό και το πρώτο στον δέκτη αφορά τη μετάδοση. Η μετάδοση εξαρτάται από το είδος του διαύλου που χρησιμοποιείται, αν είναι, δηλαδή, επίγειος, δορυφορικός ή καλωδιακός. Όπως είναι ευνόητο, στα συστήματα αυτά υπάρχουν διαφοροποιήσεις λόγω των ετερόκλητων συνθηκών που καλούνται να αντιμετωπίσουν τα σήματα, με βασικές την απόσταση που καλείται να διανύσει το σήμα αλλά και το περιβάλλον της διάδοσης.

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε τα θέματα της διαμόρφωσης και της μετάδοσης για την επίγεια τηλεόραση. Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου θα εξεταστούν τα θέματα που αφορούν την αναλογική μετάδοση, ξεκινώντας από την ασπρόμαυρη τηλεόραση, όπου το σήμα αποτελείται από τη φωτεινότητα και τον ήχο. Κατόπιν θα εξετάσουμε το έγχρωμο σήμα το οποίο προκύπτει από την προσθήκη του χρώματος (των χρωμοδιαφορών). Το σύνολο των σημάτων αυτών αποτελεί το σύνθετο σήμα.

Εξετάζονται, επίσης, ειδικά θέματα όπως η λήψη του φέροντος του χρώματος με το σήμα burst αλλά και ο *φονέας χρώματος*.

Στο δεύτερο τμήμα του κεφαλαίου εξετάζονται τα θέματα της ψηφιακής διαμόρφωσης, τα οποία ξεκινούν με την αντιστοίχιση των bits σε σύμβολα ανάλογα με το είδος της διαμόρφωσης. Το σύστημα διαμόρφωσης συνδυάζει την ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας, με τις ψηφιακές διαμορφώσεις. Η ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας χρησιμοποιεί έναν μεγάλο αριθμό φερουσών, στις οποίες διαχωρίζεται η πληροφορία και κάθε φέρουσα διαμορφώνεται χωριστά.

Τόσο στην αναλογική όσο και την ψηφιακή μετάδοση χρησιμοποιείται η μπάνα των VHF (Very High Frequency) και UHF (Ultra High Frequency) οι οποίες εκτείνονται από τα 45 έως τα 862 MHz. Τα VHF κανάλια έχουν εύρος ζώνης στα 7 MHz, ενώ τα UHF έχουν εύρος ζώνης στα 8 MHz.

7.2 Αναλογική Μετάδοση

Στην αναλογική τηλεόραση το σήμα αποτελείται κατά βάση από τρία διακριτά σήματα (εκ των οποίων το ένα έχει δύο συνιστώσες):

- Σήμα φωτεινότητας (Y) το οποίο είχε χρησιμοποιηθεί στην ασπρόμαυρη τηλεόραση και συνεχίστηκε να χρησιμοποιείται και στην έγχρωμη αναλογική, αρχικά για λόγους συμβατότητας, αλλά και για να μπορεί να υφίσταται διαφορετική διαχείριση (π.χ. αναφορικά με τη δειγματοληψία) λόγω της μεγαλύτερης σπουδαιότητάς του σε σχέση με αυτό του χρώματος για την ποιότητα της εικόνας.
- Το σήμα του χρώματος, το οποίο αποτελείται από δύο συνιστώσες και συγκεκριμένα τις χρωμοδιαφορές. Ανάλογα με το σύστημα χρώματος που χρησιμοποιείται, τα σήματα που αφορούν το χρώμα προκύπτουν με άλλο τρόπο. Στην περίπτωση του NTSC έχουμε τα I και Q, στο PAL χρησιμοποιούνται τα U και V, ενώ στην περίπτωση του SECAM χρησιμοποιούνται τα D_R και D_B . Σε όλες τις περιπτώσεις οι συνιστώσες αυτές προκύπτουν απευθείας από τις χρωμοδιαφορές με κλιμάκωση.
- Το σήμα του ήχου, το οποίο διαμορφώνεται και μεταδίδεται ξεχωριστά, εντός του συγκεκριμένου καναλιού.

Τα σήματα αυτά αθροίζονται και διαμορφώνονται και το συνολικά διαμορφωμένο σήμα εντάσσεται στο εύρος ζώνης του εκάστου καναλιού. Το εύρος ζώνης στην περίπτωση που το κανάλι ανήκει στη ζώνη των VHF είναι 7 MHz ενώ στην περίπτωση που ανήκει στα UHF έχει εύρος ζώνης 8 MHz. Όσον αφορά τη μετάδοση του σήματος χρώματος, η Ελλάδα είχε υιοθετήσει αρχικά το SECAM, ωστόσο στις αρχές της δεκαετίας του 1990 έγινε μετάβαση στα συστήματα PAL B/G. Αντίστοιχη μετάβαση έγινε για σημαντικό πλήθος χωρών που είχαν αρχικά υιοθετήσει το SECAM. Το PAL B αντιστοιχεί στο κανάλι VHF (δηλαδή με εύρος ζώνης 7 MHz) και το PAL G σε κανάλι UHF (δηλαδή με εύρος ζώνης 8 MHz) (47, 48).

7.2.1 Ασπρόμαυρη Τηλεόραση

7.2.1.1 Διαμόρφωση Σήματος Φωτεινότητας

Το σήμα της φωτεινότητας (Y) έχει εύρος ζώνης περί τα 5 MHz (υπολογίζεται σε λίγο μεγαλύτερη τιμή, ωστόσο επειδή στα άκρα της οθόνης η λεπτομέρεια είναι μικρότερη, θεωρούμε ότι το φάσμα του σήματος προσεγγίζει αυτήν την τιμή). Το σήμα της φωτεινότητας διαμορφώνεται κατά πλάτος (Amplitude Modulation) ώστε να μεταδοθεί.

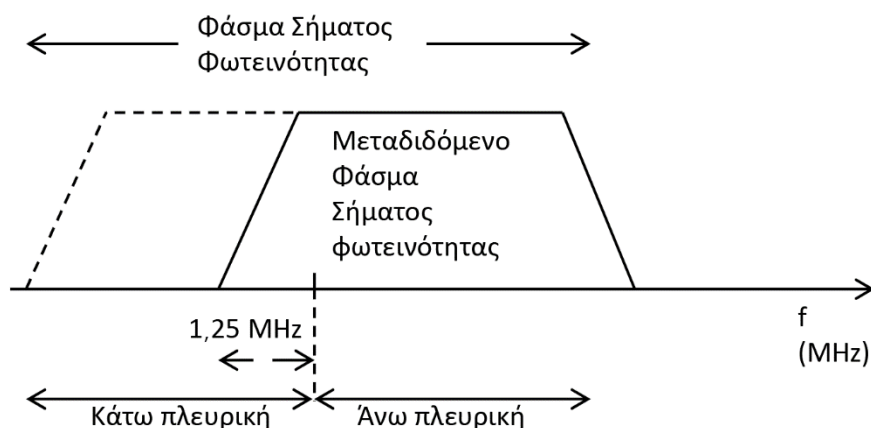
Επειδή το κανάλι έχει εύρος ζώνης 7 (VHF) ή 8 (UHF) MHz δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί διαμόρφωση του τύπου διπλευρικής ζώνης (Double Side Band, DSB) αφού δεν είναι δυνατόν να μεταδοθούν ταυτόχρονα και οι δύο πλευρικές μέσω του συγκεκριμένου καναλιού (σε μια τέτοια περίπτωση θα χρειαζόταν φάσμα κατ' ελάχιστον 10 MHz μόνο για τη φωτεινότητα). Επί της ουσίας, όμως, δεν απαιτείται η μετάδοση και των δύο πλευρικών, αφού φέρουν την ίδια πληροφορία.

Εναλλακτικά της διπλευρικής AM διαμόρφωσης θα μπορούσε να εφαρμοστεί η *μονόπλευρη διαμόρφωση* (Single Side Band, SSB) στην οποία μεταδίδεται μόνο η μία πλευρική. Εξοικονομείται με αυτόν τον τρόπο σημαντικό εύρος ζώνης και το κανάλι που διαθέτουμε επαρκεί για τη μετάδοση του σήματος. Το μειονέκτημα σε αυτήν την περίπτωση είναι ότι απαιτούνται ιδιαίτερα περίπλοκα φίλτρα, ώστε να είναι δυνατή η αποκοπή της μίας πλευρικής χωρίς να επηρεαστεί η άλλη. Δεδομένου μάλιστα ότι το σήμα της φωτεινότητας έχει φάσμα το οποίο ξεκινά από πολύ χαμηλές (πρακτικά μηδενικές) συχνότητες (η μηδενική συχνότητα αντιστοιχεί στη μέση φωτεινότητα του σήματος).

Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω παρατηρήσεων δημιούργησε την ανάγκη να χρησιμοποιηθεί μια συμβιβαστική λύση. Αυτό προκύπτει από τη χρήση της διαμόρφωσης *υπολειπόμενης πλευρικής ζώνης* (Vestigial Side Band Modulation, VSB) η οποία συμβιβάζει τις απαιτήσεις μεταξύ των SSB και DSB.

Συγκεκριμένα, η VSB προβλέπει τη μετάδοση ολόκληρης της μίας εκ των πλευρικών και ενός τμήματος από την άλλη πλευρική. Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται οι απαιτήσεις για το ζωνοπερατό φίλτρο (αφού αυτό δεν απαιτείται να είναι πολύ απότομο στον διαχωρισμό των πλευρικών ζωνών του καναλιού), καθώς και οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης από το κανάλι (μπορεί δηλαδή να τοποθετηθεί τόσο σε ένα κανάλι VHF ή σε UHF). Επίσης, επιτρέπεται η διέλευση σημάτων με μηδενική συχνότητα (που έχουν δηλαδή DC συνιστώσα).

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται το συνολικό φάσμα του σήματος της φωτεινότητας και ο τρόπος που αυτό χωρίζεται στο τμήμα που μεταδίδεται και σε αυτό το οποίο δεν λαμβάνεται υπόψη.



Εικόνα 7.1 Συνολικό και μεταδιδόμενο φάσμα σήματος φωτεινότητας.

Συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι μεταδίδεται ολόκληρη η άνω πλευρική και από την κάτω πλευρική μεταδίδεται ένα ποσοστό το οποίο αντιστοιχεί σε 0,75 MHz του εύρους της. Υπάρχει βέβαια και μία απώλεια στο φάσμα λόγω του γεγονότος ότι αναπόφευκτα τα χρησιμοποιούμενα φίλτρα έχουν κάποια κλίση, διαφέρουν, δηλαδή, από το ιδανικό του οποίου η καμπύλη αποκοπής είναι κατακόρυφη. Η απώλεια αυτή, η απόκλιση, δηλαδή, από την ιδανική περίπτωση, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη σχεδίαση του εξοπλισμού.

7.2.1.2 Διαμόρφωση Σήματος Ήχου

Το σήμα του ήχου στην περίπτωση της αναλογικής τηλεόρασης μεταδίδεται με *διαμόρφωση κατά συχνότητα* (Frequency Modulation, FM). Η διαμόρφωση FM είναι πιο αποδοτική στη μετάδοση του ήχου αναφορικά με την αντιμετώπιση του θορύβου.

Η φέρουσα του ήχου τοποθετείται σε συγκεκριμένη απόσταση από τη φέρουσα της φωτεινότητας. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση των προτύπων PAL B/G η απόσταση αυτή είναι τα 5,5 MHz. Έτσι, εάν η φέρουσα της φωτεινότητας απέχει 1,25 MHz (εκ των οποίων τα 0,75 MHz αντιστοιχούν στην κάτω πλευρική) από την αρχή του εύρους ζώνης του καναλιού, η φέρουσα του ήχου θα βρίσκεται σε απόσταση 6,75 MHz από την αρχή του καναλιού. Συγκεκριμένα:

$$\begin{aligned} f_{\Phi\Phi} &= f_{\kappa\alpha\nu} + 1,25 \text{ MHz} \\ f_{\Phi\text{H}} &= f_{\Phi\Phi} + 5,5 \text{ MHz} \end{aligned} \quad (1)$$

Όπου $f_{\kappa\alpha\nu}$ η συχνότητα στην οποία ξεκινάει το φάσμα του καναλιού, $f_{\Phi\Phi}$ η φέρουσα του σήματος φωτεινότητας, και $f_{\Phi\text{H}}$ η φέρουσα του σήματος του ήχου.

Η απόσταση μεταξύ των δύο φερουσών μπορεί να διαφοροποιείται σε άλλα πρότυπα (τα οποία είναι επίσης PAL), π.χ. στο PAL D/K είναι 6 MHz. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά που αφορούν τις διάφορες εκδόσεις του συστήματος PAL (48).

	PAL B	PAL G, H	PAL I	PAL D, K	PAL M	PAL N
Μπάντα μετάδοσης	VHF	UHF	VHF/UHF	VHF/UHF	VHF/UHF	VHF/UHF
Πεδία (ffields) ανά δευτερόλεπτο	50	50	50	50	60	60
Γραμμές	625	625	625	625	525	525
Ενεργές γραμμές	576	576	576	576	480	480
Εύρος ζώνης καναλιού	7 MHz	8MHz	8MHz	8MHz	6MHz	6MHz
Εύρος ζώνης σήματος βίντεο	5,0 MHz	5,0 MHz	5,5MHz	6,0 MHz	4,2MHz	4,2MHz
Συχνότητα φέροντος χρώματος	4,43MHz	4,43 MHz	4,43 MHz	4,43 MHz	3,58 MHz	3,58 MHz
Απόσταση μεταξύ των συχνοτήτων των φερουσών (φωτεινότητας και ήχου)	5,5 MHz	5,5 MHz	6,0 MHz	6,5 MHz	4,5 MHz	4,5 MHz

Πίνακας 7.1 Χαρακτηριστικά των υποκατηγοριών του PAL.

Τα πρότυπα PAL B/G/D/K/I έχουν κοινά χαρακτηριστικά όσον αφορά το πλήθος των γραμμών του σήματος και χρησιμοποιούνται κυρίως στην Ευρώπη και στην Κίνα. Τα πρότυπα PAL M και N χρησιμοποιούνται στη Λατινική Αμερική και παρουσιάζουν σαφείς ομοιότητες με το σύστημα NTSC, το οποίο καθορίζει τη χρήση της αναλογικής τηλεόρασης στις Ηνωμένες Πολιτείες. Η ομοιότητα αυτή έγκειται στο πλήθος των γραμμών, στη συχνότητα της φέρουσας του χρώματος, το εύρος ζώνης του καναλιού, αλλά και το εύρος ζώνης του σήματος βίντεο.

Μια ενδεικτική γεωγραφική κατανομή παρουσιάζεται στη συνέχεια. Τα πρότυπα B/G χρησιμοποιούνται στη Δυτική Ευρώπη, την Αυστραλία και τη Νέα Ζηλανδία. Το πρότυπο I στο Ηνωμένο Βασίλειο, την Ιρλανδία, το Χονγκ Κονγκ και τη Νότια Αφρική. Τα πρότυπα D/K στην Κεντρική και

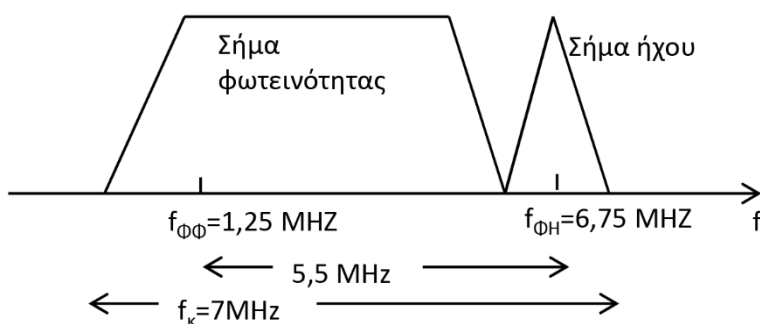
Ανατολική Ευρώπη. Το πρότυπο D στην ενδοχώρα της Κίνας. Επίσης χρησιμοποιείται από τα αναλογικά συστήματα CCTV. Το PAL M χρησιμοποιείται στη Βραζιλία.

Επισημαίνεται ότι στις περισσότερες από τις παρακάτω γεωγραφικές περιοχές έχει γίνει ήδη (ή πραγματοποιείται) η μετάβαση στην ψηφιακή τηλεόραση, οπότε η χρήση της αναλογικής έχει εκλείψει ή περιοριστεί σημαντικά.

7.2.1.3 Φάσμα Σήματος Ασπρόμαυρης Τηλεόρασης

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται το φάσμα του ασπρόμαυρου τηλεοπτικού σήματος (δηλαδή του σήματος που αποτελείται από το σήμα φωτεινότητας και το σήμα του ήχου) σε ένα κανάλι VHF, εύρους ζώνης 7 MHz. Στην περίπτωση καναλιού UHF (8 MHz) η μορφή του φάσματος είναι αντίστοιχη. Αυτό συμβαίνει αφού τόσο η απόσταση των συχνοτήτων των φερουσών φωτεινότητας και ήχου όσο και το εύρος ζώνης του σήματος φωτεινότητας παραμένουν ως έχουν (50).

Στο VHF χρησιμοποιείται (για την περίπτωση της Ελλάδας) το PAL B ενώ για την περίπτωση του UHF χρησιμοποιείται το PAL G.



Εικόνα 7.2 Φάσμα ασπρόμαυρου τηλεοπτικού σήματος.

Παρατηρούμε ότι το εύρος ζώνης του καναλιού είναι 7 ή 8 MHz (VHF, UHF αντίστοιχα) και σε αυτό πρέπει να συμπεριληφθεί το σύνολο των σημάτων. Συγκεκριμένα:

- Το σήμα της φωτεινότητας καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό του εύρους ζώνης (από την αρχή του καναλιού μέχρι και τα 6,5 MHz).
- Το σήμα του ήχου μετά τη διαμόρφωση καταλαμβάνει από τα 6,5 MHz έως και τα 7 MHz, δηλαδή περί τα 0,5 MHz.
- Οι συχνότητες των φερουσών φωτεινότητας και ήχου απέχουν 1,25 MHz και 6,75 MHz αντίστοιχα από την αρχή του καναλιού. Η απόσταση μεταξύ τους είναι 5,5 MHz.
- Λόγω της διαμόρφωσης υπολειπόμενης πλευρικής (Vestigial Side Band, VSB) το φέρον της φωτεινότητας περιλαμβάνει ένα ποσοστό της κάτω πλευρικής, περί τα 0.75 MHz.

Στον επόμενο πίνακα δίνονται οι συχνότητες για τις φέρουσες του σήματος φωτεινότητας και του σήματος ήχου για κάποια ενδεικτικά κανάλια στα UHF. Συγκεκριμένα, για τα κανάλια 21 έως και 24 για το σύστημα PAL G (625 γραμμές, κανάλι στα 8 MHz).

Αριθμός καναλιού	Συχνότητα φέροντος φωτεινότητας (MHz)	Συχνότητα φέροντος ήχου (MHz)
21	471,25	476,75
22	479,25	484,75
23	487,25	492,75
24	495,25	500,75

Πίνακας 7.2 Συχνότητες για τα φέροντα για τα κανάλια από 21 έως και 24.

Τα κανάλια τα οποία χρησιμοποιούνται ανήκουν στις επόμενες περιοχές:

- I (VHF) κανάλια 2 έως και 4, περιοχή συχνοτήτων 47 έως 68 MHz.
- III (VHF) κανάλια 2 έως και 4, περιοχή συχνοτήτων 174 έως 230 MHz.
- IV (UHF) κανάλια 21 έως και 37, περιοχή συχνοτήτων 470 έως 606 MHz.
- V (UHF) κανάλια 38 έως και 69, περιοχή συχνοτήτων 606 έως 862 MHz.

Οι υπόλοιπες συχνότητες, που αφορούν τα ενδιάμεσα διαστήματα, έχουν ανατεθεί σε άλλες χρήσεις.

7.2.2 Διαμόρφωση Έγχρωμου Τηλεοπτικού Σήματος

7.2.2.1 Σήμα Χρωμικότητας

Με την έλευση τη δεκαετία του 1950 της έγχρωμης τηλεόρασης, δημιουργήθηκε η ανάγκη της μετάδοσης της πληροφορίας του χρώματος. Όπως έχουμε δει σε προηγούμενο κεφάλαιο, η πληροφορία του χρώματος αποτελείται από δύο ανεξάρτητα σήματα, τις χρωμοδιαφορές, οι οποίες συμβολίζονται με Cb και Cr. Ανάλογα με το σύστημα κωδικοποίησης χρωμάτων που χρησιμοποιείται, οι χρωμοδιαφορές υφίστανται κάποιες διαφοροποιήσεις στις τιμές και προκύπτουν ισοδύναμα μεγέθη (51).

Στην περίπτωση του NTSC (είναι το αμερικανικό σύστημα και μάλιστα το πρώτο το οποίο χρησιμοποιήθηκε), τα σήματα χρώματος ονομάζονται I και Q και υπολογίζονται με βάση τις επόμενες σχέσεις.

$$\begin{aligned} I &= -0.27 (B-Y) + 0.74 (R-Y) \\ Q &= 0.41 (B - Y) + 0.48 (R-Y) \end{aligned} \quad (2)$$

Στην περίπτωση του PAL (το οποίο ξεκίνησε από τη Γερμανία και κατέληξε να είναι το βασικό ευρωπαϊκό σύστημα) τα σήματα χρώματος ονομάζονται U και V και υπολογίζονται με βάση τις επόμενες σχέσεις.

$$\begin{aligned} U &= 0.49 (B-Y) \\ V &= 0.88 (R-Y) \end{aligned} \quad (3)$$

Στην περίπτωση του SECAM (το οποίο είναι το γαλλικό σύστημα) τα σήματα χρώματος ονομάζονται D_R και D_B και υπολογίζονται με βάση τις επόμενες σχέσεις.

$$\begin{aligned} D_R &= -1.9 (R-Y) \\ D_B &= 1.5 (B-Y) \end{aligned} \quad (4)$$

Υπενθυμίζεται ότι παρόλο που η χρωματική πληροφορία εξαρτάται από τρεις ανεξάρτητες μεταβλητές, συγκεκριμένα τα βασικά χρώματα R, G και B, έχει επιλεγεί να αποστέλλεται η φωτεινότητα και οι δύο χρωμοδιαφορές που προαναφέραμε (επειδή οι τιμές αυτών των χρωμοδιαφορών είναι συστηματικά μεγαλύτερες εκ των τριών χρωμοδιαφορών). Λόγω της ανεξαρτησίας των μεγεθών αυτών, η πληροφορία είναι ισοδύναμη (σε κάθε περίπτωση, δηλαδή, έχουμε σύστημα τριών ανεξάρτητων μεταβλητών).

7.2.2.2 Διαμόρφωση Σήματος Χρώματος

Τα σήματα του χρώματος έχουν λιγότερη πληροφορία (άρα και εύρος ζώνης) σε σχέση με το σήμα της φωτεινότητας. Για τη μετάδοση χρησιμοποιείται η διαμόρφωση πλάτους (Amplitude Modulation, AM) και

αποστέλλονται και οι δύο μάντες του σήματος, με καταπιεσμένο το φέρον. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ο μηχανισμός Double Side Band Suppressed Carrier (DSB-SC).

Για να πραγματοποιηθεί η AM DSB-SC διαμόρφωση απαιτείται ο πολλαπλασιασμός του φέροντος με το σήμα πληροφορίας. Ας εξετάσουμε ένα παράδειγμα, ώστε να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός της διαμόρφωσης.

Έστω $c(t)$ το σήμα της πληροφορίας του χρώματος και ότι το φέρον είναι ένα ημιτονικό σήμα στη συχνότητα $f_{\phi X}$ (συχνότητα φέροντος χρώματος). Η διαμόρφωση AM DSB SC δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$c(t) \cos(2\pi f_{\phi X} t + \varphi) \quad (5)$$

Εδώ τίθεται το εξής ζήτημα: Το σήμα της χρωμικότητας, στην πραγματικότητα αποτελείται από δύο σήματα (που προέρχονται από τις χρωμοδιαφορές C_b και C_r), τα οποία είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, οπότε απαιτείται ένας μηχανισμός για την ταυτόχρονη διαμόρφωση των δύο αυτών σημάτων με ένα φέρον. Αυτό θα επιτρέψει την πιο αποτελεσματική εκμετάλλευση του εύρους ζώνης.

Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η *ορθογωνική διαμόρφωση πλάτους* QAM (Quadrature Amplitude Modulation). Όπως θα δούμε στη συνέχεια, η QAM επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση των δύο σημάτων με χρήση του ίδιου φέροντος και με βελτίωση (στην πραγματικότητα με διπλασιασμό) της απόδοσης του DSB, ως προς το χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης και με την ίδια κατανάλωση ισχύος.

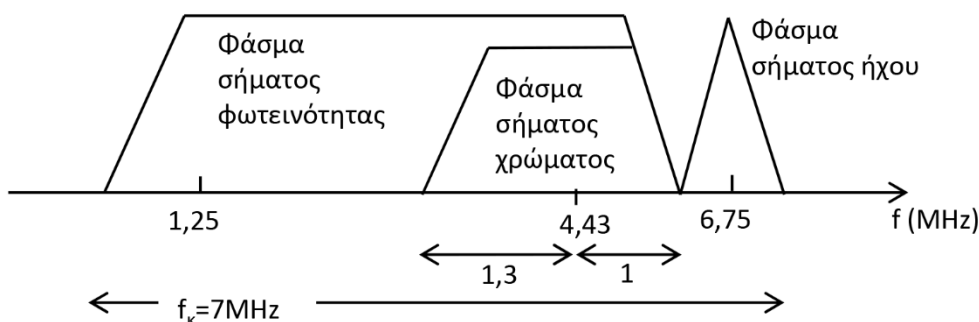
Με την QAM μπορούμε να διαμορφώσουμε ένα φέρον με βάση δύο διαφορετικές τάσεις. Τα βασικά χαρακτηριστικά της διαμόρφωσης QAM, για την περίπτωση της έγχρωμης τηλεόρασης, είναι:

- Τα σήματα χρωματικής πληροφορίας προκύπτουν με βάση το χρησιμοποιούμενο σύστημα, π.χ. για την περίπτωση του PAL είναι τα U και V και το σήμα που προκύπτει ονομάζεται χρωματοφόρο.
- Χρησιμοποιούνται δύο υποφέροντα με ίδια συχνότητα αλλά με διαφορά φάσης $\pi/2$.

Η συχνότητα της φέρουσας του χρώματος (χρωμοφέρουσα, $f_{\phi X}$) προκύπτει από τις επόμενες σχέσεις, για κάθε ένα από τα χρησιμοποιούμενα συστήματα:

- NTSC: $f_{\phi X} = (2n+1)525 \cdot 30/2 = 3.583.125 \pm 10\text{Hz}$, $n = 227$
- PAL: $f_{\phi X} = (n-1/4) 625 \cdot 25 + 50/2 = 4.433.618,75 \pm 1\text{Hz}$, $n = 284$
- SECAM, χρησιμοποιούνται δύο χρωμοφέρουσες:
 - ο $f_{\phi X1} = 4.406.250 \pm 2000\text{Hz}$
 - ο $f_{\phi X2} = 4.250.000 \pm 2000\text{Hz}$

Το φάσμα του τηλεοπτικού σήματος απεικονίζεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 7.3 Φάσμα έγχρωμου τηλεοπτικού σήματος.

Ας δούμε λίγο πιο προσεκτικά την περίπτωση του PAL, όπου διαμορφώνονται τα δύο σήματα που αποτελούν το χρώμα, τα οποία ας συμβολίσουμε $u(t)$ και $v(t)$, όπου t ο χρόνος (ως ανεξάρτητη μεταβλητή). Η διαμόρφωση των δύο αυτών σημάτων $u(t)$ και $v(t)$ κατά QAM στη συχνότητα της φέρουσας του χρώματος ($f_{\Phi X}$) γίνεται με χρήση της επόμενης σχέσης:

$$u(t) \cos(2\pi f_{\Phi X} t) + v(t) \cos(2\pi f_{\Phi X} t + \pi / 2) \quad (6)$$

Παρατηρούμε ότι στη διαμόρφωση του $v(t)$ εισάγεται η διαφορά φάσης $\pi/2$. Κατά την αποκωδικοποίηση, το λαμβανόμενο σήμα πολλαπλασιάζεται με το φέρον με τις δύο τιμές της φάσης (0 και $\pi/2$) ώστε σε κάθε μια από τις περιπτώσεις να προκύψει το ένα από τα αρχικά σήματα.

Συγκεκριμένα:

$$(u(t) \cos(2\pi f_{\Phi X} t) + v(t) \cos(2\pi f_{\Phi X} t + \pi / 2)) \cos(2\pi f_{\Phi X} t) \quad (7)$$

και

$$u(t) \cos(2\pi f_{\Phi X} t) + v(t) \cos\left(2\pi f_{\Phi X} t + \frac{\pi}{2}\right) \left(\cos\left(2\pi f_{\Phi X} t + \frac{\pi}{2}\right)\right) \quad (8)$$

Κάνοντας τις απαραίτητες πράξεις από την πρώτη εξίσωση προκύπτει το σήμα $u(t)$, με το πλάτος υποβαθμισμένο κατά το ήμισυ και από τη δεύτερη εξίσωση προκύπτει το $v(t)$ με αντίστοιχο υποδιπλασιασμό του πλάτους. Και στις δύο περιπτώσεις το άλλο σήμα προκύπτει ως γινόμενο με σήμα συχνότητας διπλάσιας της $f_{\Phi X}$ οπότε αφαιρείται από το σχετικό φιλτράρισμα.

Η διαμόρφωση QAM απαιτεί ισχυρό συγχρονισμό, ώστε να αποτραπεί η παρουσία διαφωνίας (crosstalk). Η αποδιαμόρφωση πρέπει να είναι *ομόδυνη*, δηλαδή ο ταλαντωτής στον δέκτη πρέπει να είναι στην ίδια συχνότητα και φάση με το φέρον του χρώματος.

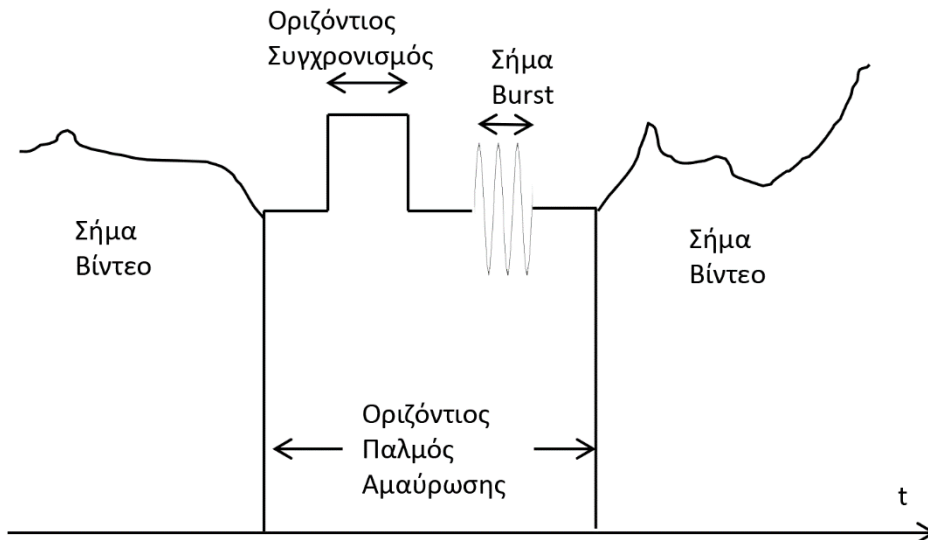
Στην αμέσως επόμενη ενότητα θα εξετάσουμε πώς αντιμετωπίζεται αυτή η απαίτηση.

7.2.2.3 Σήμα Burst και Αντιμετώπιση Διαφοράς Φάσης

Επειδή καταπνίγεται η χρωμοφέρουσα (όπως είδαμε προηγουμένως, έχουμε διαμόρφωση Suppressed Carrier) δεν μεταφέρεται κάποια πληροφορία για τη συχνότητα και τη φάση αυτής. Από την άλλη, η πληροφορία της χρωμοφέρουσας είναι απαραίτητη στον δέκτη ώστε να αποφευχθεί η διαφορά φάσης και ακόμη πιο σημαντικά η διαφορά στη συχνότητα.

Για τον σκοπό αυτόν, ένα δείγμα της χρωμοφέρουσας μεταφέρεται προς τον δέκτη. Συγκεκριμένα, στον οπίσθιο οριζόντιο παλμό αμαύρωσης, μεταφέρεται ένα μικρό δείγμα του χρωμοφέροντος για να έχουμε συμφασική ταλάντωση στον δέκτη. Αυτό το δείγμα ονομάζεται σήμα *burst*. Το σήμα burst επιτρέπει τον συγχρονισμό του ταλαντωτή χρώματος.

Το σήμα αυτό παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 7.4 Σήμα burst εντός του οριζόντιου παλμού αμαύρωσης.

Σφάλματα μπορεί να υπάρχουν λόγω παραμόρφωσης που εισάγει το σύστημα εκπομπής και μετάδοσης. Στο NTSC τα σφάλματα φάσης μεταξύ ταλαντωτή χρώματος πομπού και δέκτη επηρεάζουν τη χροιά του εκπεμπόμενου χρώματος. Το σύστημα PAL (Phase Alternation per Line) το οποίο έχει προκύψει ως βελτίωση του NTSC για την αντιμετώπιση φασικών σφαλμάτων, λειτουργεί σύμφωνα με τον παρακάτω μηχανισμό.

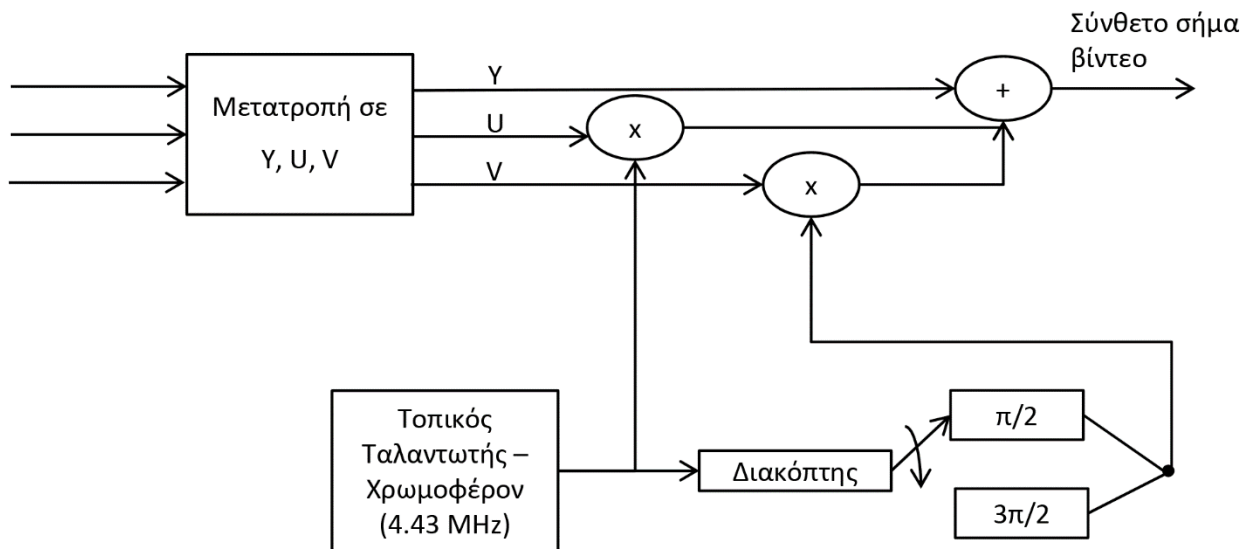
Στο PAL η φάση της χρωμοφέρουσας του σήματος V μεταβάλλεται από γραμμή σε γραμμή κατά 180° . Πριν τη διαμόρφωση του σήματος $v(t)$ ένας διακόπτης αλλάζει την πολικότητα του σήματος διαμόρφωσης κατά 180° γραμμή παρά γραμμή. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η αντιμετώπιση του σφάλματος, της διαφοράς φάσης, στον δέκτη.

Έστω ότι εισάγεται φασικό σφάλμα α , λόγω του ανωτέρω μηχανισμού του PAL:

- στη μια γραμμή έχουμε θετικό σφάλμα, στην άλλη αρνητικό
- στη μια γραμμή μεγαλώνει τη γωνία, στην άλλη την ελαττώνει

Το αποτέλεσμα της άθροισης στον δέκτη δίνει περίπου την αρχική φάση, ενώ το μέτρο διαφοροποιείται και αυτό επηρεάζει τον κορεσμό. Ο κορεσμός όμως δεν είναι τόσο σημαντικός όσο η χροιά. Η άθροιση στον δέκτη μπορεί να γίνει είτε με το μάτι (στην απλούστερη περίπτωση), είτε με τη βοήθεια καθυστέρησης (μνήμης) να γίνει άθροιση των γραμμών.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται ο μηχανισμός δημιουργίας του συστήματος PAL και η προσθήκη της διαφοράς φάσης ανά γραμμή.



Εικόνα 7.5 Βαθμίδες συστήματος PAL.

Στην πράξη αλλάζουμε κατά 180° τη φάση του υποφέροντος χρώματος το οποίο δίνει (μαζί με τη διαφορά φάσης των 90° λόγω QAM) μια συνολική διαφορά φάσης στις 90° και 270° .

7.2.2.4 Φονέας Χρώματος

Όταν γίνεται λήψη ενός ασπρόμαυρου προγράμματος από έγχρωμο δέκτη, στην οθόνη μπορεί να εμφανίζονται στίγματα τυχαίων αποχρώσεων. Αυτό οφείλεται στο ότι ο αποκωδικοποιητής δέχεται ισχύ στις συχνότητες του σήματος φωτεινότητας γύρω από τα 4.43 MHz. Αυτό σημαίνει ότι αυτές λαμβάνονται ως χρωματική πληροφορία.

Η βαθμίδα του *φονέα χρωμάτων* απομονώνει τον ενισχυτή χρωματοφόρου, όταν το πρόγραμμα είναι ασπρόμαυρο. Ο φονέας χρώματος ενεργοποιείται μόλις γίνει αντιληπτό ότι απουσιάζει το σήμα χρώματος. Ο εντοπισμός της παρουσίας / απουσίας του σήματος χρώματος γίνεται με τον εντοπισμό του προαναφερθέντος σήματος burst (στον παλμό οριζόντιας αμαύρωσης).

7.3 Ψηφιακή Διαμόρφωση

Στη συνέχεια εξετάζουμε τα βασικά βήματα που εμπλέκονται στην ψηφιακή διαμόρφωση. Το βήμα που προηγείται της ψηφιακής διαμόρφωσης είναι η εξωτερική και η εσωτερική κωδικοποίηση και διεμπλοκή (outer και inner coding και interleaving αντίστοιχα) τις οποίες εξετάσαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Όπως είχαμε δει, η κωδικοποίηση προσθέτει πλεονάζουσα πληροφορία για τον εντοπισμό και τη διόρθωση σφαλμάτων. Η δε βαθμίδα της διεμπλοκής είναι για την αντιμετάθεση των bits που συνθέτουν την πληροφορία ώστε να γίνει πιο αποτελεσματική η αντιμετώπιση συνεχόμενων σφαλμάτων (ριπών, δηλαδή, θορύβου).

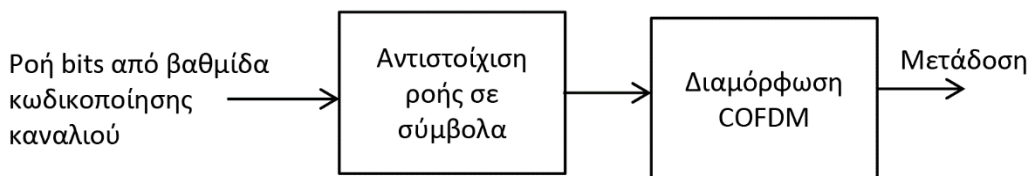
7.3.1 Αντιστοίχιση Ροής σε Σύμβολα

Στην ψηφιακή διαμόρφωση το σήμα προς διαμόρφωση είναι ψηφιακό, αποτελείται δηλαδή από ακολουθίες 0 και 1. Για να αντιστοιχιστεί η ακολουθία αυτή στον διαμορφωτή απαιτείται ένας *αντιστοιχιστής* συμβόλων σε bits. Μετά την αντιστοίχιση αυτή η ψηφιακή ακολουθία γίνεται συνεχές σήμα.

Ο ψηφιακός διαμορφωτής είναι σε άμεση συνεργασία με τη βαθμίδα της εσωτερικής διεμπλοκής. Στην περίπτωση της ψηφιακής διαμόρφωσης είναι δυνατόν να έχουμε διαφορετικά είδη διαμόρφωσης, τα οποία εξαρτώνται από το πλήθος των bits που θέλουμε να αντιστοιχίσουμε σε κάθε σύμβολο. Συγκεκριμένα, έχουμε τις εξής πιο συνηθισμένες περιπτώσεις:

- Ένα bit (άρα δύο δυνατοί συνδυασμοί) ανά σύμβολο, οπότε η διαμόρφωση είναι η BPSK (Binary Phase Shift Keying)
- Δύο bits (άρα τέσσερις δυνατοί συνδυασμοί) ανά σύμβολο, οπότε η διαμόρφωση είναι η QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) ή ισοδύναμα 4-QAM (4 – Quadrature Amplitude Modulation).
- Τέσσερα bits (άρα δεκαέξι δυνατοί συνδυασμοί) ανά σύμβολο, οπότε η διαμόρφωση είναι η 16-QAM (16 – Quadrature Phase Shift Keying).
- Έξι bits (άρα εξήντα τέσσερις δυνατοί συνδυασμοί) ανά σύμβολο, οπότε η διαμόρφωση είναι η 64-QAM (64 – Quadrature Phase Shift Keying).
- Οκτώ bits (άρα εκατό είκοσι οκτώ δυνατοί συνδυασμοί) ανά σύμβολο, οπότε η διαμόρφωση είναι η 256-QAM (256 – Quadrature Phase Shift Keying).

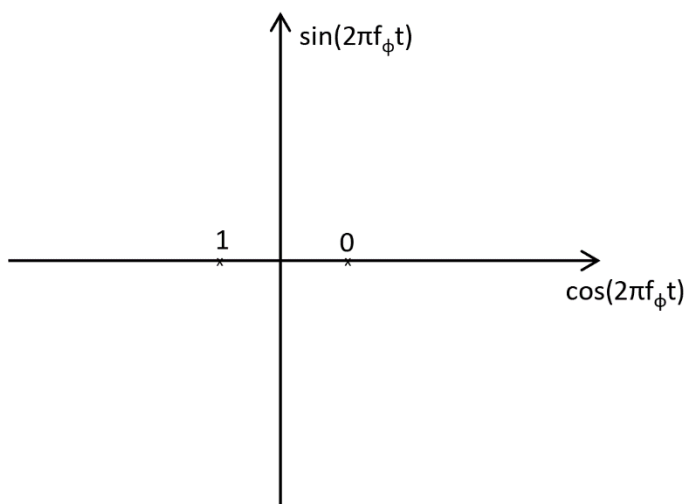
Ο τύπος της διαμόρφωσης προκύπτει από το πλήθος των συμβόλων, το οποίο, βέβαια, συνδέεται με το πλήθος των bits που αντιστοιχούν σε κάθε σύμβολο. Οι βασικές βαθμίδες του συστήματος διαμόρφωσης παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 7.6 Βαθμίδες διαμόρφωσης.

Το πρώτο βήμα της διαμόρφωσης είναι η ομαδοποίηση των δεδομένων ώστε να δημιουργηθούν τα διαμορφωμένα σύμβολα, στο μιγαδικό επίπεδο. Τα σύμβολα αυτά αντιστοιχούν σε μιγαδικούς αριθμούς. Το σύνολο των μιγαδικών αυτών αριθμών και των απεικονίσεών τους στο μιγαδικό επίπεδο δημιουργεί το *διάγραμμα αστερισμού* (constellation diagram).

Το πλήθος των συμβόλων για κάθε διάγραμμα εξαρτάται από το πλήθος των bits (2 στην περίπτωση του BPSK, 4 για την QPSK, 16 σύμβολα στη 16-QAM). Το διάγραμμα αστερισμού για την αντιστοίχιση BPSK απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα:

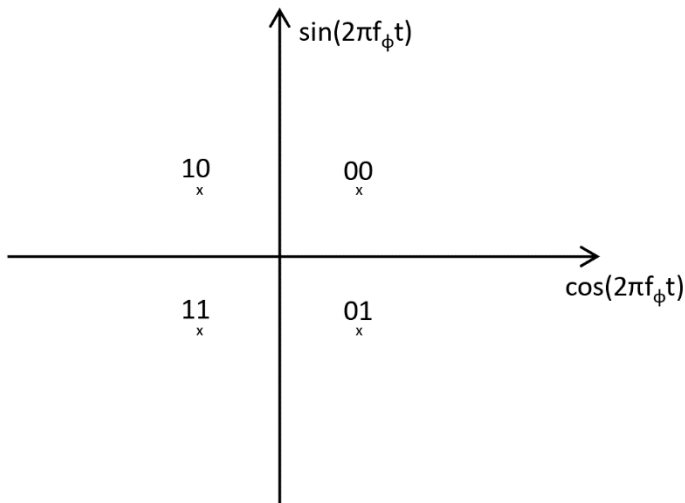


Εικόνα 7.7 Διάγραμμα αστερισμού για BPSK.

Οι άξονες αντιστοιχούν ο μεν οριζόντιος στο φέρον, ο δε κατακόρυφος στο φέρον με διαφορά φάσης $\pi/2$ (όπως κατ' αντιστοιχία είχε συμβεί με την QAM στην αναλογική μετάδοση). Παρατηρούμε την ύπαρξη δύο συμβόλων, στον οριζόντιο άξονα. Το σύμβολο «0» αντιστοιχεί στο φέρον, ενώ το σύμβολο «1»

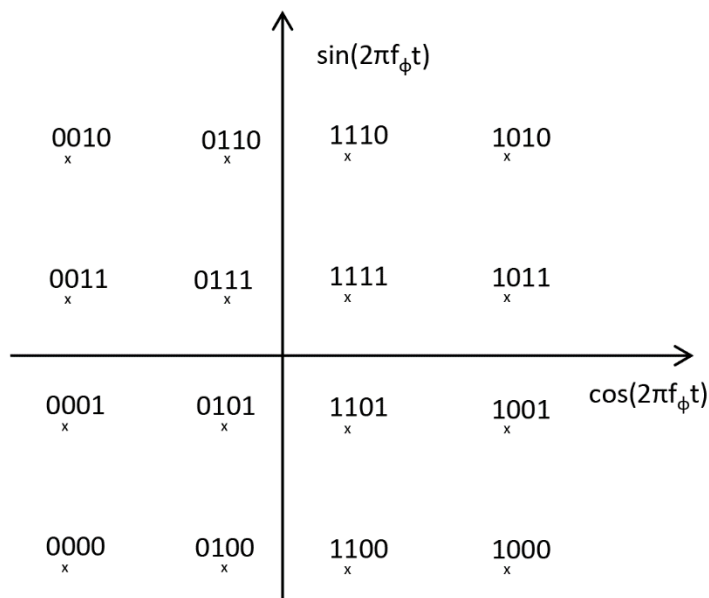
αντιστοιχεί στο φέρον με διαφορά φάσης π . Η BPSK είναι διαμόρφωση φάσης (αφού δεν υπάρχει κάποια διαφοροποίηση στο πλάτος των συμβόλων).

Στην περίπτωση του QPSK (4-QAM), έχουμε 2 bits άρα 4 σύμβολα (00, 01, 10 και 11) τα οποία διατάσσονται όπως στο επόμενο σχήμα. Παρατηρούμε ότι η διάταξη είναι τέτοια ώστε συνεχόμενα σύμβολα να διαφέρουν κατά ένα μόνο bit. Και στο QPSK, όπως απεικονίζεται στο τρέχον σχήμα (που είναι και η πλέον συνήθης περίπτωση) η διαφοροποίηση μεταξύ των συμβόλων αφορά τη φάση ($\pi/4$, $3\pi/4$, $5\pi/4$ και $7\pi/4$).



Εικόνα 7.8 Διάγραμμα αστερισμού για QPSK.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται το διάγραμμα αστερισμού για την 16 - QAM όπου με 4 bits έχουμε 16 συνδυασμούς, άρα και σύμβολα.



Εικόνα 7.9 Διάγραμμα αστερισμού για 16-QAM.

Παρατηρούμε ότι η διάταξη είναι τέτοια ώστε γειτονικά (κατά την οριζόντια ή την κατακόρυφη διεύθυνση) σύμβολα να διαφέρουν κατά ένα μόνο bit. Στην περίπτωση του διαγράμματος αστερισμού για το 16-QAM (όπως και για τις επόμενες αντιστοιχίσεις, 64-QAM, 256-QAM κ.λπ.) παρατηρούμε ότι οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των συμβόλων αφορούν όχι μόνο την φάση αλλά και το πλάτος. Αυτό σημαίνει ότι ανάλογα με το σύμβολο το οποίο αντιστοιχίζεται αλλάζει η φάση και το πλάτος του φέροντος.



[Παρατίθεται βίντεο για την μετάδοση πληροφορίας σε κανάλι με θόρυβο με αξιοποίηση δύο διαμορφώσεων \(QPSK και 64QAM\) και μετρήσεις των σχετικών σφαλμάτων με χρήση του Simulink.](#)

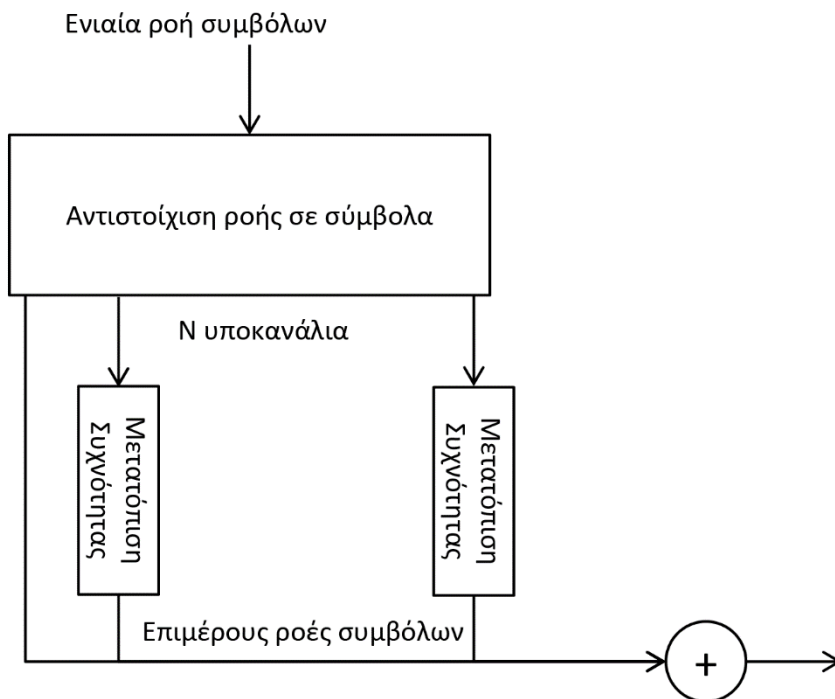
7.3.2 Διαμόρφωση COFDM

Η επίγεια ψηφιακή τηλεόραση χρησιμοποιεί για τη μετάδοση του σήματος την κωδικοποιημένη ορθογώνια πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing, COFDM). Το COFDM χρησιμοποιείται κυρίως στην Ευρώπη και υποστηρίζει το σύνολο σχεδόν των προτύπων για ψηφιακή ραδιοφωνική και τηλεοπτική μετάδοση (με βασικό το Digital Video Broadcasting – Terrestrial, DVB-T). Το πλεονέκτημα του COFDM είναι η αντοχή στον θόρυβο που προκύπτει λόγω πολλαπλών διαδρομών, επειδή χρησιμοποιεί πολλαπλά φέροντα για να διαβιβάσει το σήμα.

Συγκεκριμένα, το COFDM αναθέτει την πληροφορία από ένα ενιαίο ψηφιακό σήμα σε πολλαπλά φέροντα που λειτουργούν ταυτόχρονα. Για να μην παρεμποδίζει το ένα φέρον το άλλο, αποστέλλονται ορθογώνια μεταξύ τους. Δυο χρονικές συναρτήσεις είναι ορθογώνιες (έχουν δηλαδή διαφορά 90°) όταν το άθροισμα των γινομένων τους (για την ακρίβεια, το το ορισμένο ολοκλήρωμα του γινομένου τους) είναι μηδέν. Στα ορθογώνια σήματα δεν έχουμε παρεμβολή μεταξύ των σημάτων.

Η βασική, λοιπόν, ιδέα της ορθογωνικής πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας είναι ο διαχωρισμός του καναλιού σε πολλά επιμέρους υποκανάλια. Τα υποκανάλια αυτά ανήκουν στο φάσμα ενός συγκεκριμένου καναλιού (π.χ. ενός καναλιού στην μπάντα των UHF). Το σήμα αυτών των υποκαναλιών πολυπλέκεται με διαίρεση συχνότητας, εντός του εύρους ζώνης του βασικού καναλιού.

Μια υλοποίηση του OFDM παρίσταται στο επόμενο σχήμα με τη χρήση N υποκαναλιών όπου παρουσιάζονται οι βασικές βαθμίδες στο διάγραμμα ενός διαμορφωτή N υποκαναλιών.



Εικόνα 7.10 Διαχωρισμός ενιαίας ροής συμβόλων σε επιμέρους ροές του OFDM.

Η επόμενη εικόνα δείχνει προσεγγιστικά την ισχύ του φάσματος του σήματος OFDM. Το σήμα OFDM επιτρέπει μια πιο ομαλή κατανομή της ισχύος κατά μήκος του εύρους ζώνης του καναλιού και έχει πιο απότομη πτώση της ισχύος στα άκρα του καναλιού, γεγονός που μειώνει τις απαιτήσεις στη σχεδίαση των φίλτρων που εμπλέκονται.



Εικόνα 7.11 Ισχύς φάσματος καναλιού OFDM.

Η παρεμβολή με άλλα σήματα περιορίζεται αφού ελαχιστοποιείται το επίπεδο του σήματος εκτός του καναλιού χωρίς την ανάγκη πολύπλοκου φιλτραρίσματος. Η βασική απαίτηση για το OFDM έχει να κάνει με τον συγχρονισμό των υποκαναλιών ώστε η εκ νέου πολυπλεξία στον αποκωδικοποιητή να είναι δυνατή και να δημιουργηθεί η αρχική ροή δεδομένων (bitstream). Τα φέροντα στα οποία βασίζεται η διαμόρφωση πρέπει να είναι ορθογώνια μεταξύ τους, ώστε να επιτευχθεί μεγάλη απόδοση στη χρήση του φάσματος.

Η υψηλή απόδοση στη χρήση του φάσματος είναι ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του OFDM αφού το σήμα είναι πιο ομοιόμορφα κατανομημένο σε όλο το εύρος ζώνης από ό,τι θα ήταν μια απλή ροή δεδομένων. Το OFDM παρέχει καλύτερη προστασία στις παρεμβολές. Επίσης, οποιαδήποτε φαινόμενα σχετίζονται με ένα από τα φέροντα δεν είναι σε θέση να επηρεάζουν τα άλλα φέροντα λόγω του γεγονότος ότι είναι ορθογώνια μεταξύ τους.

7.3.2.1 Τρόποι Λειτουργίας – Πλήθος Φερόντων

Το σύστημα διαμόρφωσης κατά OFDM στο DVB έχει δύο τρόπους λειτουργίας, οι οποίοι είναι οι εξής:

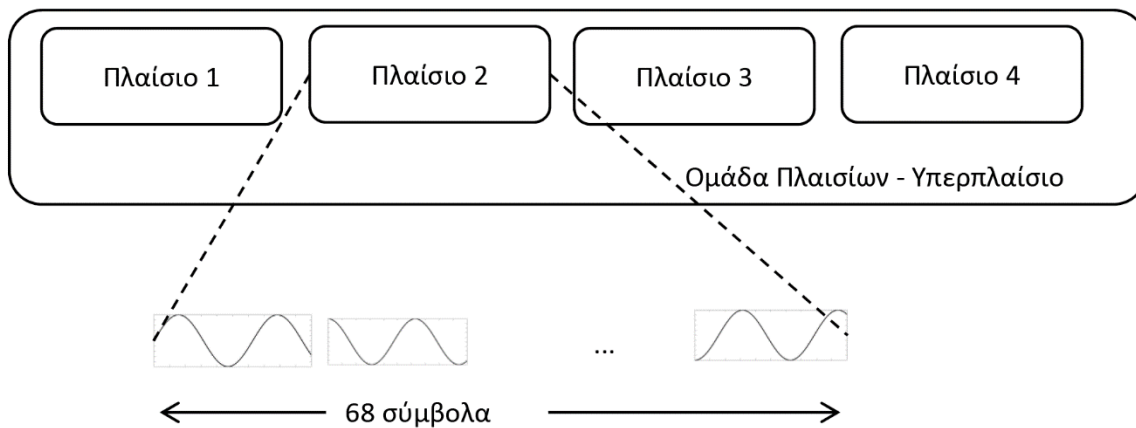
- Ο τρόπος 2K (2K mode), όπου υπάρχουν 2.048 φέροντα (φέρουσες συχνότητες) εντός του καναλιού, με σταθερή απόσταση μεταξύ τους.
- Ο τρόπος 8K (8K mode), όπου υπάρχουν 8.192 φέροντα (φέρουσες συχνότητες) εντός του καναλιού, ομοίως με σταθερή απόσταση μεταξύ τους.

Τόσο στην περίπτωση του τρόπου 2K όσο και στην περίπτωση του 8K μόνο ένα υποσύνολο από τα διαθέσιμα φέροντα χρησιμοποιείται για τη μετάδοση των δεδομένων.

- Συγκεκριμένα, στον τρόπο 2K χρησιμοποιούνται 1.705 φέροντα για τη μετάδοση των δεδομένων. Από τα 1.705 φέροντα σε κάθε σύμβολο του OFDM, τα 193 χρησιμοποιούνται ως πιλότοι (pilots) και για τη σηματοδότηση (λειτουργίες οι οποίες περιγράφονται παρακάτω). Λόγω αυτού μένουν 1.512 χρήσιμες φέρουσες για τη μετάδοση του σήματος.
- Στον τρόπο 8K, τα 6.817 από τα φέροντα τα οποία βρίσκονται στο μέσο του καναλιού χρησιμοποιούνται για μετάδοση. Από τα 6.817 φέροντα σε κάθε σύμβολο OFDM, χρησιμοποιούνται 769 ως πιλότοι και για σηματοδότηση, αφήνοντας 6.048 ως χρήσιμα φέροντα.

Κάθε ένα από τα φέροντα που περιέχονται διαμορφώνονται κατά QPSK, 16-QAM, ή 64-QAM. Το σύνολο των συμβόλων που μεταδίδονται ταυτόχρονα σε όλα τα επιμέρους φέροντα αποτελούν το σύμβολο OFDM.

Τα OFDM σύμβολα ομαδοποιούνται για να δημιουργήσουν πλαίσια OFDM κάθε ένα από τα οποία περιλαμβάνει 68 σύμβολα OFDM. Τέσσερα πλαίσια ομαδοποιούνται περαιτέρω για να σχηματίσουν ένα υπερπλαίσιο (superframe), το οποίο είναι μία ομάδα πλαισίων. Η ομαδοποίηση αυτή απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 7.12 Ομαδοποίηση πλαισίων OFDM.

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη (μεταξύ των οποίων το πλήθος φερόντων, η διάρκεια του συμβόλου, η απόσταση της συχνότητας μεταξύ των φερόντων) των δύο τρόπων, του τρόπου δηλαδή 8K και του τρόπου 2K.

Χαρακτηριστικά	Τρόπος 8K	Τρόπος 2K
Πλήθος φερόντων	6.817	1.705
Δείκτης χαμηλότερου φέροντος	0	0
Δείκτης υψηλότερου φέροντος	6816	1704
Διάρκεια συμβόλου T_u	896 μ s	224 μ s
Απόσταση συχνότητας μεταξύ των φερόντων ($1/T_u$)	1.116 Hz	4.464 Hz
Απόσταση συχνότητας μεταξύ των φερόντων με το χαμηλότερο και τον υψηλότερο δείκτη (για κανάλι 8 MHz)	7,61 MHz	7,61 MHz

Πίνακας 7.3 Χαρακτηριστικά των δύο τρόπων 8K και 2K.

Παρατηρούμε ότι μεγαλύτερο πλήθος των φερόντων στον τρόπο 8K δημιουργεί την ανάγκη για μεγαλύτερη διάρκεια συμβόλου. Η απόσταση συχνότητας μεταξύ των φερόντων με τον χαμηλότερο και τον υψηλότερο δείκτη είναι η ίδια και στις δύο περιπτώσεις και αποτελεί το φάσμα για ένα κανάλι 8 MHz.

7.3.2.2 Διάστημα Προστασίας

Η επιλογή της απόστασης της συχνότητας των φερόντων (από την οποία προκύπτει το εύρος ζώνης του καναλιού για τη ροή των συμβόλων που μεταδίδεται σε κάθε φέρον) γίνεται έτσι ώστε να είναι το αντίστροφο της διάρκειας του συμβόλου OFDM (έστω T_u).

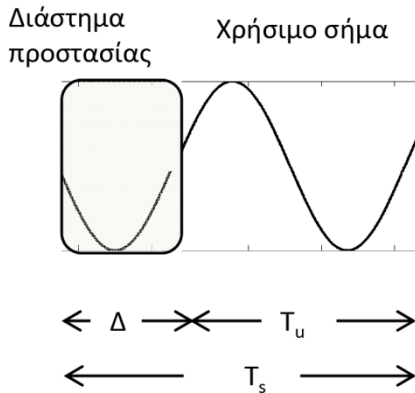
Αυτήν τη σχέση μπορούμε να την παρατηρήσουμε και από τις σχετικές γραμμές στον προηγούμενο πίνακα, συγκεκριμένα:

$$1116\text{Hz} = 1 / (896 \cdot 10^{-6}\text{sec}) \quad (9)$$

Επειδή όμως ενδέχεται να υπάρχει αλληλεπίδραση (παρεμβολή) μεταξύ των συμβόλων απαιτείται ένας τρόπος προστασίας για τον καλύτερο διαχωρισμό αυτών. Το ρόλο αυτό αναλαμβάνει το *διάστημα προστασίας*. Η σκοπιμότητα του διαστήματος προστασίας (guardinterval) είναι να μειώσει την επίδραση της παρεμβολής μεταξύ των συμβόλων, αυξάνοντας τη (χρονική) απόσταση μεταξύ τους και επιτρέποντας κάποιο χρόνο ώστε να υποχωρήσει η απόκριση του καναλιού μεταξύ των χρονικών σημείων όπου (α) στον

διαμορφωτή αλλάζει η τιμή του μεταδιδόμενου συμβόλου και (β) του σημείου όπου ο αποδιαμορφωτής ξεκινάει να χρησιμοποιεί το λαμβανόμενο σήμα για την αποδιαμόρφωση αυτού.

Το διάστημα προστασίας του DVB δημιουργείται αντιγράφοντας ένα μέρος του συμβόλου που πρόκειται να αποσταλεί και μεταδίδοντας αυτό το αντίγραφο ακριβώς πριν από το σύμβολο, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα. Το μέγεθος του διαστήματος προστασίας καθορίζει ποιο ποσοστό του συμβόλου αντιγράφεται με αυτόν τον τρόπο. Οι τιμές του διαστήματος μπορούν να επιλεγούν μεταξύ των 1/4, 1/8, 1/16 ή 1/32 της περιόδου του συμβόλου OFDM.



Εικόνα 7.13 Διάστημα προστασίας.

Για τα κανάλια στα οποία το σήμα μεταδίδεται μεταξύ του πομπού και του δέκτη με χρήση πολλών παράλληλων μονοπατιών (multipath channels), το διάστημα προστασίας είναι σημαντικό, αφού χωρίς αυτό η μετάδοση μέσω πολλαπλών μονοπατιών οδηγεί σε σημαντική παρεμβολή μεταξύ των σημάτων.

Η επιλογή του διαστήματος προστασίας επηρεάζει τη διαθέσιμη χρήσιμη χωρητικότητα. Ο επόμενος πίνακας δείχνει πώς επηρεάζεται το πλήθος των συμβόλων OFDM ανά δευτερόλεπτο με τους δύο τρόπους (2K και 8K) και ανάλογα με τη σχέση που έχει το διάστημα προστασίας σε σχέση με την περίοδο για ένα κανάλι 7 MHz.

Τρόπος	8K				2K			
Διάστημα προστασίας (Δ/T_u)	1/4	1/8	1/16	1/32	1/4	1/8	1/16	1/32
Διάρκεια χρήσιμου σήματος (T_u)	896 μ s				224 μ s			
Διάρκεια διαστήματος προστασίας (μ s)	224	112	56	28	56	28	14	7
Συνολική διάρκεια συμβόλου $T_s = T_u + \Delta$ (μ s)	1120	1008	952	924	280	252	238	231

Πίνακας 7.4 Διάρκεια συμβόλων με χρήση διαστήματος προστασίας.

Η εναλλαγή μεταξύ των δύο τρόπων (2K και 8K) δεν επηρεάζει την απώλεια σε εύρος ζώνης για συγκεκριμένο ποσοστό του λόγου του διαστήματος προστασίας προς την περίοδο του συμβόλου Δ/T_u . Μια μικρότερη τιμή του Δ/T_u μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένα κανάλι στον τρόπο 8K αντί για τον 2K, ώστε το μήκος του διαστήματος προστασίας να είναι να το ίδιο.

Για ένα σταθερό κανάλι μετάδοσης, έχουμε μικρότερη απώλεια εύρους ζώνης για διαστήματα προστασίας στον τρόπο 8K σε σχέση με τον τρόπο 2K. Η, αλλιώς, ο τρόπος 8K επιτρέπει καλύτερα τη λειτουργία με χρήση καναλιών των οποίων η κρουστική απόκριση χρειάζεται περισσότερο χρόνο να αποσβεστεί σε σχέση με τον τρόπο 2K.

7.3.3 Σηματοδοσία και Σήματα Αναφοράς

7.3.3.1 Σηματοδοσία

Ένας αποκωδικοποιητής DVB πρέπει να είναι σε θέση να αναγνωρίζει τις παραμέτρους που αφορούν τη μετάδοση και τη λήψη του εκπεμπόμενου σήματος καθώς και να το αποκωδικοποιεί (χωρίς, βέβαια, την παρέμβαση του χρήστη). Αυτό σημαίνει ότι ο αποκωδικοποιητής πρέπει να μπορεί να ενημερώνεται για τα χαρακτηριστικά τα οποία είναι δυνατό να διαφοροποιούνται ανά περίπτωση (για παράδειγμα, ανά εκπεμπόμενο πρόγραμμα).

Τα χαρακτηριστικά αυτά περιλαμβάνουν τον τύπο της διαμόρφωσης, τον ρυθμό εσωτερικής κωδικοποίησης, το διάστημα προστασίας. Απαιτείται, λοιπόν, ένας μηχανισμός με τον οποίο να αποστέλλονται αυτά τα χαρακτηριστικά από τον πομπό στον δέκτη. Ο μηχανισμός αυτός στηρίζεται στη σηματοδοσία.

Συγκεκριμένα, η σηματοδοσία για τις παραμέτρους μετάδοσης (Transmission Parameter Signaling, TPS) χρησιμοποιείται για να παρέχει αυτού του είδους τις πληροφορίες στον αποκωδικοποιητή. Η σηματοδοσία TPS χρησιμοποιεί κάποιες από τις φέρουσες OFDM, 17 για την περίπτωση του τρόπου 2K και 68 για τον τρόπο 8K. Καθεμία από αυτές τις φέρουσες μεταφέρει την ίδια ροή δεδομένων. Οι φέρουσες αυτές είναι αφιερωμένες στην αποστολή της σηματοδοσίας και δε χρησιμοποιούνται για κάποιον άλλο σκοπό.

Τα δεδομένα TPS κωδικοποιούνται χρησιμοποιώντας διαφορικό BPSK (Differential BPSK, DBPSK), ώστε ο αποκωδικοποιητής να μη χρειάζεται να γνωρίζει τον τύπο της διαμόρφωσης πριν ξεκινήσει την αποδιαμόρφωση. Κάθε σύμβολο OFDM μεταφέρει ένα bit TPS. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, εξήντα οκτώ (68) διαδοχικά OFDM σύμβολα δημιουργούν ένα πλαίσιο OFDM. Τα 68 bits TPS που μεταφέρονται από κάθε OFDM πλαίσιο δημιουργούν ένα μπλοκ TPS (TPS block). Κάθε TPS block περιέχει ένα bit αρχικοποίησης το οποίο ακολουθείται από 16 bits συγχρονισμού, 37 bits πληροφορίες και 14 bits πλεονασμού για προστασία από σφάλματα.

Το πλήθος bits για τα περιεχόμενα κάθε πεδίου φαίνονται στον επόμενο πίνακα:

Πεδίο	Πλήθος Bits
Bit αρχικοποίησης	1
Bits συγχρονισμού	16
Μήκος	6
Αριθμός πλαισίου (εντός του υπερπλαισίου)	2
Αστερισμός (QPSK, 16-QAM, 64-QAM)	2
Πληροφορία ιεραρχίας (ιεραρχικός - μη ιεραρχικός τρόπος)	3
Ρυθμός κωδικοποίησης (ρυθμός εσωτερικής κωδικοποίησης 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8)	3
Τρόπος μετάδοσης (2K, 8K)	1
Αναγνωριστικό	6

Πίνακας 7.5 Περιεχόμενα πεδίων σε σήματα TPS.

Παρατηρούμε ότι μετά την αρχικοποίηση και τον συγχρονισμό παρέχονται πληροφορίες για όλες τις βασικές παραμέτρους που χαρακτηρίζουν τη μετάδοση.

7.3.3.2 Σήματα Αναφοράς

Επιπρόσθετα της πληροφορίας που αφορά τα δεδομένα TPS, το DVB χρησιμοποιεί δύο ακόμα τύπους σημάτων αναφοράς: τους συνεχόμενους πιλότους (continual pilots) και τους διασκορπισμένους πιλότους (scattered pilots). Αμφότερα τα σήματα – πιλότοι δημιουργούν μια ψευδοτυχαία ακολουθία η οποία διαμορφώνεται κατά BPSK. Οι διασκορπισμένοι πιλότοι μεταδίδονται με τις φέρουσες στη χαμηλότερη και την υψηλότερη συχνότητα.

Από τις 1705 φέρουσες στον τρόπο 2K οι 1.512 είναι διαθέσιμες για την μεταφορά δεδομένων και οι υπόλοιπες 193 χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση σημάτων αναφοράς. Αντίστοιχα στον τρόπο 8K από τις 6.048 χρήσιμες φέρουσες, 769 χρησιμοποιούνται για τα σήματα αναφοράς.

Οι συνεχόμενοι πιλότοι μεταδίδονται με χρήση των ίδιων κάθε φορά φερουσών, όπως αυτές αναφέρονται στον επόμενο Πίνακα.

Δείκτες φερόντων	0, 48, 54, 87, 141, 156, 192,
	201, 255, 279, 282, 333, 432, 450,
	483, 525, 531, 618, 636, 714, 759,
	765, 780, 804, 873, 888, 918, 939,
	942, 969, 984, 1050, 1101, 1107, 1110,
	1137, 1140, 1146, 1206, 1269, 1323, 1377,
	1491, 1683, 1704

Πίνακας 7.6 Δείκτες φερουσών για τον τρόπο 2K.

Αντίστοιχος πίνακας με περισσότερες, βέβαια, φέρουσες ισχύει για τον τρόπο 8K.

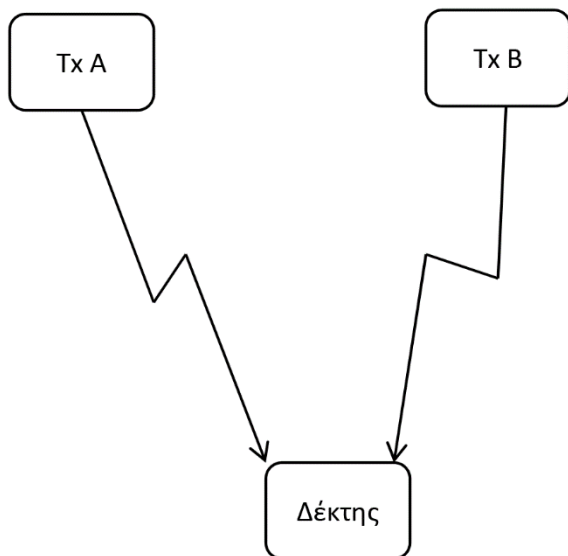
7.3.4 Μονοσυχνотικά Δίκτυα

Στα τυπικά τηλεοπτικά δίκτυα, συχνά χρησιμοποιούνται τοπικοί αναμεταδότες για να παρέχουν ένα αποδεκτό επίπεδο σήματος σε διάφορες περιοχές. Λόγω της πιθανότητας παρεμβολής, οι αναμεταδότες αυτοί χρησιμοποιούν διαφορετικό κανάλι (διαφορετικό, δηλαδή, φάσμα συχνοτήτων) από τον κυρίως πομπό. Συχνά είναι αναγκαίο να ανατίθεται ένα ξεχωριστό κανάλι για κάθε περιοχή. Αυτού του είδους τα δίκτυα ονομάζονται *πολυσυχνотικά* (*Multi Frequency Network, MFN*).

Αυτή η πρακτική καθιστά τη διαχείριση του εύρους ζώνης για την επίγεια μετάδοση μη αποδοτική. Στην περίπτωση όμως της χρήσης του COFDM, γίνεται χρήση μεγάλου πλήθους από φέροντα για κάθε κανάλι. Παρεμβολή θα συμβεί σε ένα μικρό ποσοστό από αυτά τα φέροντα, προκαλώντας εξασθένηση και υψηλούς ρυθμούς σφαλμάτων (Bit Error Rate, BER).

Ο συνδυασμός της εξωτερικής και της εσωτερικής κωδικοποίησης σε ένα μεγάλο ποσοστό από τα φέροντα με τη χρήση της διεμπλοκής επιτρέπει την αντιμετώπιση της παρεμβολής. Αυτό οδηγεί στην επίτευξη μιας υψηλής ποιότητας ροής δεδομένων στην είσοδο του αποκωδικοποιητή MPEG-2. Το σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί μία συχνότητα σε ένα κανάλι ονομάζεται *μονοσυχνотικό δίκτυο* (*Single Frequency Network, SFN*).

Ένα τμήμα ενός μονοσυχνотικού δικτύου απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα. Χρησιμοποιούνται δύο αναμεταδότες («Α» και «Β»). Εάν οι αναμεταδότες αυτοί είναι σε κοντινή απόσταση, η λειτουργία στην ίδια συχνότητα μπορεί να οδηγήσει σε παρεμβολή (interference) μεταξύ των δύο σημάτων. Η διαφορά μεταξύ των καθυστερήσεων διάδοσης από τους δύο αναμεταδότες είναι ο βασικός λόγος για την υποβάθμιση του λαμβανόμενου σήματος.



Εικόνα 7.14 Παράδειγμα μονοσυχνοτικού δικτύου.

Η πρώτη επίδραση αυτής της διαφοροποίησης στην καθυστέρηση μετάδοσης είναι ότι δημιουργεί παρεμβολή μεταξύ των συμβόλων που αποτελούν τα σήματα, την ονομάζουμε *διασυμβολική παρεμβολή* (inter symbol interference). Όσο η διαφορά στην καθυστέρηση μετάδοσης (μεταξύ των δύο αναμεταδοτών) είναι μικρότερη από το διάστημα προστασίας, τότε η συμβολή του μονοσυχνοτικού δικτύου στη διασυμβολική παρεμβολή είναι αμελητέα.

Η δεύτερη επίδραση της λήψης σημάτων από δύο διαφορετικές πηγές είναι ότι η λαμβανόμενη ισχύς εξαρτάται από τη σχετική φάση των δύο σημάτων, η οποία αλλάζει με τη συχνότητα. Εάν η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο σημάτων είναι μισός κύκλος, η παρεμβολή οδηγεί στον μηδενισμό των σημάτων (αθροιστικά, δηλαδή, δίνουν μηδενικό σήμα).

Κατά την ανάλυση της επίδρασης της παρεμβολής, ας θεωρήσουμε τη χειρότερη περίπτωση, στην οποία τα σήματα από τους αναμεταδότες Α και Β έχουν την ίδια ισχύ. Σε αυτήν την περίπτωση, το σήμα μηδενίζεται στις συχνότητες στις οποίες η διαφορά στο μήκος των διαδρομών, έστω d_n , μεταξύ των αναμεταδοτών και των δεκτών λαμβάνουν τιμές οι οποίες ικανοποιούν την παρακάτω σχέση για ακέραιες τιμές του n :

$$d_n = \frac{\lambda(2n + 1)}{2} \quad (10)$$

Η διαφορά στη συχνότητα μεταξύ των μηδενισμών είναι ίση με το αντίστροφο της διαφοράς στην καθυστέρηση διάδοσης από το Α στον δέκτη και από το Β στον δέκτη. Στο σύστημα DVB οι φέρουσες OFDM για τις οποίες η λαμβανόμενη ισχύς είναι μικρή τείνουν να ομαδοποιούνται. Για αυτόν τον λόγο το DVB δεν αναθέτει σύμβολα στις φέρουσες του OFDM με αύξουσα σειρά συχνότητας αλλά αναθέτει τα σύμβολα στις φέρουσες με ψευδοτυχαία σειρά.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

47. A. G. Sennitt. *World Radio and TV Handbook* Volume 49, Billboard Books, 1995.
48. International Telecommunication Union in Recommendation ITU-R. *BT.470-6, Conventional Television Systems (PAL definition)*. International Telecommunication Union, 1998.
49. International Telecommunications Union Recommendation ITU-R. *BT.470-6 Conventional Television Systems, Annex 2*. International Telecommunication Union, 1998.
50. Comité consultatif international pour la radio (CCIR). *Report 308-2 Part 2 Chapter XII — Characteristics of Monochrome Television Systems*. Comité consultatif international pour la radio, 1970.
51. European Broadcasting Union. *Tech. 3213-E.: E.B.U. Standard for Chromaticity Tolerances for Studio Monitors*. European Broadcasting Union, 1975.
52. Digital Video Broadcasting. *Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television (DVB-T)*. Digital Video Broadcasting, 2015.

Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1

Το μοντέλο «commdvbt» το οποίο παρέχεται από το Simulink / Matlab καλύπτει ένα σημαντικό μέρος της λειτουργικότητας που περιγράφεται από το πρότυπο ETSI EN 300 744 για την επίγεια μετάδοση του τηλεοπτικού σήματος.

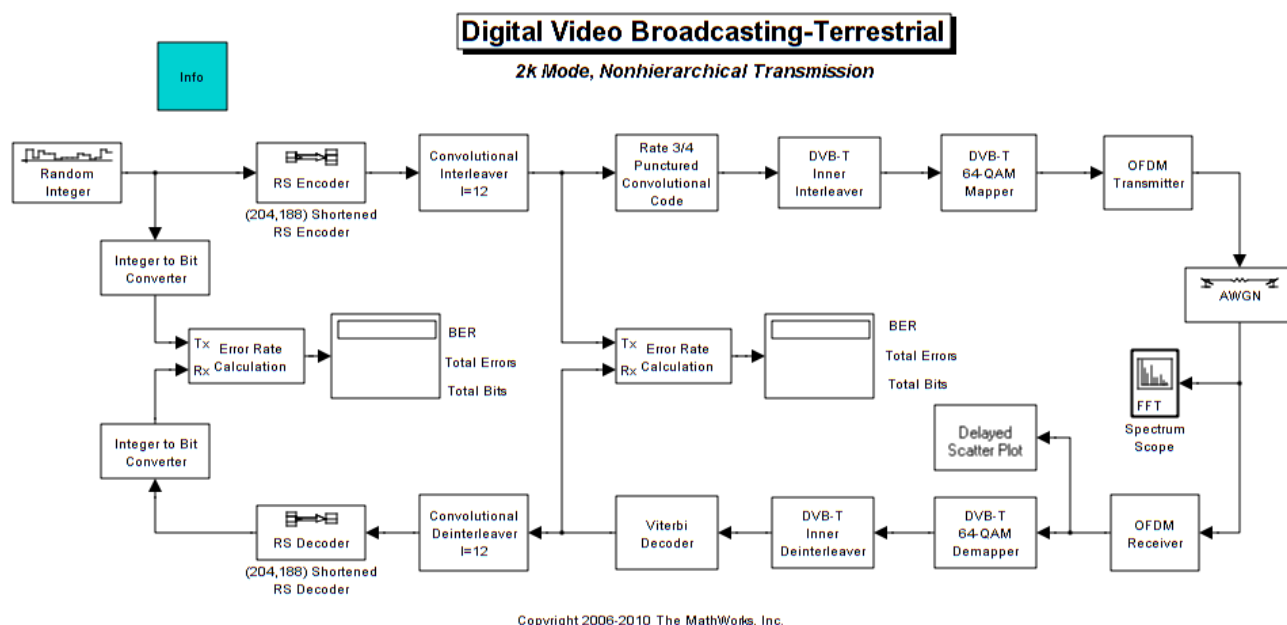
Ο στόχος του μοντέλου είναι να αποτυπώσει τις βασικές βαθμίδες του πομπού και του δέκτη και να δώσει κάποια στατιστικά για την ποιότητα λειτουργίας του συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες, αναφορικά με το κανάλι μετάδοσης.

Καλείστε να προβείτε:

- Σε αναγνώριση και σύντομη περιγραφή των επιμέρους βαθμίδων.
- Σε εκτέλεση του μοντέλου, με δεδομένα που αντιστοιχούν σε δύο σενάρια με διαφορετική ισχύ στο ενδιάμεσο κανάλι και στην επεξήγηση των αποτελεσμάτων.

Επισημαίνεται ότι ο τρόπος μετάδοσης που χρησιμοποιείται είναι ο 2K. Επίσης αποστέλλεται μία μόνο ροή, έχουμε δηλαδή μη ιεραρχική μετάδοση (στην περίπτωση της ιεραρχικής μετάδοσης θα υπάρχουν δύο ροές, με διαφορετική προτεραιότητα).

Το μοντέλο αυτό απεικονίζεται γραφικά, ως σχηματικό διάγραμμα στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 7.15 Σχηματικό διάγραμμα δικτύου DVB-T.

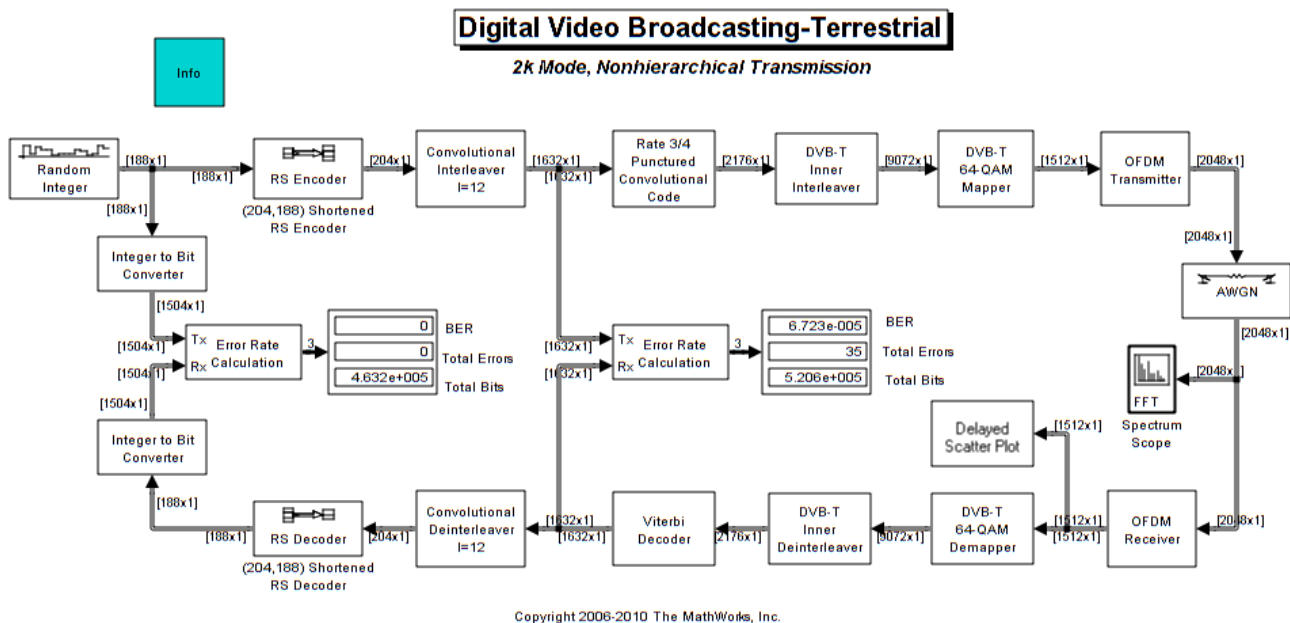
Απάντηση/Λύση

Από το σχήμα μπορούμε να παρατηρήσουμε τις βασικές βαθμίδες του συστήματος. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι υπάρχουν έξι ενδιάμεσες βαθμίδες, πλην της γεννήτριας του σήματος και του καναλιού, που αποτελούν τον πομπό και τον δέκτη (άνω και κάτω μέρος αντίστοιχα). Οι βαθμίδες αυτές είναι σε αντιστοιχία μεταξύ του πομπού και του δέκτη.

- Εξωτερική κωδικοποίηση: Χρησιμοποιείται ο RS Encoder και ο RS Decoder στον πομπό και τον δέκτη αντίστοιχα. Αμφότερες οι βαθμίδες λειτουργούν με παραμέτρους (204, 188).
- Εξωτερική διεμπλοκή: Χρησιμοποιείται ο convolutional interleaver και ο convolutional deinterleaver αντίστοιχα. Οι δύο βαθμίδες λειτουργούν με $N=12$ καταχωρητές, κάθε ένας εκ των οποίων έχει καθυστέρηση $(n-1)*B$, όπου B είναι το μήκος του καταχωρητή. Με την είσοδο ενός νέου συμβόλου, το νέο σύμβολο μετακινείται προς τα δεξιά, ενώ το πιο παλιό σύμβολο εξάγεται από τον καταχωρητή. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται κυκλικά. Η αντίστροφη διαδικασία γίνεται στον απεμπλοκέα (deinterleaver) με αποτέλεσμα η ροή των συμβόλων να επανέρχεται στην αρχική.
- Εσωτερικός κωδικοποιητής: Ο εσωτερικός κωδικοποιητής είναι ένας συνελκτικός κωδικοποιητής, ενώ ο αποκωδικοποιητής είναι Viterbi. Εφαρμόζεται διάτρηση (puncturing) με ρυθμό 3/4 και μάσκα διάτρησης [1 1 0 1 1 0].
- Εσωτερικός διεμπλοκέας και απεμπλοκέας: Αποτελείται από τις βαθμίδες innerinterleaver και innerde-interleaver οι οποίες είναι υπεύθυνες για τη διεμπλοκή των ροών σε επίπεδο bit.
- Αντιστοιχιστής συμβόλων: Είναι οι βαθμίδες QAM mapper και QAM demapper. Στην περίπτωση του μοντέλου που εξετάζουμε έχει επιλεγεί η αντιστοίχιση 64-QAM. Αυτό σημαίνει ότι αντιστοιχούνται 64 τιμές σε ένα σύμβολο (άρα αντιστοιχίζονται 6 bits σε ένα σύμβολο).
- Μετάδοση και Λήψη OFDM: Οι δύο κλάδοι του πομπού και του δέκτη συμπληρώνονται με τη βαθμίδα μετάδοσης και λήψης OFDM (transmitter και receiver).

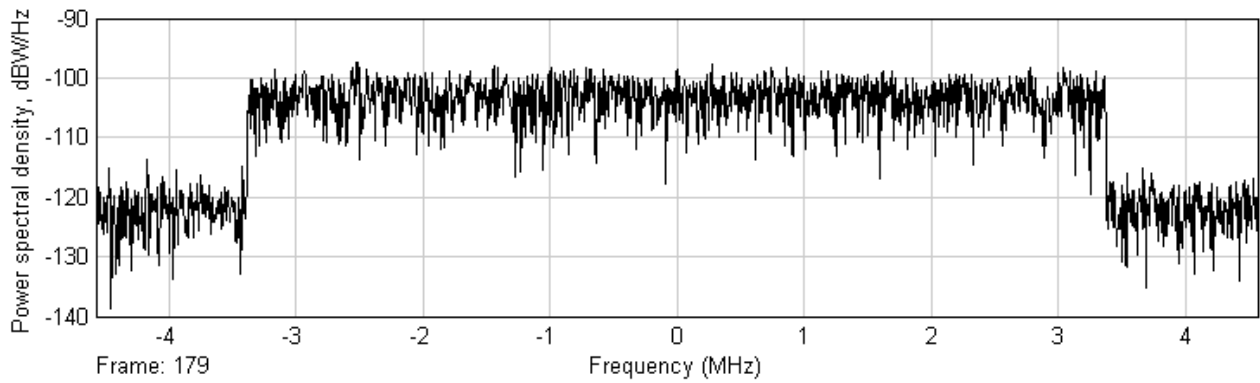
Το μοντέλο συμπληρώνεται με τη γεννήτρια σημάτων που βασίζεται σε μία βαθμίδα δημιουργίας τυχαίων ακεραίων. Οι βαθμίδες μετάδοσης και λήψης του OFDM συνδέονται με το κανάλι μετάδοσης, το οποίο θεωρούμε ότι χαρακτηρίζεται από προσθετικό λευκό θόρυβο (Additive White Gaussian Noise, AWGN), του οποίου η ένταση είναι παραμετροποιήσιμη.

Τα αποτελέσματα από την εκτέλεση του μοντέλου απεικονίζονται στα επόμενα σχήματα:



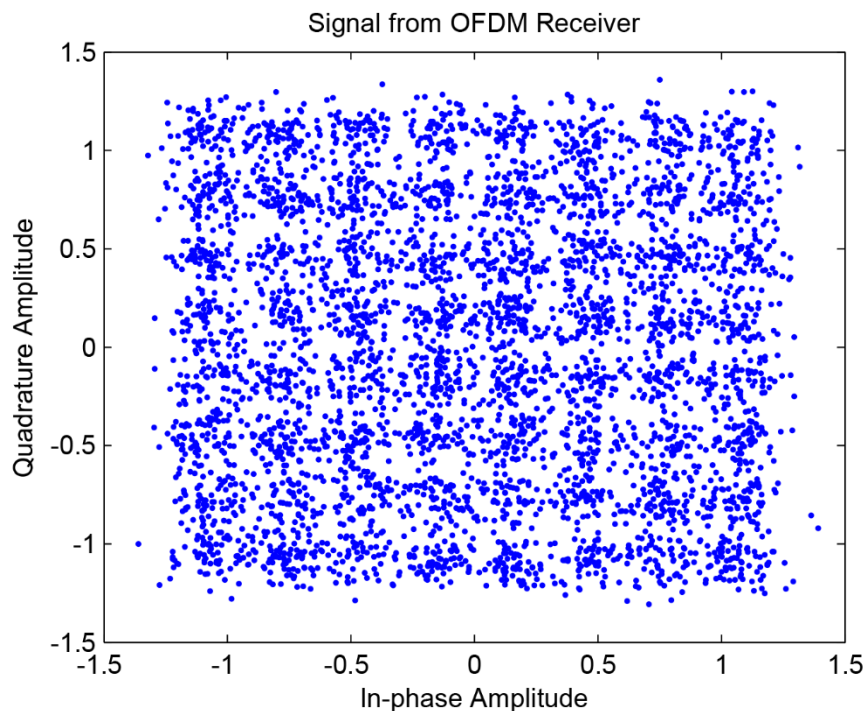
Εικόνα 7.16 Πρώτη εκτέλεση του μοντέλου.

Η φασματική ανάλυση από την πρώτη εκτέλεση του μοντέλου παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα. Παρατηρούμε πώς σχηματίζεται το πλάτος του καναλιού.



Εικόνα 7.17 Φασματική ανάλυση α' εκτέλεσης.

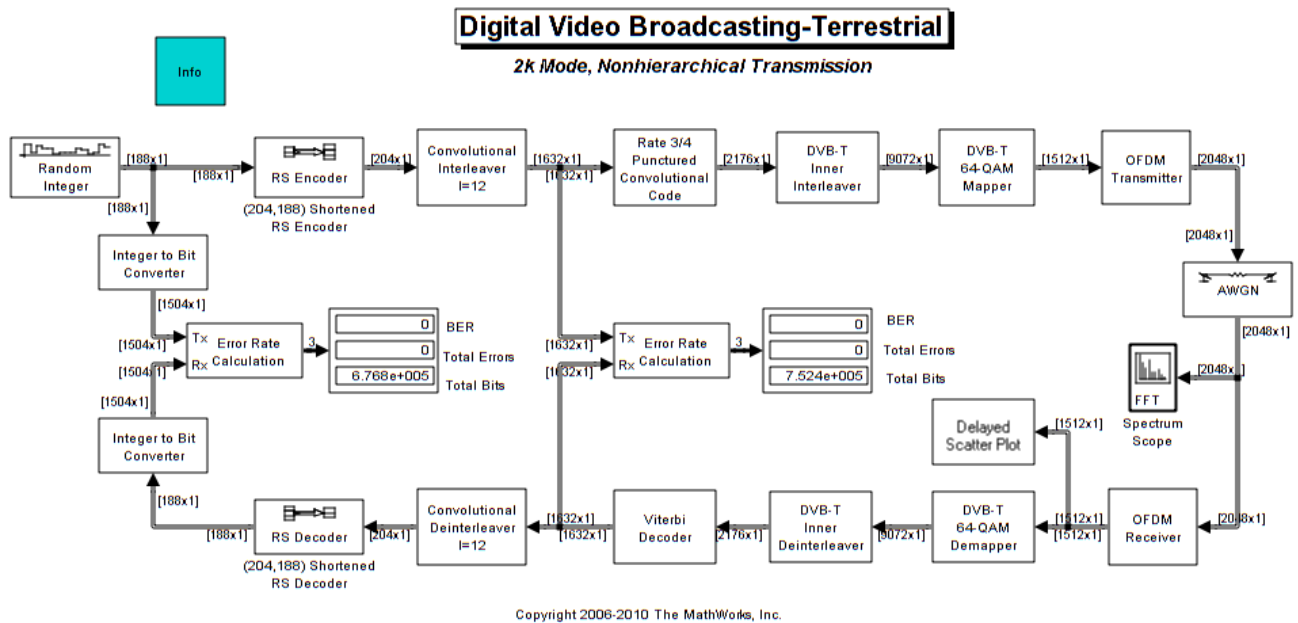
Στην επόμενη εικόνα απεικονίζεται το διάγραμμα αστερισμού μετά την πρώτη εκτέλεση του μοντέλου. Παρατηρούμε ότι υπάρχουν αρκετές αποκλίσεις από το ιδανικό διάγραμμα αστερισμού 64 σημείων.



Εικόνα 7.18 Διάγραμμα αστερισμού για την α' εκτέλεση.

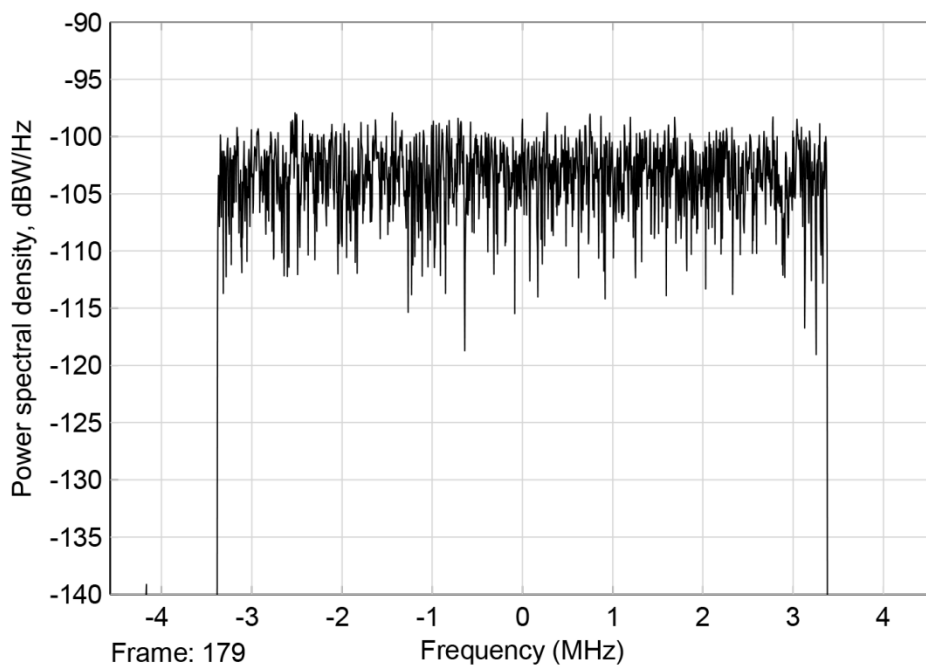
Εκτελούμε εκ νέου το μοντέλο με διαφοροποίηση στην ισχύ του θορύβου που χαρακτηρίζει το κανάλι, το οποίο συνδέει τον πομπό με τον δέκτη. Συγκεκριμένα, αλλάζουμε την τιμή του SNR από τα 18.5 dB που ήταν κατά την αρχική εκτέλεση του πειράματος στα 44 dB. Αυτό σημαίνει ότι το κανάλι είναι καλύτερα προστατευμένο από τον θόρυβο.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη νέα εκτέλεση του μοντέλου παρουσιάζονται στα επόμενα διαγράμματα:



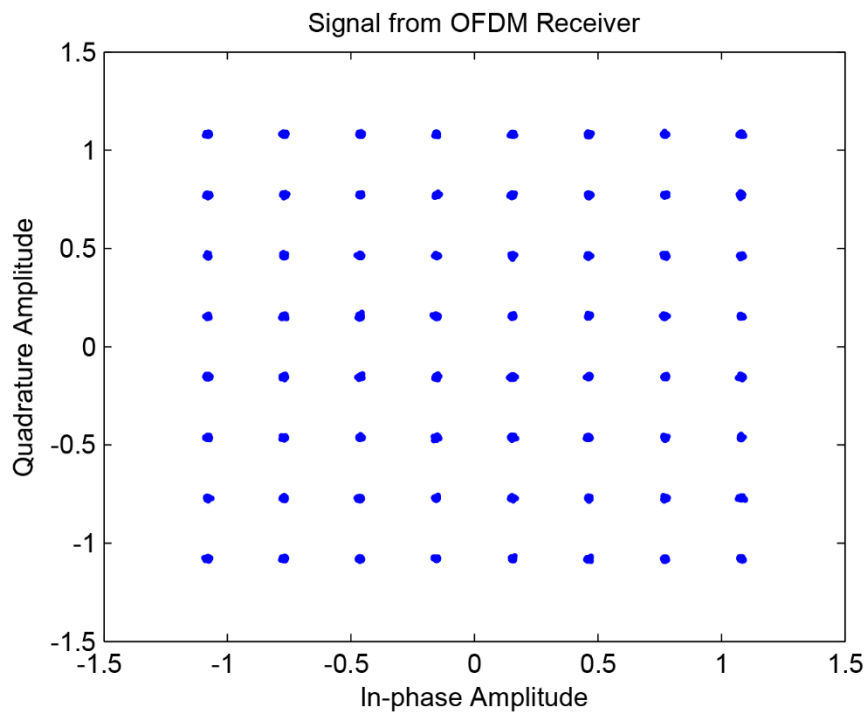
Εικόνα 7.19 Δεύτερη εκτέλεση του μοντέλου (αυξημένο SNR).

Στη συνέχεια απεικονίζεται η φασματική ανάλυση και το διάγραμμα αστερισμού που προκύπτουν από τη δεύτερη εκτέλεση του μοντέλου. Είναι εμφανής η καλύτερη χρήση του συνολικού φάσματος του καναλιού.



Εικόνα 7.20 Φασματική ανάλυση δεύτερης εκτέλεσης.

Στο επόμενο σχήμα αποτυπώνεται το διάγραμμα αστερισμού, στο οποίο είναι εμφανής η καλύτερη αντιστοίχιση των συμβόλων στις αναμενόμενες θέσεις (μέτρο και φάση) σε σχέση με την πρώτη εκτέλεση του πειράματος.



Εικόνα 7.21 Διάγραμμα αστερισμού για τη δεύτερη εκτέλεση.

Παρατηρούμε ότι οι μετρήσεις δείχνουν μια αισθητή βελτίωση της απόδοσης του συστήματος. Αυτό φαίνεται ιδιαίτερα στο διάγραμμα αστερισμού στη δεύτερη εκτέλεση του μοντέλου, όπου οι αστοχίες είναι πολύ περιορισμένες κατά την αποκωδικοποίηση του εισερχόμενου σήματος.

Κεφάλαιο 8 – IPTV

Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε τα βασικά θέματα που αφορούν την παροχή του τηλεοπτικού σήματος και των σχετικών υπηρεσιών μέσω του διαδικτύου. Περιγράφουμε τα χαρακτηριστικά της παροχής του τηλεοπτικού σήματος μέσω ενός νέου τρόπου μετάδοσης, των δικτύων δεδομένων, αντί της χρήσης των καθιερωμένων τηλεπικοινωνιακών διαύλων (επίγειου, δορυφορικού και καλωδιακού). Εξετάζουμε τα βασικά πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται, καθώς και τους μηχανισμούς που εξασφαλίζουν την κατά το δυνατόν αποδοτική χρήση των υποκείμενων πόρων του δικτύου (κυρίως του διαθέσιμου εύρους ζώνης). Η επάρκεια αυτών των δικτυακών πόρων ήταν μια απαραίτητη προϋπόθεση για την παροχή αυτού του είδους των υπηρεσιών.

Επίσης περιγράφουμε την ενθυλάκωση των δεδομένων, που αποτελούν το τηλεοπτικό σήμα, στα πακέτα του δικτύου και τη χρήση των πρωτοκόλλων που εξασφαλίζουν την απρόσκοπτη συνεργασία των εμπλεκόμενων συσκευών. Τέλος, εξετάζουμε τη βασική λειτουργικότητα των συσκευών που εξασφαλίζουν την αναπαραγωγή του τηλεοπτικού σήματος (επιτραπέζιοι αποκωδικοποιητές – SetTopBox).

Προαπαιτούμενη γνώση

Για την κατανόηση του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι χρήσιμη η κατανόηση των μηχανισμών δημιουργίας πακέτων για τη μετάδοση του περιεχομένου (κυρίως μέσω του μηχανισμού MPEG Transport Stream). Κατά τα άλλα, το παρόν κεφάλαιο δεν έχει εξάρτηση από τα άλλα κεφάλαια του συγγράμματος.

Ενδείκνυται η γνώση της λογικής και της αρχιτεκτονικής του διαδικτύου, όσον αφορά τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται, τον τρόπο μετάδοσης των δεδομένων με χρήση πακέτων, τα θέματα διευθυνσιοδότησης των συσκευών.

8.1 Εισαγωγή

Η τηλεόραση μέσω του διαδικτύου (Internet Protocol Television, IPTV) είναι μία πολυμεσική υπηρεσία, μέσω της οποίας μεταδίδεται το τηλεοπτικό περιεχόμενο συμπεριλαμβανομένων του βίντεο, του ήχου, του κειμένου, των γραφικών και των δεδομένων. Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε τους ρόλους, τη λειτουργικότητα και τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτής της υπηρεσίας.

Το IPTV χαρακτηρίζεται ως αμφίδρομη, αλληλεπιδραστική υπηρεσία, η οποία διατίθεται μέσω του τηλεπικοινωνιακού δικτύου μεταγωγής πακέτου (του Internet). Προσφέρεται μέσω διαχειριζόμενων δικτύων δεδομένων τα οποία παρέχουν ελεγχόμενη ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service), δυνατότητες αλληλεπίδρασης, ασφάλεια και αξιοπιστία.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του IPTV περιλαμβάνουν:

- Υποστήριξη πολλαπλών τηλεοπτικών καναλιών / προγραμμάτων.
- Παροχή τηλεοπτικού περιεχομένου σε πραγματικό χρόνο, ανάλογο με το πρόγραμμα των καναλιών που προσφέρονται.
- Μετάδοση πληροφοριών και προς τις δύο κατευθύνσεις και διαθεσιμότητα κατ' ελάχιστον των επιλογών που έχει στη διάθεσή του ο θεατής, όταν λαμβάνει το τηλεοπτικό σήμα μέσω των τυπικών διαύλων (π.χ. επίγειου, δορυφορικού), όπως η δυνατότητα άμεσης αλλαγής καναλιού και η χρήση ηλεκτρονικού οδηγού προγράμματος (Electronic Program Guide).
- Αξιοποίηση δικτύων νέας γενιάς (Next generation Networks, NGN), τα οποία είναι συνήθως ήδη διαθέσιμα στον χρήστη (χωρίς, δηλαδή, παρεμβάσεις στο δίκτυο πρόσβασης που καταλήγει στον χώρο του χρήστη).
- Δυνατότητα για επιπλέον υπηρεσίες οι οποίες καθορίζονται από τον πάροχο της υπηρεσίας (του IPTV), τα χαρακτηριστικά του υποκείμενου δικτύου, αλλά και τις δυνατότητες του εξοπλισμού που χρησιμοποιεί ο χρήστης.

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι το IPTV μπορεί να λειτουργήσει ως αντικαταστάτης της τυπικής τηλεοπτικής υπηρεσίας (ψηφιακής τηλεόρασης). Πρέπει όμως να επισημανθεί ότι το IPTV είναι διαφορετική υπηρεσία από τη ροή πολυμεσικού περιεχομένου στο διαδίκτυο (Internet streaming). Η δυνατότητα της λήψης ροών δεδομένων (σε αντιπαράθεση με τη λήψη, download, του εκάστοτε πολυμεσικού περιεχομένου) γίνεται ολοένα και πιο διαδεδομένη και αποτελεί πλέον την ατμομηχανή της απαίτησης για αυξημένη κίνηση δεδομένων στο διαδίκτυο. Τέτοιες δυνατότητες παρέχονται από τους πλέον δημοφιλείς ιστότοπους ελεύθερης ή ελεγχόμενης διάθεσης περιεχομένου. Αυτές όμως διαφοροποιούνται από τη διαδικτυακή τηλεόραση.

Συγκεκριμένα, παρόλο που και στους δύο τύπους υπηρεσιών χρησιμοποιούνται σε κάποιο βαθμό κοινά μηχανισμούς και υπάρχουν κοινά χαρακτηριστικά, υπάρχουν και σοβαρές διαφοροποιήσεις. Περιληπτικά θα λέγαμε ότι το IPTV έχει πιο αυστηρές προδιαγραφές και πιο αυστηρές απαιτήσεις από το υποκείμενο δίκτυο.

Ο επόμενος πίνακας συνοψίζει τις βασικές διαφοροποιήσεις μεταξύ αυτών των δύο τύπων υπηρεσιών, του IPTV και του Internet streaming.

Κριτήριο	IPTV	Internet Streaming
Είδος περιεχομένου	Τηλεοπτικό περιεχόμενο, το οποίο παρέχεται από το τηλεοπτικό κανάλι (και είναι το ίδιο με το περιεχόμενο που παρέχεται μέσω των τυπικών τηλεπικοινωνιακών διαύλων επίγειου, δορυφορικού και καλωδιακού).	Ευρεία γκάμα τύπων περιεχομένου χωρίς ιδιαίτερο περιορισμό.
Χρονισμός παροχής περιεχομένου	Σύμφωνα με το πρόγραμμα του τηλεοπτικού καναλιού (δυνατότητα πρόσβασης σε προγενέστερο περιεχόμενο εφόσον επιτρέπεται από τον πάροχο της υπηρεσίας).	Δεν υπάρχει χρονικός περιορισμός στη λήψη του περιεχομένου.
Θέαση και αναπαραγωγή περιεχομένου	Μέσω του τηλεοπτικού δέκτη τυπικά με χρήση επιτραπέζιου αποκωδικοποιητή (STB).	Στον υπολογιστή ή σε κινητή συσκευή (PC, laptop, tablet, κινητό τηλέφωνο).
Τεχνικά χαρακτηριστικά περιεχομένου	Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του περιεχομένου είναι αυστηρά ορισμένα από τον πάροχο της υπηρεσίας. Αυτά αφορούν, για παράδειγμα, την ανάλυση του βίντεο (όπου πρέπει κατ' ελάχιστον να υποστηρίζεται η τυπική ανάλυση, Standard Definition) αλλά ο ρυθμός εναλλαγής των εικόνων. Η υποστήριξη αυτών των χαρακτηριστικών είναι που θέτει τις απαιτήσεις για το υποκείμενο δίκτυο.	Τα χαρακτηριστικά του περιεχομένου που διατίθεται είναι ετερογενή και δεν υπακούουν σε κάποιες ελάχιστες προϋποθέσεις, αφού εξαρτώνται από τις επιλογές του εκάστοτε παρόχου περιεχομένου.
Χαρακτηριστικά υποκείμενου δικτύου	Η δυνατότητα παροχής της υπηρεσίας με αξιόπιστο τρόπο εκ μέρους του υποκείμενου δικτύου αποτελούν προϋποθέσεις του IPTV. Για αυτό και ο ρόλος του παρόχου του δικτύου είναι σημαντικός σε ένα σενάριο παροχής υπηρεσιών IPTV.	Η λήψη της ροής δεδομένων μπορεί να γίνει χωρίς ιδιαίτερη πρόνοια αναφορικά με τα χαρακτηριστικά του υποκείμενου δικτύου (με αποτέλεσμα, βέβαια, να επηρεάζεται η ποιότητα του λαμβανόμενου περιεχομένου).
Οικονομικό αντίτιμο	Στις υπηρεσίες IPTV οι θεατές τυπικά χρεώνονται για τη λήψη τους (συνήθως σε περιοδική, π.χ. μηνιαία ή εξαμηνιαία βάση).	Η λήψη ροών περιεχομένου στο διαδίκτυο είναι συνήθως δωρεάν (χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν υπάρχει περιεχόμενο και επί πληρωμή).

Πίνακας 8.1 Σύγκριση χαρακτηριστικών IPTV και Internet streaming.



[Παρατίθεται ένα εκπαιδευτικό βίντεο για τα τεχνικά θέματα της διαδικτυακής τηλεόρασης.](#)

Αξίζει να αναφερθεί ότι με την εισαγωγή του IPTV οι πάροχοι περιεχομένου και υπηρεσιών είναι πλέον σε θέση να εκμεταλλευτούν με καλύτερο τρόπο το διαδίκτυο. Η αρχιτεκτονική του IPTV επιτρέπει τη διασύνδεση και τη διαλειτουργικότητα βασικών οντοτήτων στην αλυσίδα της παροχής υπηρεσιών. Με τον τρόπο αυτό διασυνδέεται το σημείο από όπου εκκινεί το περιεχόμενο (το οποίο συνήθως ονομάζεται *headend*), οι εξυπηρετητές που καθορίζουν τη ροή της πληροφορίας μέχρι τον οικιακό εξοπλισμό, τον ρόλο του οποίου παίζει συνήθως ένας επιτραπέζιος αποκωδικοποιητής – επισύσκευο (Set Top Box, STB).

8.2 Ρόλοι και Λειτουργικότητα

Στην ενότητα αυτή θα εξετάσουμε τους βασικούς ρόλους και τις λειτουργίες τις οποίες περιλαμβάνουν στα τυπικά σενάρια της διαδικτυακής τηλεόρασης. Θα παρατηρήσουμε ότι οι ρόλοι που εμπλέκονται στη διαδικτυακή τηλεόραση είναι πιο σύνθετοι από αυτούς της παραδοσιακής τηλεοπτικής μετάδοσης. Ένα τυπικό σενάριο εμπλέκει τον πάροχο του τηλεοπτικού περιεχομένου, τον πάροχο της τηλεοπτικής υπηρεσίας (τηλεοπτικά κανάλια) και βέβαια τον χρήστη των υπηρεσιών (δηλαδή τον τηλεθεατή) (53).

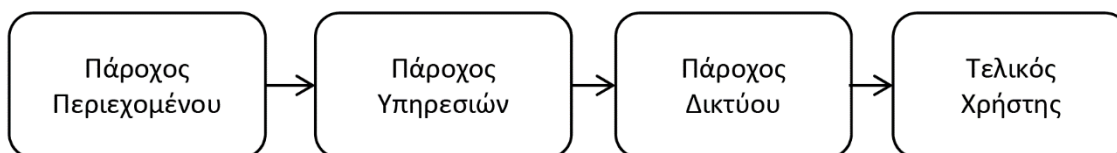
8.2.1 Ρόλοι

Η τηλεόραση μέσω διαδικτύου εμπλέκει μια σειρά από ρόλους, οι πλέον βασικοί από τους οποίους είναι οι εξής:

- Ο πάροχος του περιεχομένου (content provider), ο οποίος έχει στην ιδιοκτησία του το περιεχόμενο το οποίο και παρέχει με τρόπους που επιλέγει αυτός (όπως η ροή δεδομένων ή αποθηκευμένο σε κάποιο μέσο αποθήκευσης).
- Ο πάροχος της υπηρεσίας (service provider), ο οποίος είναι υπεύθυνος για την παροχή της συνολικής λειτουργικότητας και τη διανομή του περιεχομένου προς τους χρήστες.
- Ο πάροχος του δικτύου (network provider), ο οποίος παρέχει τους απαραίτητους πόρους του δικτύου και τους κατάλληλους μηχανισμούς για να γίνει η μετάδοση του περιεχομένου στους χρήστες με κάποιες εγγυήσεις όσον αφορά την ποιότητα υπηρεσίας.
- Ο χρήστης – πελάτης (customer), ο οποίος λαμβάνει την υπηρεσία, επιλέγει και καταναλώνει το περιεχόμενο και καταβάλλει βέβαια και το οικονομικό τίμημα που αφορά την υπηρεσία.

Το τηλεοπτικό κανάλι, το οποίο διαδραματίζει και τον πλέον βασικό ρόλο στην παραδοσιακή παροχή τηλεοπτικών υπηρεσιών, εδώ δύναται να παίζει τον ρόλο του παρόχου της υπηρεσίας αλλά και του παρόχου του περιεχομένου.

Οι βασικοί ρόλοι απεικονίζονται στο επόμενο σχήμα. Παρατηρούμε ότι οι διεπαφές μεταξύ αυτών των ρόλων και οι αλληλουχίες οι οποίες δημιουργούνται είναι συγκεκριμένες. Για παράδειγμα, ο πάροχος του περιεχομένου διαθέτει το περιεχόμενο στον πάροχο των υπηρεσιών. Αυτός με τη σειρά του θα συνθέσει τις τηλεοπτικές υπηρεσίες με χρήση (και) αυτού του περιεχομένου. Στη συνέχεια ο πάροχος των τηλεοπτικών υπηρεσιών θα έλθει σε επαφή με τον πάροχο του δικτύου ο οποίος και επιτρέπει τη διασύνδεση με τον τελικό χρήστη.



Εικόνα 8.1 Τυπικοί ρόλοι σε σενάριο IPTV.

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε τις λειτουργίες που καλείται να επιτελέσει κάθε ένας από τους προηγούμενους ρόλους σε ένα τυπικό σενάριο διαδικτυακής τηλεόρασης.

8.2.2 Λειτουργικότητα

Ο πάροχος του περιεχομένου είναι στην ουσία ο ιδιοκτήτης του περιεχομένου και διαθέτει αυτό το περιεχόμενο στον πάροχο της υπηρεσίας, με συγκεκριμένους κάθε φορά όρους. Η συνεργασία μεταξύ του παρόχου του περιεχομένου και του παρόχου των υπηρεσιών καθορίζει το τίμημα για την παραχώρηση του ψηφιακού περιεχομένου, τα πνευματικά δικαιώματα που εμπλέκονται και τους τρόπους χρήσης αυτού του περιεχομένου. Οι λεπτομέρειες αυτής της συνεργίας ξεφεύγουν από τους στόχους του συγγράμματος.

Ο πάροχος της υπηρεσίας συνθέτει το ψηφιακό περιεχόμενο σε μία ενιαία τηλεοπτική υπηρεσία, διαχειρίζεται (στο πλαίσιο της συμφωνίας με τον πάροχο του περιεχομένου) τα πνευματικά δικαιώματα (Digital Right Management, DRM). Διαχειρίζεται επίσης τη σχέση με τους πελάτες – χρήστες της υπηρεσίας (Customer Relationship Management, CRM). Η σχέση αυτή περιλαμβάνει την εξασφάλιση ενός υψηλού επιπέδου ποιότητας της υπηρεσίας που παρέχεται, τα θέματα της υποστήριξης αλλά και τη χρέωση των πελατών (billing). Από την πλευρά της ασφάλειας υπάρχουν, επίσης, θέματα πιστοποίησης και ταυτοποίησης του παρόχου, αλλά και των χρηστών. Αυτά αντιμετωπίζονται μέσω της πιστοποίησης της συσκευής (τερματικού εξοπλισμού) που χρησιμοποιείται από τον χρήστη.

Στο κεφάλαιο αυτό θα προσπαθήσουμε να εξετάσουμε κυρίως τα τεχνικά ζητήματα που εμπλέκονται. Από τεχνικής άποψη ο πάροχος της υπηρεσίας διαχειρίζεται τη διανομή του περιεχομένου στους χρήστες (ως

ροές) και την παροχή της απαραίτητης λειτουργικότητας προς τους χρήστες συμπεριλαμβανομένης και της αλληλεπίδρασης με τον χρήστη (Interaction). Εδώ έγκειται μια σημαντική διαφορά με τη μετάδοση του τηλεοπτικού σήματος: Η τηλεόραση (όπως αυτή παρέχεται μέσω του τηλεοπτικού διαύλου) είναι παθητική, ενώ το IPTV έχει δυνατότητα αλληλεπίδρασης. Αυτό επιτρέπει την ανάπτυξη νέων επιχειρηματικών μοντέλων (τα οποία όμως ξεφεύγουν από τους στόχους του παρόντος συγγράμματος).

Ο πάροχος του δικτύου είναι υπεύθυνος για τα επιμέρους δίκτυα, συγκεκριμένα το δίκτυο πρόσβασης και το δίκτυο κορμού. Είναι επίσης υπεύθυνος για τη διασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας, όσον αφορά την μετάδοση του περιεχομένου από τον πάροχο της υπηρεσίας στον τελικό χρήστη (τηλεθεατή). Η διασφάλιση της ποιότητας της υπηρεσίας εμπλέκει σημαντικά δικτυακά χαρακτηριστικά όπως η καθυστέρηση, η διακύμανση της καθυστέρησης (jitter), η απώλεια των πακέτων και εν γένει τα σφάλματα που τυχόν παρουσιάζονται κατά την μετάδοση.

Ο χρήστης της υπηρεσίας είναι ο τηλεθεατής, ο οποίος έχει πρόσβαση στο τηλεοπτικό περιεχόμενο. Συνήθως έχει στην κατοχή του έναν επιτραπέζιο αποκωδικοποιητή (Set Top Box) ο οποίος αποκωδικοποιεί το περιεχόμενο.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται συνοπτικά οι λειτουργίες που αντιστοιχούν στους διάφορους ρόλους που εμπλέκονται στην παροχή της υπηρεσίας.

Τελικός Χρήστης	• Τηλεοπτικός δέκτης • Επιτραπέζιος αποκωδικοποιητής (STB)
Πάροχος Υπηρεσίας	• Διαχείριση ροών • Διαχείριση δικαιωμάτων • Αναγνώριση χρηστών • Χρέωση
Πάροχος Δικτύου	• Διαχείριση δικτύου πρόσβασης • Διαχείριση δικτύου κορμού • Διαχείριση ποιότητας υπηρεσίας (QoS) • Παρακολούθηση κι έλεγχος πόρων
Πάροχος Περιεχομένου	• Δημιουργία και παροχή περιεχομένου • Διαχείριση πνευματικών δικαιωμάτων

Εικόνα 8.2 Βασικές λειτουργίες ανά ρόλο.

Στην επόμενη ενότητα θα εξετάσουμε δικτυακά θέματα τα οποία εμπλέκουν την τοπολογία του δικτύου και τους τρόπους εκπομπής.

8.3 Τοπολογίες Δικτύου και Τρόποι Εκπομπής

Το IPTV περιλαμβάνει τη μετάδοση ψηφιακών ροών βίντεο και ήχου σε συνδυασμό με τη διαχείριση των εντολών του χρήστη αναφορικά με την επιλογή του περιεχομένου και την αλληλεπίδραση με την υπηρεσία της διαδικτυακής τηλεόρασης. Επιπλέον, η μετάδοση αυτών των ροών συνδυάζεται με υψηλό επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας δικτύου, αναφορικά με χαμηλή καθυστέρηση και χαμηλές απώλειες δεδομένων κατά την επικοινωνία.

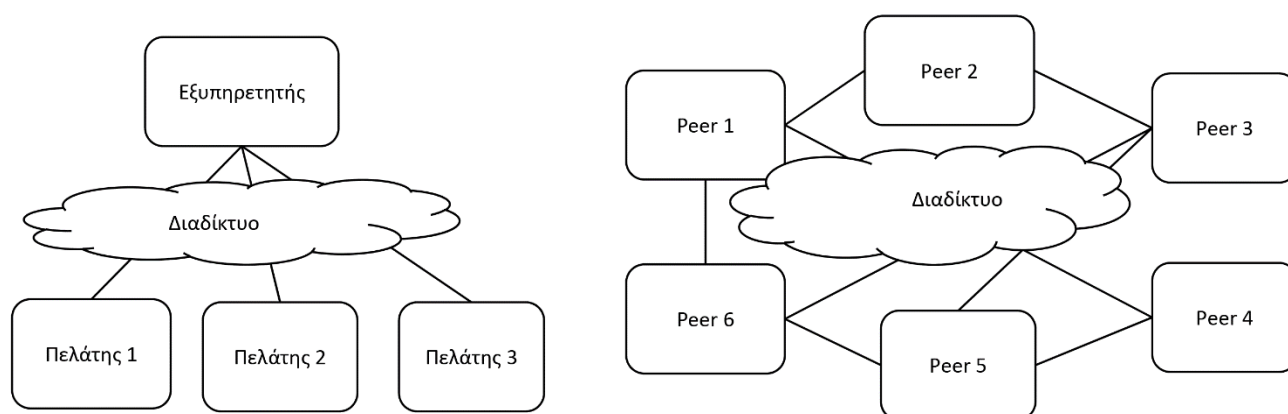
Η μετάδοση των ροών στηρίζεται στο πρωτόκολλο του διαδικτύου (Internet Protocol, IP). Η χρήση του IP επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ συσκευών οι οποίες έχουν διαφορετικά λογισμικό και υλικό, λειτουργικά συστήματα, διασυνδέσεις (54).

8.3.1 Βασικές Αρχιτεκτονικές

Το πρωτόκολλο του διαδικτύου (IP) αποτελεί τη βάση για τις επικοινωνίες του διαδικτύου και υποστηρίζει κατά βάση δύο είδη συνδέσεων - αρχιτεκτονικών:

- Την τοπολογία πελάτη – εξυπηρετητή (client- server), η οποία είναι και η πιο συνηθισμένη και στηρίζεται στη ζήτηση εκ μέρους ενός πελάτη (client) κάποιου περιεχομένου (είτε ως αυτόνομο αρχείο είτε ως ροή) από έναν εξυπηρετητή (server). Ο εξυπηρετητής είναι σε θέση να εξυπηρετήσει (να προσφέρει, δηλαδή, περιεχόμενο) σε πολλαπλούς πελάτες ταυτόχρονα (δημιουργώντας πολλαπλές, παράλληλες διμερείς συνδέσεις). Οι ρόλοι του πελάτη και του εξυπηρετητή είναι εν γένει σταθεροί και δεν εναλλάσσονται.
- Την τοπολογία ομότιμων οντοτήτων (peer to peer), όπου το περιεχόμενο ανταλλάσσεται μεταξύ των συμμετεχουσών οντοτήτων οι οποίες μπορεί να εναλλάσσουν τους ρόλους του πελάτη και του εξυπηρετητή (να λειτουργούν δηλαδή σε μία σύνδεση ως πελάτες και σε μία άλλη ως εξυπηρετητές – λαμβάνοντας ή προσφέροντας περιεχόμενο αντίστοιχα).

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται δύο απλά παραδείγματα που αποτυπώνουν αυτές τις τοπολογίες (55). Στο αριστερό μέρος αποτυπώνεται η τοπολογία πελάτη εξυπηρετητή (όπου ένας εξυπηρετητής εξυπηρετεί τρεις πελάτες) και στο δεξί μέρος μια τοπολογία ομότιμων οντοτήτων (peer) αποτελούμενη από 6 ομότιμες οντότητες (peers) καθεμία εκ των οποίων μπορεί να παίζει τον ρόλο του πελάτη ή του εξυπηρετητή σε διαφορετικές συνδέσεις.



Εικόνα 8.3 Τοπολογίες πελάτη εξυπηρετητή και ομότιμων οντοτήτων.

Το μοντέλο των ομότιμων οντοτήτων είναι υπό μία έννοια πιο χαλαρό, αφού δεν υπάρχει κάποια εξασφάλιση για την ίδια την ύπαρξη (ενεργή κατάσταση και συμμετοχή) των οντοτήτων αυτών, πόσο μάλλον για την απρόσκοπτη παροχή περιεχομένου από αυτές. Παρ' όλα αυτά, το μοντέλο των ομότιμων οντοτήτων μπορεί να έχει πολλαπλασιαστικά οφέλη σε σενάρια λήψης περιεχομένου (συνήθως όμως όχι σε πραγματικό χρόνο).

Στην περίπτωση του IPTV η τοπολογία που τυπικά χρησιμοποιείται είναι αυτή του πελάτη – εξυπηρετητή, αφού οι ρόλοι που έχουν οι συμμετέχουσες οντότητες είναι πολύ συγκεκριμένες (πάροχος και λήπτης τηλεοπτικού περιεχομένου).

8.3.2 Τρόποι Εκπομπής

Το πρωτόκολλο IP είναι ένα πρωτόκολλο το οποίο κατά βάση υποστηρίζει την μονοεκπομπή (unicast). Δηλαδή την αποστολή δεδομένων από τον εξυπηρετητή προς έναν πελάτη. Αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα

απευθύνονται μόνο στον εκάστοτε παραλήπτη. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η πλοήγηση σε σελίδες του διαδικτύου, όπου ο κάθε πελάτης ζητάει τη συγκεκριμένη σελίδα που τον ενδιαφέρει από τον εξυπηρετητή.

Στην περίπτωση όμως συνδέσεων οι οποίες εμπλέκουν ροές με μεγάλες ταχύτητες (π.χ. συνδέσεις πολυμέσων) ένα τέτοιο μοντέλο αποστολής και λήψης δεδομένων επιβαρύνει αρκετά τις απαιτήσεις σε χωρητικότητα από το δίκτυο. Μια τέτοια προσέγγιση (μονοεκπομπής) θα είχε κάποια οφέλη για τον λήπτη αναφορικά με την εξατομικευμένη διαχείριση της ροής. Στην περίπτωση του IPTV, όπου το πλήθος των δεκτών είναι αυξημένο, η επιβάρυνση του δικτύου καθιστά τη μονοεκπομπή απαγορευτική.

Υπάρχει επιπλέον ένα βασικό χαρακτηριστικό του IPTV (της διαδικτυακής τηλεόρασης) το οποίο επηρεάζει την κατάσταση: Η εκμετάλλευση του γεγονότος ότι πολλαπλοί δέκτες λαμβάνουν το ίδιο περιεχόμενο ταυτόχρονα. Σε αυτήν την περίπτωση το μοντέλο της μονοεκπομπής προκαλεί μεγάλη κατανάλωση των πόρων του δικτύου. Αυτό συμβαίνει αφού για κάθε ροή δημιουργείται ξεχωριστή σύνδεση και δεσμεύονται διαφορετικοί πόροι. Για αυτόν τον λόγο είναι ανάγκη να στραφούμε σε άλλους τρόπους ανταλλαγής δεδομένων. Οι βασικοί τρόποι μετάδοσης περιλαμβάνουν τους επόμενους:

- Μονοεκπομπή (unicast): σύνδεση ένας προς έναν.
- Ευρυεκπομπή (broadcast): σύνδεση ενός προς όλους.
- Πολυεκπομπή (multicast): σύνδεση ενός προς πολλούς.

Στο μοντέλο της ευρυεκπομπής ο πομπός αποστέλλει προς όλες τις οντότητες που είναι συνδεδεμένες. Κάτι τέτοιο δεν είναι χρήσιμο για το IPTV αφού οι χρήστες είναι συγκεκριμένοι και στην πλειοψηφία των περιπτώσεων ελέγχεται το κατά πόσο επιτρέπεται η σύνδεσή τους.

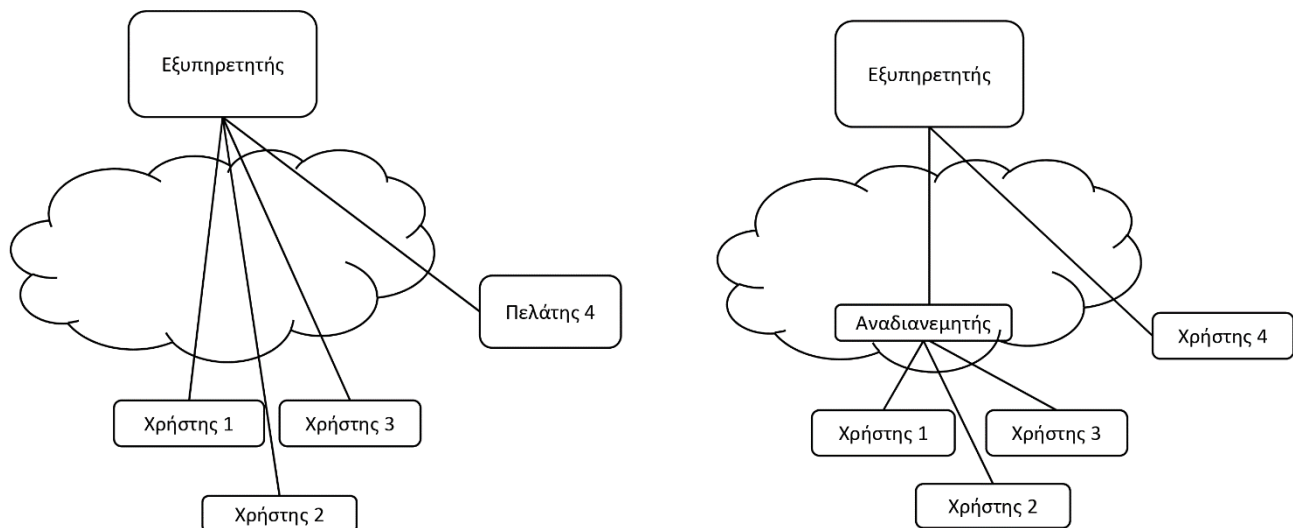
Η πολυεκπομπή, από την άλλη, επιτρέπει την αποστολή δεδομένων σε ένα συγκεκριμένο σύνολο παραληπτών (56). Η αποστολή δεδομένων γίνεται μία φορά προς όλους τους πελάτες και δεν δημιουργείται διαφορετική σύνδεση προς κάθε πελάτη. Χαρακτηριστικό της πολυεκπομπής είναι τα δένδρα πολυεκπομπής που σχηματίζονται και επιτρέπουν την ένωση διαδρομών προς όλους τους παραλήπτες. Οι διαδρομές δεν είναι απαραίτητα βέλτιστες, αλλά επιτυγχάνεται ελαχιστοποίηση κατανάλωσης των πόρων, καθώς και ελαχιστοποίηση μεταδόσεων πακέτων. *Το μοντέλο της πολυεκπομπής είναι που χρησιμοποιείται στην περίπτωση του IPTV.*

Η πολυεκπομπή επιφέρει εξοικονόμηση των πόρων του δικτύου, ωστόσο, δεν επιτρέπει μια σειρά λειτουργιών εκ μέρους του χρήστη, οι οποίες είναι δυνατές στην περίπτωση της μονοεκπομπής. Αυτές περιλαμβάνουν την παύση του περιεχομένου, αλλά και τη μετάβαση σε οποιοδήποτε σημείο επιθυμεί ο χρήστης.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται ένα δίκτυο ευρείας ζώνης στο οποίο τρεις κατοικίες αναπαράγουν το ίδιο περιεχόμενο. Σε κάθε μια από αυτές δημιουργείται μια ξεχωριστή σύνδεση μεταξύ της οικιακής συσκευής και του VOD server. Αυτές οι τρεις ξεχωριστές ροές δεδομένων (bitstreams) έχουν φορά από τον εξυπηρετητή και καθεμία από αυτές συνδυάζεται με μια ροή (τρεις συνολικά) για τις εντολές που δίνει ο χρήστης αναφορικά με τη θέαση (μετάβαση σε συγκεκριμένο σημείο, γρήγορα μπροστά / πίσω).

Το σενάριο της πολυεκπομπής καλύπτει την αποστολή του περιεχομένου σε πολλαπλούς χρήστες με περιορισμένες δυνατότητες όσον αφορά το κανάλι αλληλεπίδρασης με τον χρήστη (περιορίζεται στην επιλογή καναλιών). Κάθε κανάλι έχει ένα δικό του IP multicast group. Με τη χρήση του πρωτοκόλλου διαχείρισης ομάδων στο διαδίκτυο (Internet Group Management Protocol, IGMP) οι χρήστες μπορούν να λάβουν τα πακέτα broadcast και να καθοδηγήσουν το broadcast stream στο δίκτυό τους. Το IGMP επιτρέπει σε μια συσκευή (host) να γίνει μέλος σε (join) ή να φύγει από μία ομάδα (multicastgroup) με τις κατάλληλες απαντήσεις σε ερωτήματα που αποστέλλει ένας multicastcapablerouter.

Η τεχνική της πολυεκπομπής επιτρέπει σε έναν πάροχο της υπηρεσίας να προσθέτει τη δυνατότητα της ευρυεκπομπής σε ένα δίκτυο, επιτρέποντας την εξοικονόμηση μεγάλου ποσοστού από το εύρος ζώνης σε σχέση με τα σενάρια της μονοεκπομπής.



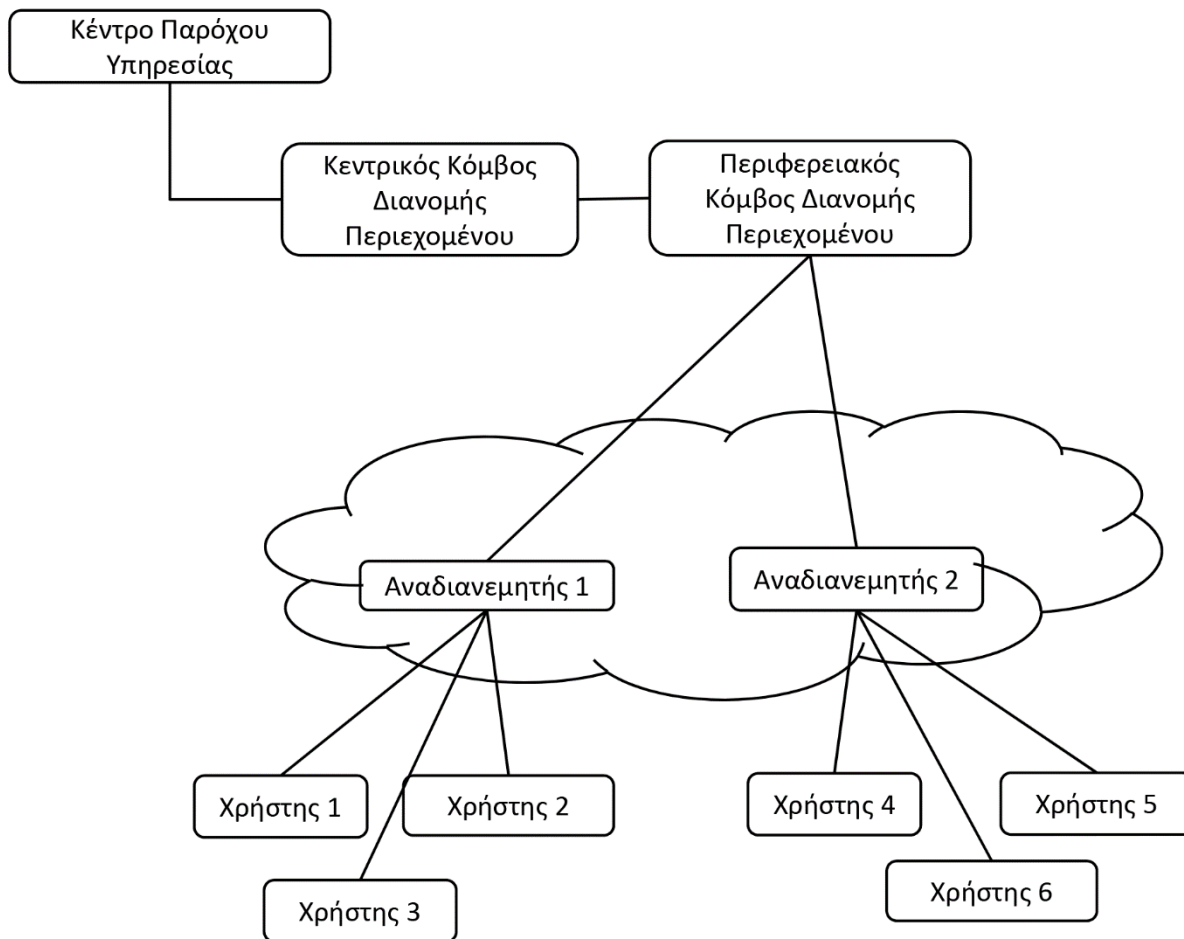
Εικόνα 8.4 Σενάρια μονοεκπομπής και πολυεκπομπής.

Στο προηγούμενο παράδειγμα οι τρεις χρήστες (κατοικίες) συμμετέχουν σε μια σύνοδο πολυεκπομπής (multicast session). Κάθε ένα από τα σημεία αυτά δέχεται την ίδια ροή δεδομένων η οποία προέρχεται από τον εξυπηρετητή.

Αυτό σημαίνει ότι η πολυεκπομπή είναι ένα από τα εργαλεία που πρέπει να έχει στη διάθεσή του ο IPTV network operator, αφού:

- Εξοικονομεί εύρος ζώνης του δικτύου.
- Μειώνει τη συμφόρηση του δικτύου (προκαλεί, δηλαδή, μικρότερο αριθμό σφαλμάτων στους δρομολογητές).
- Μειώνει το φορτίο στους εξυπηρετητές, αφού ένας μόνο εξυπηρετητής είναι απαραίτητος για την εξυπηρέτηση μεγάλο αριθμό χρηστών.

Μια πιο ρεαλιστική τοπολογία βασίζεται στην έννοια του δένδρου (είναι δηλαδή δενδροειδής) και απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 8.5 Μοντέλο διανομής περιεχομένου.

Το σχήμα αποτυπώνει ένα απλουστευμένο διάγραμμα του IPTV συστήματος και περιλαμβάνει τις βασικές βαθμίδες από τις οποίες διέρχεται το σήμα βίντεο και ήχου μέχρι τον τελικό χρήστη. Επισημαίνουμε ότι η διασύνδεση των λειτουργικών οντοτήτων του παρόχου της υπηρεσίας είναι δενδροειδής.

8.3.2.1 Διευθυνσιοδότηση

Το πρωτόκολλο στο οποίο βασίζεται η πολυεκπομπή είναι, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το Πρωτόκολλο Διαχείρισης Ομάδων στο Διαδίκτυο (Internet Group Management Protocol, IGMP). Το IP ορίζει διευθύνσεις πολυεκπομπής (multicast addresses), διευθύνσεις, δηλαδή, οι οποίες αντιπροσωπεύουν περισσότερες από μία συσκευές. Το πρωτόκολλο IGMP χρησιμοποιείται μεταξύ άλλων για τον ορισμό των συσκευών που συμμετέχουν στην ομάδα πολυεκπομπής (multicast group).

Πιο συγκεκριμένα, κάθε συσκευή (οντότητα) που συμμετέχει σε συνδέσεις διαδικτύου (IP) έχει μία διεύθυνση IP. Η διεύθυνση IP (Internet Protocol address) αποτελείται από 4 Bytes στην έκδοση του πρωτοκόλλου IPv4. Στην επόμενη έκδοση (IP version 6) χρησιμοποιούνται 16 Bytes για τη διευθυνσιοδότηση των συσκευών. Η έκδοση που χρησιμοποιείται κατά κόρον είναι η αρχική έκδοση (IPv4) του πρωτοκόλλου, αφού η χρήση του IPv6 απαιτεί αλλαγές στο λογισμικό και κυρίως το υλικό των στοιχείων που συνθέτουν το δίκτυο (κυρίως δρομολογητές – routers). Τέτοιες αλλαγές δεν έχουν πραγματοποιηθεί ακόμη στο σύνολο του εξοπλισμού και για αυτόν τον λόγο το IPv6 δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ολόκληρο το διαδίκτυο.

Για την περίπτωση του IPv4 οι διευθύνσεις που χρησιμοποιούνται για την πολυεκπομπή (IP multicast) εκτείνονται στο εξής διάστημα:

224.0.0.0 έως και 239.255.255.255

(1)

Το διάστημα αυτό, οι διευθύνσεις δηλαδή που ξεκινούν με το πρόθεμα «1 1 1 0», αντιστοιχεί στην κλάση D (class D), . Αυτό σημαίνει, δηλαδή, ότι τα πρώτα 4 bits του αρχικού Byte της διεύθυνσης έχουν την προαναφερθείσα τιμή «1 1 1 0», τα bits που συνθέτουν τα υπόλοιπα Bytes της διεύθυνσης μπορούν να έχουν οποιαδήποτε τιμή και με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται το σχετικό εύρος τιμών.

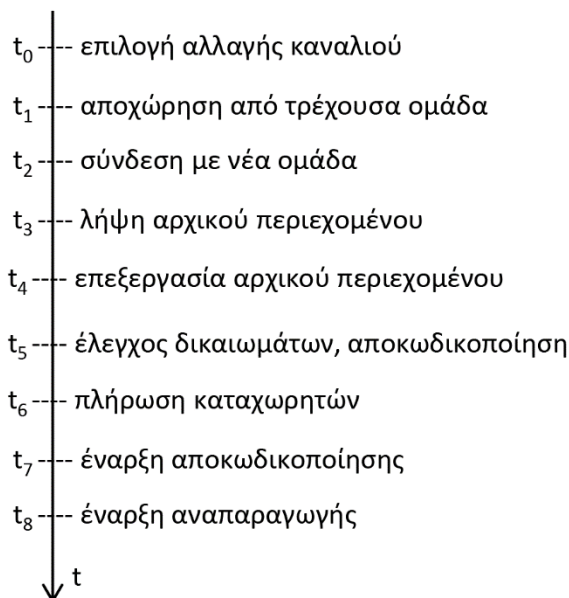
Απαραίτητη προϋπόθεση ώστε το IGMP να μπορεί να προκαλέσει αυτήν την εξοικονόμηση πόρων είναι να υποστηρίζεται από τους δρομολογητές στις ενδιάμεσες διαδρομές. Οι ενδιάμεσοι δρομολογητές είναι υπεύθυνοι να λαμβάνουν τις αιτήσεις των χρηστών να συνδεθούν ή να αποσυνδεθούν με τις ομάδες πολυεκπομπής. Η πολυεκπομπή μπορεί να εφαρμοστεί σε ιδιωτικά δίκτυα όπου μπορεί ο διαχειριστής να εξασφαλίσει ότι όλοι οι συμμετέχοντες δρομολογητές υποστηρίζουν το συγκεκριμένο πρωτόκολλο.

8.3.2.2 Αλλαγή Ομάδας Πολυεκπομπής

Μια βασική απαίτηση για την απρόσκοπτη παροχή υπηρεσίας τηλεόρασης είναι η ταχεία και επαναλαμβανόμενη (κυκλική από κανάλι σε κανάλι) αλλαγή καναλιού. Σε αυτήν την περίπτωση ο χρήστης αναμένει να δει το βίντεο του νέου καναλιού σε χρονικό διάστημα περίπου ενός δευτερολέπτου. Σε αντίθετη περίπτωση θεωρείται ότι έχουμε υποβιβασμό της ποιότητας σε σχέση με την τυπική περίπτωση της λήψης τηλεοπτικού σήματος από τα συμβατικά κανάλια.

Η συγκεκριμένη λειτουργία δημιουργεί σοβαρές προκλήσεις δεδομένου ότι η λειτουργία της βασίζεται σε ένα περίπλοκο ψηφιακό δίκτυο μεταγωγής και στη στοίβα πρωτοκόλλων του IP. Η αλλαγή καναλιού τεχνικά μεταφράζεται, όσον αφορά το IGMP, στην αλλαγή της ομάδας (group) στην οποία ανήκει ο χρήστης, από την οποία δηλαδή λαμβάνει περιεχόμενο.

Όταν πραγματοποιείται μια αλλαγή καναλιού, το σύστημα του χρήστη πρέπει να αποστέλλει αυτήν την πληροφορία μέσω του διαδικτύου ώστε να γίνει η αλλαγή στη δρομολόγηση των δεδομένων βίντεο και ήχου. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η τυπική ακολουθία ενεργειών η οποία αντιστοιχεί στη αλλαγή καναλιού σε ένα σενάριο όπου χρησιμοποιείται το IGMP. Στο αριστερό μέρος επισημαίνονται οι χρονικές στιγμές, ενώ δεξιά οι ενέργειες που πραγματοποιούνται.



Εικόνα 8.6 Ενέργειες που πραγματοποιούνται κατά την αλλαγή καναλιού.

Η διαδικασία της αλλαγής καναλιού, άρα και ομάδας στην οποία εντάσσεται ο χρήστης, αποτελείται από τα εξής βήματα:

- t_0 . Η χρονική στιγμή t_0 είναι η χρονική στιγμή κατά την οποία ο χρήστης πατάει το σχετικό κουμπί στο τηλεχειριστήριο και ενεργοποιείται η αλλαγή καναλιού.
- t_1 . Η συσκευή του χρήστη ενημερώνει το δίκτυο και τον εξυπηρετητή IPTV να σταματήσει να αποστέλλει την τρέχουσα ροή (βίντεο και ήχου). Αυτό γίνεται με την αποστολή μηνύματος

(IGMP) *leave request*. Εάν δεν γίνει αυτό το βήμα και απλώς ο χρήστης ζητήσει μια επιπλέον ροή, η τρέχουσα δεν θα σταματήσει, δηλαδή το σύστημα του χρήστη ζητά ολοένα και περισσότερες ροές, με αποτέλεσμα να αυξηθεί ο ρυθμός εισερχόμενων ροών και να μην μπορεί να γίνει διαχείριση αυτών.

- ο Το βήμα της ενημέρωσης απαιτεί περίπου 150 milli seconds (ms). Κάποιοι routers μπορούν να διαχειριστούν απευθείας αυτήν την εντολή, γεγονός το οποίο μειώνει πολύ το απαιτούμενο διάστημα. Υπάρχουν όμως και δρομολογητές χωρίς αυτήν τη λειτουργικότητα, οπότε μπορούμε με ασφάλεια να θεωρήσουμε ότι το απαιτούμενο χρονικό διάστημα προσεγγίζει αυτήν την τιμή.
- t₂. Μόλις ο χρήστης σταματήσει τη λήψη της ροής πολυεκπομπής (multicaststream), τότε θα μπορεί να εισέλθει σε μια νέα σύνοδο πολυεκπομπής (ώστε να αρχίσει να λαμβάνει μια νέα ροή). Για να γίνει αυτό πρέπει να αποσταλεί ένα μήνυμα τύπου (IGMP) *join request*.
 - ο Το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την ενέργεια αυτή είναι σχετικά μικρό. Εν γένει, όσο μικρότερα σε πλήθος τα βήματα που χρειάζεται να κάνει το αίτημα IGMP εντός του δικτύου, μέχρι δηλαδή να φτάσει στον εξυπηρετητή IPTV, τόσο μικρότερος ο χρόνος αναμονής.
- t₃. Το χρονικό διάστημα μέχρι τη χρονική στιγμή t₃ απαιτείται για να καταφθάσει και να εισέλθει το περιεχόμενο στο σύστημα του χρήστη. Μια τυπική τιμή του χρονικού αυτού διαστήματος είναι τα 50 ms.
- Σε ένα σύστημα τηλεπικοινωνιών, εάν ο εξοπλισμός πρόσβασης, δηλαδή, πρακτικά το DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer) έχει διαθέσιμες (σε λειτουργία) ροές πολυεκπομπής (multicast data) αρκεί να δρομολογήσει τα δεδομένα και προς αυτόν τον προορισμό. Διαφορετικά το DSLAM πρέπει να ζητήσει αυτά τα δεδομένα από ανώτερο δρομολογητή (η οποία έχει στη διάθεσή της τα ζητούμενα δεδομένα και θα τα διαθέσει στον τοπικό δρομολογητή ώστε να φτάσουν στον δέκτη).
- t₄. Ο χρήστης λαμβάνει δεδομένα μέσω του δικτύου. Η συσκευή του χρήστη επεξεργάζεται την εισερχόμενη πληροφορία και εξάγει τα απαραίτητα δεδομένα, όπως η πληροφορία που αφορά το κανάλι, οι περιγραφές του περιεχομένου. Αυτές οι πληροφορίες θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια κατά την αποκωδικοποίηση.
- t₅. Στην περίπτωση που το σύστημα υλοποιεί έναν μηχανισμό ελεγχόμενης πρόσβασης (Conditional Access, CA ή Digital Rights Management, DRM), ο χρήστης χρειάζεται να προσπελάσει τα απαραίτητα κλειδιά αποκωδικοποίησης είτε μέσω του ίδιου του καναλιού ή από μηχανισμό εκτός καναλιού. Με χρήση των κλειδιών αυτών, το περιεχόμενο που λαμβάνεται αποκρυπτογραφείται ώστε να μπορεί να γίνει η επεξεργασία αυτού.
 - ο Το βήμα αυτό απαιτείται μόνο αν το νέο περιεχόμενο προστατεύεται με μηχανισμό διαφορετικό από τον μηχανισμό που αντιστοιχούσε στο περιεχόμενο του προηγούμενου καναλιού.
- t₆. Στο βήμα αυτό πραγματοποιείται η εισαγωγή περιεχομένου στη μνήμη του δέκτη με τα δεδομένα βίντεο και ήχου για την αντιμετώπιση της μεταβλητότητας στην καθυστέρηση (η μεταβλητότητα αυτή αναφέρεται ως jitter). Επειδή τα δεδομένα αυτά μεταδίδονται από ένα δίκτυο IP, καταφθάνουν στη συσκευή του χρήστη κατά ριπάς. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου χρησιμοποιείται ο καταχωρητής. Το μέγεθος του καταχωρητή εξαρτάται από τις απαιτήσεις του συστήματος, δεν είναι δηλαδή σταθερό. Ενδεικτικό παράδειγμα είναι η χρήση καταχωρητή ο οποίος αντιστοιχεί σε διάρκεια βίντεο 300 ms.
- t₇. Υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που επηρεάζονται χρονικό διάστημα μέχρι την έναρξη της αποκωδικοποίησης. Σε αυτούς ανήκει το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την προσπέλαση ενός πλαισίου τύπου I (MPEG Intra frame, I-frame). Ως γνωστόν το I-frame είναι αυτό που περιέχει το σύνολο της πληροφορίας που απαιτείται για την αποκωδικοποίησή του, χωρίς δηλαδή να εξαρτάται από προηγούμενα ή επόμενα πλαίσια. Η απόσταση (το πλήθος, δηλαδή, των πλαισίων που μεσολαβούν μέχρι την προσπέλαση ενός τέτοιου πλαισίου εξαρτάται από την ίδια την κωδικοποίηση. Ένα τυπικό χρονικό διάστημα για την προσέλευση αυτού του είδους του πλαισίου είναι τα 500 ms, οπότε, ανάλογα με τη χρονική στιγμή που ξεκινάει η αποθήκευση δεδομένων στον καταχωρητή, το χρονικό διάστημα αναμονής μπορεί να είναι από 0 έως 500 ms, με μέσο όρο το ήμισυ δηλαδή περί τα 250 ms (το οποίο είναι εν γένει ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα). Παρόλο, λοιπόν, που τα I-frames μπορεί να περιέχουν ακόμη και πέντε φορές τον

όγκο της πληροφορίας σε σχέση με τα υπόλοιπα frames η πυκνότητά τους μπορεί να μειώσει δραστικά το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την αλλαγή καναλιού.

- t_8 . Το χρονικό διάστημα που απαιτείται για έναν χρήστη ώστε να αποκωδικοποιήσει ένα I-frame είναι πολύ μικρό. Οπότε το μεγάλο ποσοστό αυτού του χρονικού διαστήματος αφιερώνεται στη διαχείριση της εικόνας με βάση τους κανόνες της διαπλεγμένης σάρωσης και της κατακόρυφης αμαύρωσης.

Συνολικά το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την αλλαγή του καναλιού υπό κανονικές συνθήκες και σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση είναι περί το 1 second. Βέβαια, το χρονικό αυτό διάστημα εξαρτάται από διάφορες παράγοντες αλλά η τιμή αυτή είναι η τυπική που αναμένεται από το IP STB.

8.4 Στοιίβα Πρωτοκόλλων και Ενθυλάκωση Δεδομένων

Η μετάδοση του ψηφιακού βίντεο και ήχου σε δίκτυα IP δημιουργεί νέες προκλήσεις αφού αυτού του είδους τα δίκτυα δεν παρέχουν ποιότητα υπηρεσίας σε πραγματικό χρόνο (*real-time quality of service, QoS*). Η απώλεια πακέτων και η μεταβαλλόμενη καθυστέρηση δημιουργούν απώλεια στην ποιότητα του περιεχομένου. Στην πολυεκπομπή, αντίθετα με την μονοεκπομπή όπου υπάρχει η σχετική δυνατότητα, δεν υποστηρίζεται μηχανισμός για την εύρεση και αντιμετώπιση σφαλμάτων δικτύου, όπως, για παράδειγμα, τα χαμένα πακέτα ή η εναλλαγή στη σειρά των πακέτων.

Για την αντιμετώπιση προβλημάτων που σχετίζονται με τη μετάδοση σε δίκτυα IP έχουν σχεδιαστεί πρωτόκολλα τα οποία υποστηρίζουν τις πλέον βασικές απαιτήσεις οι οποίες συμπεριλαμβάνουν:

- διαχείριση ποιότητας υπηρεσίας
- διαχείριση ρολογιού
- διαχείριση συνόδων

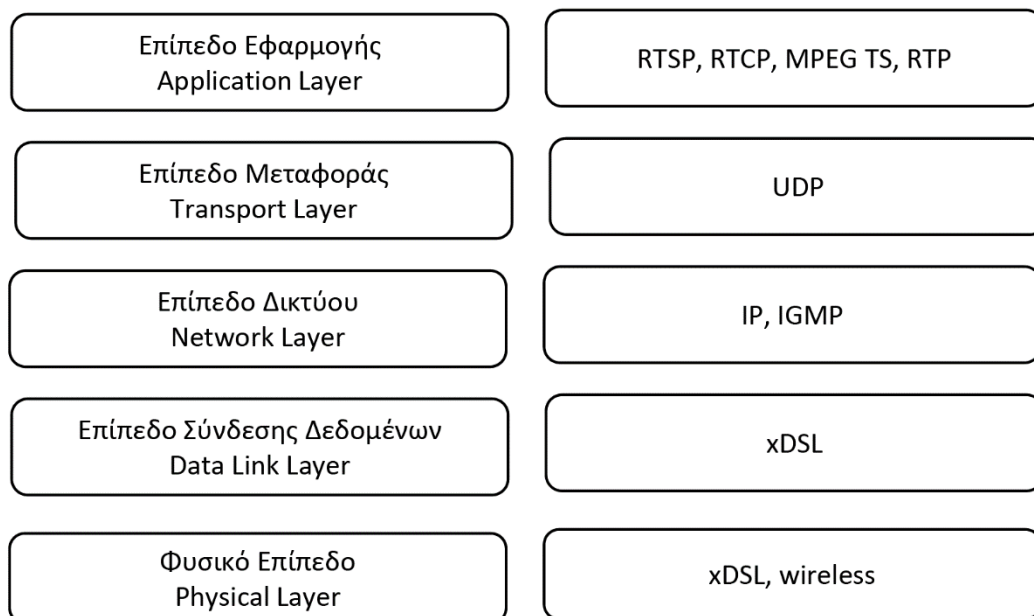
Στην ενότητα αυτή θα εξετάσουμε τη στοιίβα πρωτοκόλλων και τους μηχανισμούς διαχείρισης των δεδομένων. Η στοιίβα πρωτοκόλλων περιλαμβάνει το *Internet Protocol (IP)* ως πρωτόκολλο διαδικτύου και το *User Datagram Protocol (UDP)* ως το πρωτόκολλο του επιπέδου μεταφοράς (transport layer).

8.4.1 Στοιίβα Πρωτοκόλλων

Η χρήση του πρωτοκόλλου IP είναι μη αξιόπιστη, όσον αφορά τη διαχείριση των τυχόν σφαλμάτων και έχει μη προβλέψιμη, μεταβλητή καθυστέρηση. Από την άλλη, τα δεδομένα πρέπει να φτάνουν με την ίδια σειρά που εστάλησαν και με κάποια προβλέψιμη καθυστέρηση. Το πρωτόκολλο μετάδοσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (*Real Time Protocol, RTP*), το οποίο περιγράφεται στο RFC 3550, έχει σχεδιαστεί για την αντιμετώπιση τέτοιων θεμάτων και παρέχει υποστήριξη για την μετάδοση σε πραγματικό χρόνο από τον πομπό στον δέκτη (57).

Για τον σκοπό αυτό, το RTP παρέχει την πληροφορία που αφορά το χρονικό σημείο που βρίσκεται (timestamp) και έναν αύξοντα αριθμό (sequence number) για την αντιμετώπιση των προβλημάτων χρονισμού. Το RTP είχε ξεκινήσει να χρησιμοποιείται στη διαδικτυακή τηλεφωνία βάσει του *Session Initiation Protocol (SIP)* και του H.323. Το RTP είναι, επίσης, πρότυπο της International Telecommunication Union (ITU) (H.225.0).

Η στοιίβα των χρησιμοποιούμενων πρωτοκόλλων φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 8.7 Βασικά πρωτόκολλα για ένα σενάριο IPTV.

Το πρωτόκολλο ελέγχου *Real-Time Control Protocol* (RTCP) είναι ένα πρωτόκολλο ελέγχου το οποίο έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί με το RTP. Είναι ένας μηχανισμός για την αναφορά σε θέματα QoS και βασίζεται σε περιοδική αποστολή πακέτων ελέγχου από όλους τους συμμετέχοντες αναφορικά με την ποιότητα της συνόδου και τη συμμετοχής τους σε αυτή. Η βασική λειτουργία του RTCP είναι η παροχή ανάδρασης για τον έλεγχο της ποιότητας της υπηρεσίας (QoS) του RTP. Με την πληροφορία αυτή ο πομπός μπορεί να επιχειρήσει να βελτιώσει την ποιότητα υπηρεσίας με διορθωτικές ενέργειες (όπως π.χ. αλλαγή του ρυθμού μετάδοσης).

Το πρωτόκολλο *Real-Time Streaming Protocol* (RTSP), το οποίο περιγράφεται στο RFC 2326 (58), είναι ένα πρωτόκολλο σε επίπεδο εφαρμογής το οποίο συνεργάζεται με πρωτόκολλα χαμηλότερου (λειτουργικού) επιπέδου που ασχολούνται με τη ροή των δεδομένων όπως το RTP. Ο βασικός του ρόλος είναι ο έλεγχος επί των ροών με εντολές αντίστοιχες του VCR, επιτρέποντας δηλαδή ενέργειες όπως η παύση (pause / play). Αν και αυτές οι λειτουργίες αντιστοιχούν περισσότερο σε υπηρεσίες τύπου Video on Demand (VoD) χρησιμοποιούνται και στο IPTV.

Παράλληλα με τους βασικούς μηχανισμούς που έχει ορίσει η IETF, το DVB Project έχει ορίσει τα πρωτόκολλα που σχετίζονται με την ανακάλυψη συσκευών και την επιλογή. Οι προδιαγραφές του DVB δημοσιεύονται από το ETSI. Το πρότυπο (59) περιγράφει ένα αρχιτεκτονικό πλαίσιο για την παροχή υπηρεσιών DVB πάνω από δίκτυα IP και περιλαμβάνει περιγραφές υπηρεσιών IPTV. Το ETSI 102 034 περιγράφει την μεταφορά DVB υπηρεσιών που βασίζονται στο MPEG-2 πάνω από IP (60).

Μερικές από τις βασικές οδηγίες του προτύπου ETSI TS 102 034 περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Οι πληροφορίες για την ανακάλυψη των υπηρεσιών και την επιλογή αυτών κωδικοποιούνται με χρήση του πρωτοκόλλου Service Discovery and Selection (SD&S) το οποίο (στο πλαίσιο των υπηρεσιών πολυεκπομπής) μεταφέρεται σε πακέτα IP.
- Το RTSP χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της μετάδοσης πολυεκπομπής.
- Οι ροές ήχου και βίντεο αλλά και η πληροφορία που αφορά τις υπηρεσίες πολυπλέκονται σε μια ροή μεταφοράς του MPEG-2 (Transport Stream). Τα πακέτα που δημιουργούνται σύμφωνα με το MPEG-2 ενσωματώνονται στο Realtime Transport Protocol (RTP) με σήμανση για υπηρεσίες με κλιμακούμενο επίπεδο ποιότητας (*Differentiated Service Code Point, DSCP*) για διαχείριση της ποιότητας της υπηρεσίας.
- Το πρωτόκολλο RTCP χρησιμοποιείται για τη μετάδοση στατιστικών και το πρωτόκολλο IGMP για τη συμμετοχή σε ροές πολυεκπομπής.
- Το πρωτόκολλο *Dynamic Host Configuration Protocol* (DHCP) χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση του οικιακού δικτύου.

Το πρωτόκολλο ETSI TISPAN 102 005 προδιαγράφει την κωδικοποίηση βίντεο και ήχου στις υπηρεσίες DVB όπως αυτές διανέμονται πάνω από τα πρωτόκολλα του Internet χωρίς τη χρήση ενός MPEG2 Transport Stream.

8.4.2 Ενθυλάκωση Δεδομένων

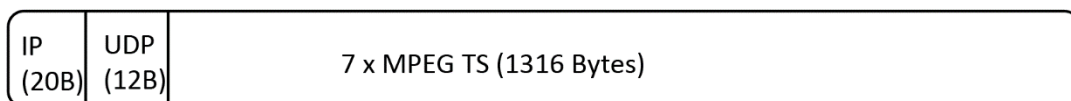
Η φυσική εξέλιξη του IPTV ήταν να βασιστεί στην πιο ώριμη τεχνολογία του MPEG-2 σε συνδυασμό με τους μηχανισμούς δημιουργίας των συρμών μεταφοράς του MPEG-2 (Transport Stream). Η λογική πίσω από αυτήν την προσέγγιση είναι η ενθυλάκωση των πακέτων του IPTV στο πρωτόκολλο RTP και στη συνέχεια στο IP (61). Στη συνέχεια εξετάζουμε τις δύο επόμενες εναλλακτικές περιπτώσεις ενθυλάκωσης:

- Ενθυλάκωση πακέτων MPEG-2 Transport Stream σε πακέτα πρωτοκόλλων RTP/UDP/IP.
- Απευθείας μετάδοση σε RTP/UDP/IP (χωρίς, δηλαδή, χρήση του πακέτων MPEG-2 TransportStream).

8.4.2.1 Χρήση Πακέτων TS

Ο απλούστερος τρόπος να μεταφερθούν αυτά τα πακέτα είναι η εισαγωγή του κατάλληλου πλήθους πακέτων στο κυρίως σώμα του πακέτου IP (IP payload). Για την περίπτωση του Ethernet το μέγιστο μέγεθος της πληροφορίας που μεταδίδεται ανά πακέτο (Maximum Transmission Unit, MTU) είναι 1.500 Bytes. Αυτό σημαίνει ότι εάν αξιοποιηθεί το μέγιστο αυτό μήκος, 7 πακέτα μεταφοράς MPEG-2 TS χωράνε στο πακέτο το οποίο δημιουργείται στο Ethernet.

Η επόμενη εικόνα δείχνει αυτήν την ενθυλάκωση των πακέτων TS packets σε πακέτα UDP και IP.



Εικόνα 8.8 Ενθυλάκωση δεδομένων σε πακέτα IP και UDP.

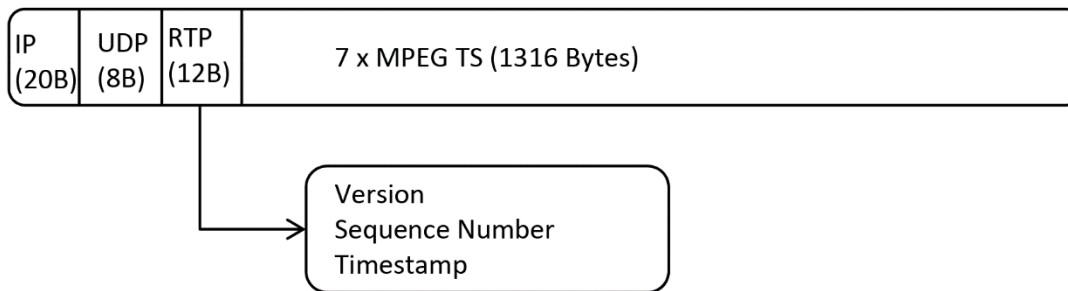
Η μετάδοση των πακέτων MPEG-2 TS πάνω από το UDP είναι μεν η απλούστερη μέθοδος, ωστόσο αυτή δεν περιλαμβάνει κάποιον μηχανισμό για την παρακολούθηση της ποιότητας υπηρεσίας. Χρησιμοποιείται κατά κόρον σε ιδιωτικά δίκτυα (καλωδιακά ή τηλεφωνικά) με στόχο τη μετάδοση ροών MPEG-2 transportstreams. Για τη μετάδοση ροών στο διαδίκτυο χωρίς κάποιες προϋποθέσεις αναφορικά με τη διαχείριση της ποιότητας χρησιμοποιούνται πρωτόκολλα RTP.

Δύο προσεγγίσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετάδοση δεδομένων με χρήση του RTP. Η πρώτη προσέγγιση είναι ταυτόσημη με την τοποθέτηση πολλαπλών MPEG-2 TS σε ένα πακέτο IP με τη διαφοροποίηση ότι τα πακέτα MPEG-2 TS ενθυλακώνονται αρχικά σε ένα πακέτο RTP.

Η επόμενη εικόνα δείχνει πώς γίνεται η ενθυλάκωση επτά πακέτων MPEG-2 TS στο κυρίως σώμα του πακέτου RTP λαμβάνοντας υπόψη την επικεφαλίδα του RTP και τις επικεφαλίδες των UDP/IP. Το πακέτο RTP έχει ενθυλακωθεί (encapsulated) σε πακέτο UDP και στη συνέχεια σε πακέτο IP. Το πακέτο RTP έχει επικεφαλίδα 12 bytes που ακολουθείται από τα κυρίως δεδομένα (π.χ. μια συμπίεσμένη ροή). Το διάγραμμα δείχνει πακέτα μεταφοράς των 188 bytes που αποτελούν τα κυρίως δεδομένα του RTP.

Εντός της επικεφαλίδας του RTP υπάρχει πληροφορία αναφορικά με τη *χρονοσφραγίδα* (timestamp) των δεδομένων στο κυρίως σώμα. Αυτή η πληροφορία χρονισμού εισάγεται από την πηγή με την έναρξη της αποστολής των δεδομένων και ενημερώνεται με την πάροδο του χρόνου. Ο δέκτης χρησιμοποιεί τη χρονοσφραγίδα ως μηχανισμό για να εντοπίσει πότε πρέπει να γίνει η επεξεργασία των δεδομένων.

Με αυτόν τον τρόπο παρέχεται επίσης ο μηχανισμός για τον συγχρονισμό μεταξύ των υπηρεσιών, που χειρίζονται για παράδειγμα τον ήχο και το βίντεο. Ο συγχρονισμός αυτού του επιπέδου δεν έχει ως στόχο την επίτευξη πολύ μεγάλης ακρίβειας (όπως π.χ. για τις ανάγκες του lip-sync). Επιπρόσθετες πληροφορίες χρονισμού υπάρχουν εντός της συμπίεσμένης ροής για συγχρονισμό σε επίπεδο εφαρμογής.



Εικόνα 8.9 Ενθυλάκωση δεδομένων σε πακέτα RTP/UDP/IP.

Ο αύξων αριθμός είναι χρήσιμος στον δέκτη αναφορικά με την τοποθέτηση των πακέτων στην αρχική του σειρά. Υπενθυμίζεται ότι το UDP δεν παρέχει κάποιον αξιόπιστο μηχανισμό μετάδοσης και η σειρά άφιξης των πακέτων ενδεχομένως δεν είναι ίδια με αυτή της αποστολής.

8.4.2.2 Απευθείας Μετάδοση με RTP

Η δεύτερη προσέγγιση είναι η απευθείας μετάδοση των κωδικοποιημένων δεδομένων (όπως, δηλαδή, αυτά προκύπτουν από τον κωδικοποιητή) πάνω από RTP. Το RFC 3984 ορίζει τη μορφή του κυρίως σώματος του RTP (payload) για βίντεο κωδικοποιημένο κατά το H.264 (Advanced Video Coding, AVC) (62).

Οι προδιαγραφές του AVC ορίζουν δύο επίπεδα το οποία ονομάζονται:

- Επίπεδο Κωδικοποίησης Βίντεο (Video Coding Layer, VCL) και
- Επίπεδο Αφαιρετικής διεπαφής Δικτύου (Network Abstraction Layer, NAL).

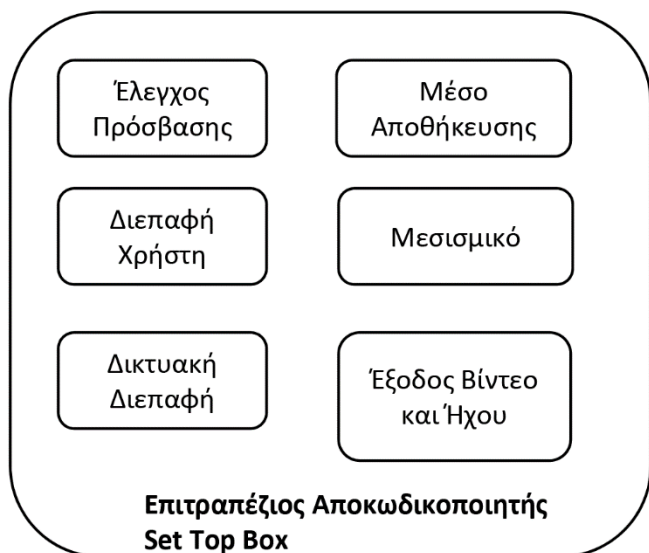
Το επίπεδο κωδικοποίησης βίντεο (VCL) περιέχει τη λειτουργικότητα που αφορά την επεξεργασία του σήματος βίντεο κατά την κωδικοποίηση. Η έξοδος του VCL αποτελείται από τα κωδικοποιημένα δεδομένα του βίντεο (τα macroblocks).

Ο κωδικοποιητής NAL είναι αυτός που ενθυλακώνει την έξοδο του κωδικοποιητή VCL στα ελάχιστα τμήματα τα οποία μπορούν να αποκωδικοποιηθούν ανεξάρτητα (χωρίς, δηλαδή, γνώση των υπολοίπων μονάδων) και τα οποία ονομάζονται μονάδες NAL (NAL units). Τα NAL units είναι κατάλληλα για μετάδοση σε δίκτυα πάνω από RTP. Ένα NAL unit αποτελείται από επικεφαλίδα 1 Byte και το κυρίως μέρος.

8.5 Αρχιτεκτονική - STB

Ο επιτραπέζιος αποκωδικοποιητής, το Set Top Box (STB) αποτελεί τη συσκευή με την οποία έρχεται σε επαφή ο χρήστης. Βρίσκεται σε σύζευξη με τον τηλεοπτικό δέκτη και παρέχει μια σειρά από λειτουργίες με προεξάρχουσα τη λήψη και αποκωδικοποίηση του σήματος που θα εμφανιστεί στην τηλεόραση. Αποτελεί επίσης και ένα σημαντικό ποσοστό της επένδυσης για τον εξοπλισμό του IPTV.

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται η βασική δομή ενός επιτραπέζιου αποκωδικοποιητή.



Εικόνα 8.10 Βασικές βαθμίδες STB.

Η βασική λειτουργία του STB αφορά στη λήψη του σήματος IPTV και τη μετατροπή του σε ένα σήμα βίντεο και ήχου που μπορεί να αποκωδικοποιηθεί και να αναπαραχθεί στην τηλεόραση. Επιπλέον το STB παρέχει τη γραφική διεπαφή στους χρήστες / τηλεθεατές για να κάνουν τις επιλογές των καναλιών και του τρόπου θέασης.

Ο αποκωδικοποιητής περιλαμβάνει τις εξής βασικές βαθμίδες:

- Δικτυακή διεπαφή για τη λήψη του σήματος IPTV και την μετάδοση των εντολών του χρήστη.
- Εξόδους βίντεο και ήχου οι οποίες συνδέονται με τη συσκευή αναπαραγωγής σήματος (δηλαδή τον τηλεοπτικό δέκτη).
- Διεπαφή με τον χρήστη, είτε με χρήση κουμπιών πάνω στη συσκευή είτε με χρήση τηλεχειριστηρίου.
- Βαθμίδα αποκωδικοποίησης για ελεγχόμενη πρόσβαση η οποία περιλαμβάνει υλικό και λογισμικό για την προστασία των πνευματικών δικαιωμάτων.
- Μέσο αποθήκευσης ώστε να παρέχεται η δυνατότητα αποθήκευσης τηλεοπτικού περιεχομένου.

Στα επόμενα εξετάζουμε τις βαθμίδες αυτές με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

8.5.1 Δικτυακή Διεπαφή

Η δικτυακή διεπαφή είναι συνήθως μια διεπαφή τύπου Ethernet που επιτρέπει τη ροή της κίνησης (IP) από και προς το STB. Τα δεδομένα που μεταδίδονται περιλαμβάνουν την κωδικοποιημένη πληροφορία βίντεο και ήχου, τις εντολές του χρήστη, τις πληροφορίες που αφορούν την κατάσταση της συσκευής. Οι ροές αυτές είναι ασύμμετρες με μεγάλο εισερχόμενο ρυθμό και μικρότερο εξερχόμενο ρυθμό.

Η διεπαφή του STB συνήθως δεν συνδέεται απευθείας με την οικιακή συσκευή λήψης του σήματος του δικτύου π.χ. στην πλέον συνηθισμένη περίπτωση το Digital Subscriber Line (DSL) modem αλλά με μια οικιακή πύλη (Residential Gateway) η οποία λαμβάνει τα δεδομένα μέσω του δικτύου DSL και τα μετατρέπει σε μορφή Ethernet. Με αυτόν τον τρόπο το STB χρειάζεται να υποστηρίξει μόνο το κοινό πρωτόκολλο του Ethernet και όχι διαφορετικές εκδόσεις του ADSL.

Οι δικτυακές διεπαφές μπορεί να είναι ασύρματες, χωρίς όμως αυτή να αποτελεί τη μοναδική επιλογή αφού υποστηρίζονται και άλλες λύσεις, όπως για παράδειγμα η τηλεφωνική σύνδεση του σπιτιού ή και το δίκτυο της ενέργειας.

8.5.2 Έξοδοι Βίντεο και Ήχου

Οι έξοδοι βίντεο και ήχου ενός STB περιλαμβάνουν επιλογές οι οποίες διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος του σήματος που μεταδίδεται.

- Αναλογικά καλώδια RCA (Radio Corporation of America): Το σύνθετο σήμα βίντεο μπορεί να μεταφέρεται από το STB στην τηλεοπτική συσκευή μέσω ενός απλού ομοαξονικού καλωδίου. Οι τυπικές διεπαφές RCA έχουν τρία χρώματα: κίτρινο για το βίντεο, κόκκινο για το δεξί κανάλι του στερεοφωνικού ήχου και άσπρο για το αριστερό κανάλι του ήχου.
- Διεπαφή S-video, όπου η φωτεινότητα και τα χρώματα μεταδίδονται με χρήση διαφορετικών καλωδίων. Το S-video μπορεί να δώσει υψηλής ποιότητας εικόνα επιτρέποντας τον διαχωρισμό της φωτεινότητας και του χρώματος στην έξοδο του STB. Μια εναλλακτική είναι η χρήση καλωδίου SCART (*Syndicat des Constructeurs d'Appareils Radiorécepteurs et Téléviseurs – Radio and Television Receiver Manufacturers' Association*).
- Διεπαφή *Digital Visual Interface (DVI)* η οποία μεταδίδει ψηφιακό ή αναλογικό σήμα βίντεο καθώς και το σήμα ήχου. Οι διεπαφές DVI, πέρα από κάποια μοντέλα από επιτραπέζιους αποκωδικοποιητές STB, χρησιμοποιούνται και σε κάρτες γραφικών. Σε μεγάλο βαθμό η συγκεκριμένη διεπαφή έχει αντικατασταθεί από τη διεπαφή HDMI, η οποία είναι πιο οικονομική όσον αφορά την κατασκευή.
- Διεπαφή πολυμέσων υψηλής ακρίβειας (*High Definition Multimedia Interface, HDMI*) η οποία χρησιμοποιείται για τη μετάδοση ψηφιακού βίντεο και ήχου. Βασίζεται στις προδιαγραφές του DVI με την προσθήκη ψηφιακού ήχου στο ίδιο καλώδιο και διατηρεί τη συμβατότητα με τις προδιαγραφές του DVI-Digital, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η εναλλαγή των καλωδίων.
- Η διεπαφή Προστασίας Ψηφιακού Περιεχομένου Υψηλού Εύρους Ζώνης (*High Bandwidth Digital Content Protection, HDCP*) χρησιμοποιείται στις διεπαφές DVI και HDMI για να αποτραπεί μη εξουσιοδοτημένη αντιγραφή ψηφιακού σήματος βίντεο με την κρυπτογράφηση των δεδομένων. Στη συσκευή όπου αναπαράγεται το σήμα, τα δεδομένα αποκρυπτογραφούνται και τελικά προβάλλεται η εικόνα στην οθόνη.

8.5.3 Διεπαφή Χρήστη

Η διεπαφή του χρήστη με το STB καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την εμπειρία του κατά τη χρήση της υπηρεσίας IPTV. Η διεπαφή αυτή αποτελείται συνήθως από τρία τμήματα. Το πρώτο τμήμα αφορά στις ενδείξεις τις σχετικές με την κατάσταση της συσκευής, την ώρα και την ημερομηνία, την επιλογή του καναλιού.

Το δεύτερο τμήμα αφορά στον τηλεχειρισμό της συσκευής, με χρήση υπέρυθρων. Το τρίτο τμήμα αφορά το λογισμικό το οποίο είναι εγκατεστημένο στη συσκευή και υποστηρίζει την αλληλεπίδραση με τον χρήστη. Το δεύτερο και το τρίτο τμήμα είναι που υποστηρίζουν σε μεγάλο βαθμό την εμπειρία του χρήστη και παρέχουν πρόσβαση στις βασικές λειτουργίες οι οποίες περιλαμβάνουν:

- Έλεγχο της συσκευής, ενεργοποίηση, ρύθμιση έντασης ήχου, επιλογή εισόδου σήματος.
- Επιλογή και αλλαγή καναλιού.
- Περιήγηση και χρήση ηλεκτρονικού οδηγού προγράμματος (*Electronic Program Guide, EPG*).
- Έλεγχο πρόσβασης, χρήση γονικού ελέγχου και εισαγωγή κωδικών.
- Βασική Αλληλεπίδραση κατά τη θέαση, όπως παύση, εντολή για γρήγορα μπροστά και μετακίνηση προς τα πίσω.
- Προχωρημένη αλληλεπίδραση, όπως χρήση υπηρεσιών από την οθόνη, ψηφοφορίες, αγορές.

Σε κάποιες περιπτώσεις το τηλεχειριστήριο του αποκωδικοποιητή μπορεί να ελέγχει και άλλες συσκευές βίντεο και ήχου. Είναι σημαντική η ισορροπία μεταξύ απλότητας και λειτουργικότητας της συσκευής.

8.5.4 Έλεγχος Πρόσβασης

Η ελεγχόμενη πρόσβαση και η διαχείριση των πνευματικών δικαιωμάτων (Conditional Access & Digital Rights Management, CA/ DRM) παίζουν σημαντικό ρόλο και στις υπηρεσίες του IPTV. Χωρίς ένα αποτελεσματικό σύστημα CA/DRM είναι δύσκολο για τον πάροχο της υπηρεσίας να εξασφαλίσει ότι πρόσβαση στο περιεχόμενο έχουν αυτοί που το δικαιούνται (δηλαδή οι συνδρομητές της υπηρεσίας).

Η διαχείριση του συστήματος ελέγχου πρόσβασης γίνεται με τη χρήση του STB. Η πρώτη προϋπόθεση είναι η δυνατότητα του συστήματος να αναγνωρίζει μονοσήμαντα τον χρήστη. Εν γένει η αναγνώριση ενός χρήστη μπορεί να γίνει με χρήση ορισμένων πληροφοριών – κωδικών. Στην περίπτωση του IPTV το STB παίζει έναν αντίστοιχο ρόλο, αφού πρέπει να είναι σε θέση να προστατεύσει τη χρήση του περιεχομένου που παρέχεται ή και αποθηκεύεται στη συσκευή. Μια από τις πιο χαρακτηριστικές τεχνολογίες είναι η έξυπνη κάρτα (Smart Card). Αυτές οι κάρτες ενσωματώνουν έναν μικροεπεξεργαστή και μνήμη και μπορούν να χρησιμοποιηθούν από διάφορες εφαρμογές. Η χρήση του προϋποθέτει την ύπαρξη καρταναγνώστη, ο οποίος είναι συνήθως ενσωματωμένος στο STB.

Λύσεις οι οποίες βασίζονται στο λογισμικό έχουν ξεκινήσει να διατίθενται και να παρέχουν το ίδιο ή και υψηλότερο επίπεδο ασφαλείας, σε σχέση με τις λύσεις που βασίζονται στο υλικό. Τέτοιες λύσεις πλεονεκτούν από άποψη κατασκευαστικού κόστους καθώς και διαχειριστικού κόστους αναφορικά με τη διάθεση του εξοπλισμού στους χρήστες.

8.5.5 Μέσο Αποθήκευσης

Οι επιτραπέζιοι αποκωδικοποιητές, σε αντιστοιχία με τους υπολογιστές, είναι να δυνατό να έχουν μέσα αποθήκευσης - σκληρούς δίσκους τα οποία να χρησιμοποιούνται για τη μόνιμη αποθήκευση υλικού. Με τις τρέχουσες τεχνολογίες συμπίεσης είναι δυνατή η αποθήκευση άνω των 100 ωρών πολυμεσικού υλικού τυπικής ανάλυσης ή 20 ωρών υλικού υψηλής ευκρίνειας.

Κατά την εγγραφή ο χρήστης επιλέγει τα χαρακτηριστικά της εγγραφής, χρησιμοποιώντας τον αποκωδικοποιητή ως Personal Video Recorder (PVR), για παράδειγμα καταγραφή τηλεοπτικών προγραμμάτων.

8.5.6 Μεσισμικό

Το μεσισμικό (middleware) αποτελεί τη λειτουργικότητα που διασυνδέει τα στοιχεία ενός συστήματος, όπως οι εξυπηρετητές, τα στοιχεία του δικτύου και τα STBs. Επίσης διασυνδέει τα λειτουργικά τμήματα των εφαρμογών (όπως τον έλεγχο πρόσβασης, τα συστήματα χρέωσης και αλληλεπίδρασης). Συγκεκριμένα, υπάρχουν πρότυπα που επιτρέπουν τη σχεδίαση και την ανάπτυξη εφαρμογών για οποιοδήποτε STB, χωρίς να είναι αναγκαία η γνώση των λεπτομερειών καθεμιάς συσκευής.

Το μεσισμικό μπορούμε να πούμε ότι συνενώνει τα τμήματα ενός συστήματος IPTV και παρέχει τους μηχανισμούς ώστε να δώσει στους χρήστες τη δυνατότητα να έχουν πρόσβαση στο περιεχόμενο και στις λειτουργίες του συστήματος, οι οποίες περιλαμβάνουν την αναγνώριση των χρηστών, την πλοήγηση στην οθόνη, τη δημιουργία κειμένων και μενού, την αλλαγή καναλιού, τη διαχείριση των εφαρμογών και εν γένει την αλληλεπίδραση του χρήστη με την υπηρεσία και τη συσκευή.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

53. G. Driscoll. *Next Generation IPTV Services and Technologies*. J Wiley & Sons, 2007.
54. DARPA Internet Protocol. *IPProtocol, RFC (Request for Comments) 791*. Internet Engineering Task Force, 1981.
55. X. Hei. *IPTV over P2P streaming networks the Push Pull approach*. IEEE Communications Magazine, Vol. 46, Issue 2, 2008.
56. Internet Engineering Task Force (IETF). *Internet Group Management Protocol (IGMP), RFC 2236, IGMP v.3*. Internet Engineering Task Force, 2002.
57. Internet Engineering Task Force (IETF). *RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications, RFC 3550*. Internet Engineering Task Force, 2015.
58. Internet Engineering Task Force (IETF). *Real Time Streaming Protocol (RTSP)*. Internet Engineering Task Force, 1998.
59. Digital Video Broadcasting (DVB). *Architectural framework for the delivery of DVB-services over IP-based networks, ETSI TS 102 033*. Digital Video Broadcasting, 2004.
60. Digital Video Broadcasting (DVB). *Transport of MPEG-2 TS Based DVB Services over IP Based Networks, ETSI TS 102 034*. Digital Video Broadcasting, 2010.
61. Digital Video Broadcasting (DVB). *Specification for the use of Video and Audio Coding in DVB services delivered directly over IP protocols, ETSI TS 102 005*. Digital Video Broadcasting, 2010.
62. Internet Engineering Task Force (IETF). *RTP Payload Format for H.264 Video, RFC 3984*. Internet Engineering Task Force, 2005.

Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1

Υπολογίστε την πληροφορία η οποία σχετίζεται με τις επικεφαλίδες των πρωτοκόλλων (και όχι με το χρήσιμο σήμα) στα διαφορετικά σενάρια ενθυλάκωσης των πακέτων MPEG Transport Stream που εξετάσαμε:

- UDP / IP
- RTP / UDP / IP

Θεωρήστε ότι το χρήσιμο φορτίο το οποίο μπορεί να εισαχθεί σε ένα πακέτο IP για την περίπτωση του παραδείγματος είναι 1.380 Bytes.

Απάντηση/Λύση

Ξεκινάμε με το δεδομένο ότι το διαθέσιμο φορτίο στο πακέτο IP είναι 1380 Bytes. Διαιρώντας με το πλήθος των Bytes ανά πακέτο MPEG TS, προκύπτει το πλήθος N των πακέτων Transport Stream που μπορούν να συμπεριληφθούν. Συγκεκριμένα έχουμε:

$$N = 1380/188 = 7.34 \quad (1)$$

Λαμβάνοντας το ακέραιο μέρος προκύπτει ότι χωράνε 7 πακέτα και καταλαμβάνουν 1.316 Bytes, με τα υπόλοιπα 64 Bytes να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν (να περιέχουν δηλαδή μη χρήσιμα δεδομένα).

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τα επιπλέον δεδομένα τα οποία είναι απαραίτητα ώστε να πραγματοποιηθούν τα σενάρια ενθυλάκωσης.

- Το πακέτο IP έχει επικεφαλίδα 4 Bytes.
- Το πακέτο UDP έχει επικεφαλίδα 8 Bytes.
- Το πακέτο UDP εισάγεται (στη δεύτερη περίπτωση που εξετάζουμε) σε πακέτο RTP με επικεφαλίδα στα 12 Bytes (κατ' ελάχιστον).

Με βάση τα παραπάνω η μη χρήσιμη πληροφορία υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{Α' Σενάριο: } & 4+8 = 12 \text{ Bytes} \\ \text{Β' Σενάριο: } & 4+8+12 = 24 \text{ Bytes} \end{aligned} \quad (2)$$

Όπως αναμένεται στο δεύτερο σενάριο απαιτείται περισσότερη πληροφορία, αφού εμπλέκεται και το πρωτόκολλο RTP, ωστόσο το μέγεθος της επικεφαλίδας είναι μικρό σε σχέση με το μέγεθος της χρήσιμης πληροφορίας.

Κριτήριο αξιολόγησης 2

Αντιστοιχίστε τις επόμενες λειτουργίες:

- Διευθυνσιοδότηση συσκευών

- Πολυεκπομπή και διαχείριση ομάδων
- Χρονοσήμανση πακέτων
- Βασικός έλεγχος ροής
- Έλεγχος ποιότητας υπηρεσίας
- Λειτουργίες επιπέδου μεταφοράς

στα πρωτόκολλα που τις υλοποιούν:

- RTSP
- RTCP
- UDP
- NTP
- IGMP
- RTP
- IP

Απάντηση/Λύση

Οι αντιστοιχίσεις που προκύπτουν είναι οι ακόλουθες:

- Διευθυνσιοδότηση συσκευών → Internet Protocol
- Πολυεκπομπή και διαχείριση ομάδων → Internet Group Management Protocol
- Χρονοσήμανση πακέτων → Network Time Protocol
- Βασικός έλεγχος ροής → Real Time Streaming Protocol
- Έλεγχος ποιότητας υπηρεσίας → Real Time Control Protocol
- Λειτουργίες επιπέδου μεταφοράς → User Datagram Protocol, Real Time Protocol

Κριτήριο αξιολόγησης 3

Υπολογίστε τα εξής:

- Ποιο είναι το μέγεθος του χώρου διευθυνσιοδότησης για τα σενάρια της πολυεκπομπής;
- Ποια είναι η πιθανότητα δύο ομάδες πολυεκπομπής να επιλέξουν την ίδια διεύθυνση;
- Ποια είναι η πιθανότητα χίλιες ομάδες πολυεκπομπής να επιλέξουν την ίδια διεύθυνση;
- Πόσες διευθύνσεις πολυεκπομπής χρειάζονται για να λειτουργήσει μία ομάδα που αποτελείται από 10 χρήστες; Πόσες απαιτούνται στην περίπτωση που τα μέλη της ομάδας δεκαπλασιαστούν;

Απάντηση/Λύση

Αναφορικά με το μέγεθος του χώρου διευθυνσιοδότησης για τα σενάρια πολυεκπομπής, αυτό προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη τα bits τα οποία είναι διαθέσιμα για τον σχηματισμό διευθύνσεων. Όπως έχει συζητηθεί παραπάνω το διαθέσιμο πλήθος είναι:

$$32 - 4 = 28 \text{ bits} \quad (3)$$

Το πλήθος αυτό μας δίνει $N=2^{28}$ δυνατές διευθύνσεις.

Η πιθανότητα δύο ομάδες να έχουν την ίδια διεύθυνση προκύπτει με απλή διαίρεση:

$$P_2 = 1 / N = 3.73 \cdot 10^{-9} \quad (4)$$

Στην περίπτωση που έχουμε 1.000 διαφορετικές ομάδες, η πιθανότητα να έχουμε σύγκρουση διευθύνσεων υπολογίζεται ως εξής:

$$P1000 = (N(N-1)(N-2) \dots (N-999)) / N^{1000} = 0.998 \quad (5)$$

Τέλος, επισημαίνεται ότι σε μια ομάδα πολυεκπομπής χρησιμοποιείται μόνο μια διεύθυνση, για όλους τους συμμετέχοντες στην ομάδα. Αυτό σημαίνει ότι και στις δύο περιπτώσεις του τελευταίου ερωτήματος απαιτείται μια διεύθυνση πολυεκπομπής.

Κεφάλαιο 9 – Τηλεοπτικός Δέκτης

Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζουμε τον τηλεοπτικό δέκτη και τη λειτουργικότητα που αυτός περιλαμβάνει ώστε να είναι δυνατή η αναπαραγωγή του τηλεοπτικού σήματος. Διακρίνουμε τις δύο βασικές κατηγορίες, τον αναλογικό τηλεοπτικό δέκτη και τον ψηφιακό. Η διάκριση αυτή βασίζεται στον τύπο του τηλεοπτικού σήματος που λαμβάνει και επεξεργάζεται ο δέκτης. Ο αναλογικός δέκτης μπορεί να επεξεργαστεί κατ' ελάχιστον το αναλογικό σήμα, ενώ ο ψηφιακός δέκτης κατ' ελάχιστον το ψηφιακό. Παρόλο που η αντιστοίχιση μπορεί να είναι ένα προς ένα, η πλέον συνηθισμένη περίπτωση είναι ένας δέκτης να δύναται να επεξεργαστεί και τα δύο είδη σημάτων.

Παράλληλα με την επεξεργασία του σήματος, ένα σημαντικό κομμάτι της λειτουργικότητας του δέκτη αφορά τις βαθμίδες οι οποίες είναι υπεύθυνες για την απεικόνιση του οπτικού σήματος και την αναπαραγωγή του ήχου. Παρόλο που η αναλυτική επεξήγηση των μηχανισμών, των ιδιοτήτων, αλλά και των υλικών που χρησιμοποιούνται στις διάφορες περιπτώσεις της συσκευής καθοδικού σωλήνα και των επίπεδων δεκτών ξεφεύγει από τους στόχους αυτού του συγγράμματος, αναφερόμαστε στις βασικές αρχές λειτουργίες αυτών.

Προαπαιτούμενη γνώση

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο εξετάζει τη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά των τηλεοπτικών δεκτών. Για την κατανόηση αυτών των λειτουργιών απαιτείται η γνώση των προηγούμενων κεφαλαίων, όπου περιγράφεται ο τρόπος δημιουργίας και κωδικοποίησης καθώς και τα χαρακτηριστικά του τηλεοπτικού σήματος. Με βάση τις διαδικασίες αυτές που προηγούνται είναι δυνατή η καλύτερη εμπέδωση των λειτουργιών που αναμένονται από την πλευρά του τηλεοπτικού δέκτη.

9.1 Εισαγωγή

Η διαδικασία της αναπαραγωγής του τηλεοπτικού σήματος περιλαμβάνει την επεξεργασία των σημάτων ήχου και βίντεο, καθώς και την οδήγηση της συσκευής απεικόνισης. Κάθε τηλεοπτικός δέκτης αποτελείται από συγκεκριμένες βαθμίδες. Όσον αφορά τις βαθμίδες που ασχολούνται με την επεξεργασία του σήματος, διακρίνουμε τις δύο βασικές κατηγορίες, τον αναλογικό τηλεοπτικό δέκτη και τον ψηφιακό. Η διάκριση αυτή βασίζεται στον τύπο του τηλεοπτικού σήματος που λαμβάνεται και επεξεργάζεται ο δέκτης. Το σήμα μπορεί να προέρχεται από αναλογική ή ψηφιακή πηγή. Η ψηφιακή πηγή μπορεί να είναι τυπικής υψηλής ευκρίνειας.

Στην επίγεια λήψη ο τηλεοπτικός δέκτης λαμβάνει το σήμα από την εξωτερική κεραία, η οποία είναι συντονισμένη σε κάποιο κανάλι στην μπάντα των VHF και UHF. Επισημαίνεται ότι κατά τη μετάβαση από την αναλογική τηλεόραση στην ψηφιακή τηλεόραση, δεν έχει υπάρξει διαφοροποίηση στην μπάντα των χρησιμοποιούμενων συχνοτήτων. Το υποσύστημα λήψης (συμπεριλαμβανομένης και της κεραίας) είναι εκτός των στόχων του παρόντος κεφαλαίου.

Στην περίπτωση της αναλογικής τηλεόρασης, η επεξεργασία του βίντεο περιλαμβάνει τον διαχωρισμό της φωτεινότητας από τις χρωματικές συνιστώσες. Το σήμα RGB στη συνέχεια υφίσταται επεξεργασία ανάλογα με το αν προέρχεται από προοδευτική ή διαπλεγμένη σάρωση. Στη συνέχεια μετατρέπεται στη μορφή και τις διαστάσεις τις οποίες μπορεί να υποστηρίξει η μονάδα απεικόνισης.

Το ψηφιακό βίντεο εισάγεται στη συσκευή μετατροπής της μορφής του βίντεο και οδηγείται στη συσκευή απεικόνισης. Αυτή η μετατροπή ακολουθείται από ενίσχυση του σήματος RGB στην περίπτωση που χρησιμοποιείται διάταξη καθοδικού σωλήνα (Cathode Ray Tube, CRT) ή οδήγηση κατά γραμμή και στήλη στην περίπτωση των επίπεδων οθονών.

Ο ήχος στην περίπτωση της αναλογικής τηλεόρασης λαμβάνεται από το σύνθετο σήμα με φιλτράρισμα με χρήση φίλτρου ακουστικών συχνοτήτων (Surface Acoustic Wave, SAW) και αποδιαμορφώνεται από τον ανιχνευτή ήχου (Sound Detector, SD). Στη συνέχεια το σήμα του ήχου υφίσταται επεξεργασία, ενισχύεται και οδηγείται στα ηχεία.

Στην περίπτωση της ψηφιακής λήψης ο στερεοφωνικός ήχος αποτελεί όπως έχουμε δει τμήμα της ροής μεταφοράς. Ο ήχος είναι κωδικοποιημένος και οδηγείται στην μονάδα επεξεργασίας του ήχου για επεξεργασία και ενίσχυση. Ήχος προερχόμενος από εξωτερικές πηγές μπορεί, επίσης, να υποστεί επεξεργασία του από τη μονάδα επεξεργασίας.

Παράλληλα με την επεξεργασία του σήματος, ένα σημαντικό κομμάτι της λειτουργικότητας του δέκτη αφορά τις βαθμίδες της απεικόνισης. Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου αναφερόμαστε στις βασικές αρχές λειτουργίες αυτών. Εντούτοις η αναλυτική εξήγηση των μηχανισμών, των ιδιοτήτων, αλλά και των υλικών που χρησιμοποιούνται στις διάφορες περιπτώσεις της συσκευής καθοδικού σωλήνα και των επίπεδων δεκτών δεν ανήκει στους στόχους αυτού του συγγράμματος.

9.2 Αναλογικός Τηλεοπτικός Δέκτης

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε τη βασική δομή του αναλογικού τηλεοπτικού δέκτη και τη λειτουργικότητα που απαιτείται για τη λήψη και την επεξεργασία του σήματος και την προετοιμασία πριν την απεικόνισή του. Μία εκτενής αναφορά στον αναλογικό τηλεοπτικό δέκτη είναι διαθέσιμη στα επόμενα συγγράμματα (1) και (3).

Θεωρούμε ότι το σήμα λαμβάνεται από την κεραία επίγειας λήψης. Ωστόσο το σήμα μπορεί να ληφθεί και από άλλες πηγές όπως οι συσκευές DVD (Digital Video Disc), ή, παλιότερα, τα VCR (Video Cassette Recorder). Εφόσον συμβαίνει αυτό χρησιμοποιείται ένα υποσύνολο μόνο από τη συνολική λειτουργικότητα (για παράδειγμα, μπορεί να μη χρησιμοποιείται η μονάδα που αφορά τη σύνδεση με την κεραία λήψης). Οι συνδέσεις που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν το SCART (Radio and Television Receiver Manufacturers' Association), το S-video και το HDMI (High-Definition Multimedia Interface). Στην περίπτωση μας θα εξετάσουμε τη λήψη, δηλαδή, από επίγειο αναλογικό δέκτη.

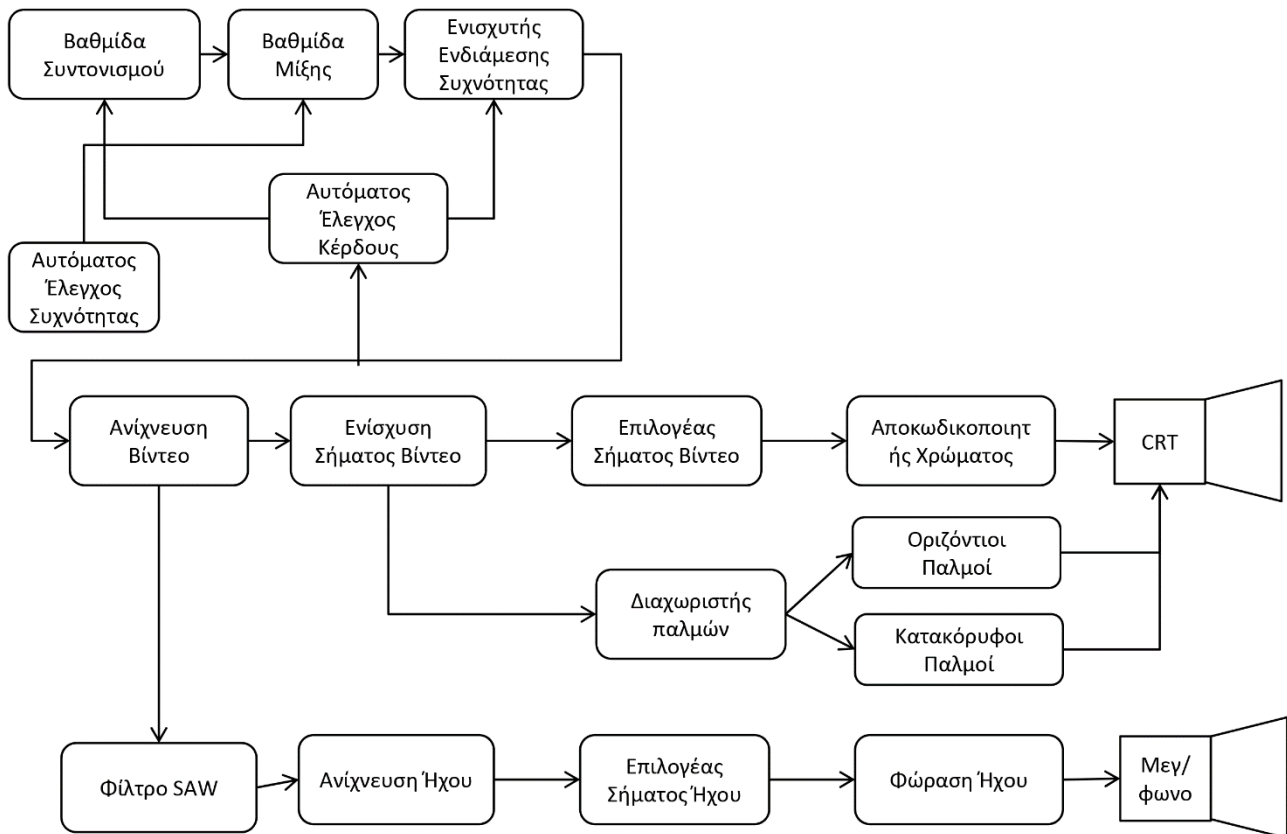
Οι βασικές βαθμίδες του αναλογικού τηλεοπτικού δέκτη απεικονίζονται στην επόμενη εικόνα και περιλαμβάνουν τις εξής:

- Βαθμίδα συντονισμού
- Βαθμίδα μίξης
- Ενισχυτής ενδιάμεσης συχνότητας

- Ανιχνευτής σήματος βίντεο
- Αποκωδικοποιητής χρώματος και μήτρα RGB
- Βαθμίδα απεικόνισης (καθοδικός σωλήνας, Cathode Ray Tube, CRT)
- Ακουστικό φίλτρο (Surface Acoustic Wave, SAW)

Η βαθμίδα συντονισμού επιλέγει τη συχνότητα του φέροντος στην μπάντα των UHF (ή και των VHF) για το κανάλι το οποίο έχει επιλέξει ο χρήστης. Ακολουθεί η μετατροπή (υποβίβαση) της συχνότητας του σήματος στην ενδιάμεση συχνότητα (Intermediate Frequency, IF) η οποία είναι στα 39,5 MHz. Η υποβίβαση αυτή της συχνότητας γίνεται με μίξη στη βαθμίδα μίξης. Το διαμορφωμένο σήμα ενδιάμεσης συχνότητας ενισχύεται από τον ενισχυτή ενδιάμεσης συχνότητας.

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται ένα βασικό διάγραμμα του δέκτη και επεξηγείται στη συνέχεια.



Εικόνα 9.1 Βασικές βαθμίδες αναλογικού δέκτη.

Το σήμα ενδιάμεσης συχνότητας αποδιαμορφώνεται προκειμένου να επανακτηθεί το αναλογικό σήμα βίντεο (Color Video Blanking & Synchronization, CVBS). Το σήμα CVBS διαχωρίζεται στα τρία βασικά του τμήματα τα οποία περιλαμβάνουν το βίντεο, τον ήχο και τα σήματα συγχρονισμού. Ο επιλογέας βίντεο επιλέγει κάθε ένα από τα σήματα βίντεο για την περαιτέρω επεξεργασία. Το σήμα CVBS από τον επιλογέα μεταφέρεται στον αποκωδικοποιητή χρώματος για τη δημιουργία των συνιστωσών RGB (ή YUV) οι οποίες μέσω της μήτρας RGB και ενίσχυσης οδηγούνται στον καθοδικό σωλήνα CRT.

Το υποφέρον του ήχου στα 6 MHz διαχωρίζεται κατά το στάδιο της ανίχνευσης του βίντεο με τη χρήση ενός φίλτρου ακουστικών συχνοτήτων (Surface Acoustic Wave, SAW). Το σήμα ήχου το οποίο είναι διαμορφωμένο κατά FM, υφίσταται φώραση, ενίσχυση και κατόπιν οδηγείται στο σύστημα ηχείων.

Οι παλμοί συγχρονισμού αφαιρούνται από την πληροφορία του βίντεο κατά την έξοδο του σήματος από τον ενισχυτή βίντεο, διαχωρίζονται σε γραμμές συγχρονισμού γραμμής και πεδίου (οριζόντιου και κατακόρυφου συγχρονισμού αντίστοιχα) και συνδέονται με την πληροφορία χρονισμού. Αφού ενισχυθούν, οι παλμοί γραμμής και πεδίου χρησιμοποιούνται για την απόκλιση της δέσμης ηλεκτρονίων εντός του καθοδικού σωλήνα (οριζόντια και κατακόρυφα) με χρήση των πηνίων απόκλισης του καθοδικού σωλήνα.

Το σύστημα αυτομάτου ελέγχου του κέρδους (Automatic Gain Control, AGC) χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει ότι η έξοδος του σήματος από τη βαθμίδα ενδιάμεσης συχνότητας είναι σταθερή όσον αφορά το πλάτος ανεξάρτητα από τις διαφοροποιήσεις οι οποίες μπορεί να υπάρχουν στην ένταση του ληφθέντος σήματος. Το AGC πραγματοποιεί τρεις βασικές ενέργειες στον δέκτη:

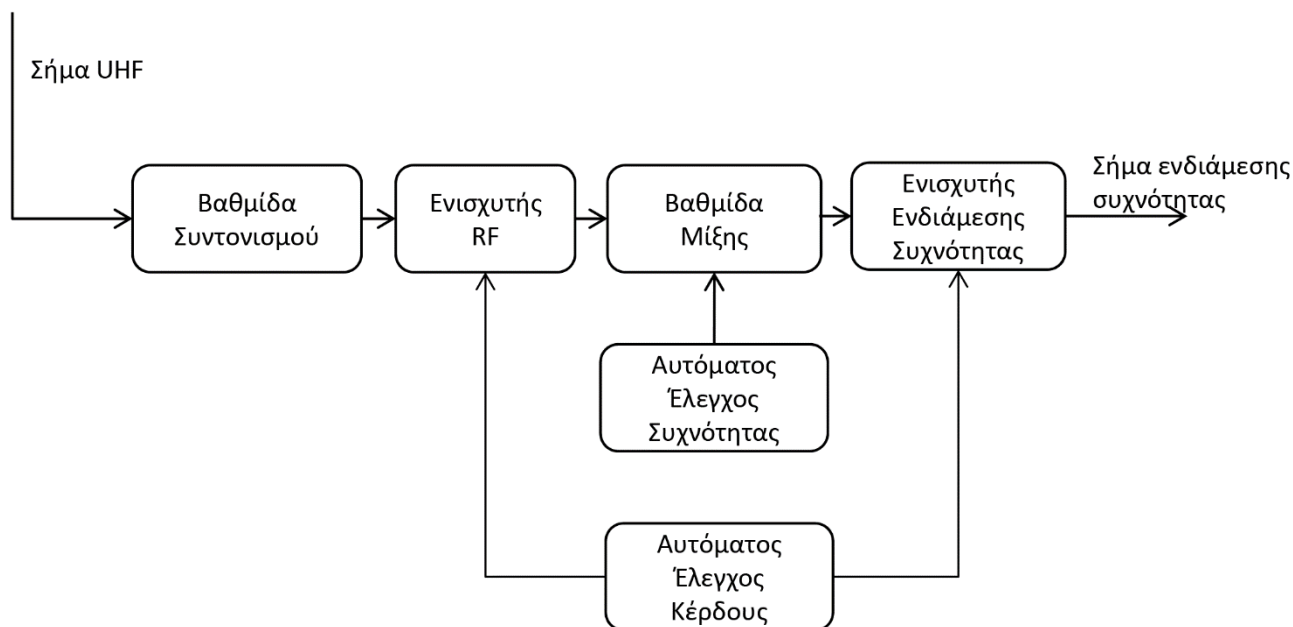
- Επιτρέπει την αλλαγή (όσον αφορά τη λήψη / συντονισμό) από ένα κανάλι με ισχυρή λήψη σε κάποιο άλλο με ασθενέστερη και αντίστροφα, χωρίς να χρειάζεται προσαρμογή ο δέκτης (αναφορικά με τη στάθμη της ενίσχυσης).
- Αποτρέπει την υπερφόρτωση των σταδίων ενίσχυσης στη ραδιοσυχνότητα αλλά και την ενδιάμεση συχνότητα (RF/IF) γεγονός το οποίο θα προκαλούσε παραμόρφωση στο σήμα.
- Μειώνει την ανεπιθύμητη ταλάντωση από ανακλάσεις του μεταδιδόμενου σήματος λόγω κινούμενων αντικειμένων όπως π.χ. τα αεροπλάνα. Η αποτελεσματικότητα της μείωσης της ταλάντωσης εξαρτάται από τη σταθερά χρόνου του κυκλώματος του AGC.

Το σύστημα αυτόματου ελέγχου της συχνότητας (Automatic Frequency Control, AFC) χρησιμοποιείται ώστε να διατηρεί σταθερή τη συχνότητα της βαθμίδας ενδιάμεσης συχνότητας στην τιμή των 39,5 MHz (ενδιάμεση συχνότητα).

9.2.1 Βαθμίδα Εισόδου

Τα τμήματα που αποτελούν τη βαθμίδα εισόδου του δέκτη είναι η βαθμίδα συντονισμού (στις συχνότητες RF), η βαθμίδα μίξης (μίκτης) και ο ενισχυτής ενδιάμεσης συχνότητας (IF). Το κύκλωμα συντονισμού χρησιμοποιείται για την επιλογή της συχνότητας ενός καναλιού, την ενίσχυση του σήματος που λαμβάνεται (στη συχνότητα RF) και τη μετατροπή σε σήμα ενδιάμεσης συχνότητας ώστε να ενισχυθεί περαιτέρω από τη βαθμίδα ενδιάμεσης συχνότητας. Το κύκλωμα συντονισμού βρίσκεται εντός μεταλλικού περιβλήματος για την αποφυγή εξωτερικών παρεμβολών.

Οι λειτουργίες της βαθμίδας εισόδου παρίστανται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 9.2 Βαθμίδα εισόδου του δέκτη.

Το κύκλωμα συντονισμού πρέπει να μπορεί να επιλέγει οποιοδήποτε κανάλι από τις μπάντες της τηλεόρασης IV και V (των UHF) και επίσης να μπορεί να επιτύχει επαρκή ενίσχυση τις συχνότητες RF με επαρκή σηματοθορυβικό λόγο (Signal to Noise Ratio, SNR) και ελάχιστη μετατόπιση συχνότητας. Για τον σκοπό αυτό απαιτούνται συνήθως πολλαπλές βαθμίδες ενίσχυσης RF πριν το κύκλωμα μίξης. Η κεραία

συνδέεται με το κύκλωμα συντονισμού μέσω ενός κυκλώματος απομόνωσης. Το κύκλωμα συντονισμού μπορεί να είναι ένας συντονιστής τύπου Hartley ή Colpitts. Ένα φίλτρο υψηλών συχνοτήτων στην είσοδο του ενισχυτή RF αποκόπτει τις μη επιθυμητές συχνότητες. Το κύκλωμα μίξης μετατρέπει το σήμα RF σε ένα σήμα ενδιάμεσης συχνότητας στα 39.5MHz.

Ο ενισχυτής και ο ταλαντωτής RF χρησιμοποιούν κυκλώματα συντονισμού LC. Δεδομένου ότι η συχνότητα συντονισμού είναι αυτή του φέροντος η οποία είναι αρκετά υψηλή (στην τάξη των 370–862 MHz).

9.2.2 Κύκλωμα Μίξης

Ο στόχος του κυκλώματος μίξης είναι η αλλαγή της συχνότητας από την τιμή του φέροντος στα UHF σε μια ενδιάμεση συχνότητα (Intermediate Frequency, IF). Η ενδιάμεση συχνότητα είναι κοινή για όλα τα κανάλια στα οποία μπορεί ο δέκτης να συντονιστεί. Η τεχνική υποβιβασμού της συχνότητας σε μια κοινή ενδιάμεση συχνότητα ονομάζεται υπερ-ετεροδύναση (superheterodyne).

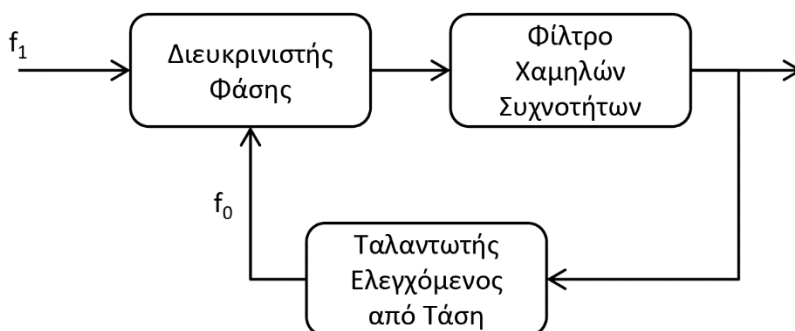
Ένα τρανζίστορ δημιουργεί ταλάντωση στη συχνότητα f_o , η οποία είναι κατά 39,5MHz υψηλότερη από τη συχνότητα του καναλιού f_c . Το μη γραμμικό τμήμα της χαρακτηριστικής του τρανζίστορ χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει το άθροισμα (f_o+f_c) και τη διαφορά (f_o-f_c) των δύο συχνοτήτων μαζί με τις συχνότητες f_o και f_c . Το κύκλωμα συντονισμού, με τη βοήθεια και του σχετικού φίλτρου, επιλέγει τη συνιστώσα με τη διαφορά των συχνοτήτων $f_o-f_c=39,5\text{MHz}$.

Κατά τον αυτόματο συντονισμό των καναλιών το κύκλωμα συντονισμού σαρώνει ολόκληρη την τηλεοπτική μπάντα, σταματώντας κάθε φορά που συναντά κάποιο σταθμό ώστε να τον αποθηκεύσει στη μνήμη.

9.2.2.1 Σύνθεση Συχνότητας

Η σύνθεση συχνότητας επιτρέπει την επιλογή του αριθμού ενός καναλιού (στην μπάντα των VHF ή των UHF) και τον συντονισμό στην αντίστοιχη συχνότητα. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια ενός σταθερού κρυσταλλικού ταλαντωτή σε ένα κύκλωμα / βρόχο κλειδώματος φάσης (Phase Locked Loop, PLL). Ο βρόχος κλειδώματος φάσης επιτυγχάνει σταθερότητα στο σήμα εξόδου της ενδιάμεσης συχνότητας. Χρησιμοποιείται σε μια σειρά κυκλωμάτων συμπεριλαμβανομένου και του αποκωδικοποιητή χρώματος.

Η αρχή λειτουργίας παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα. Αποτελείται από έναν διευκρινιστή φάσης, ένα Φίλτρο Χαμηλών Συχνοτήτων και έναν ταλαντωτή ελεγχόμενο από τάση (Voltage Controlled Oscillator, VCO).



Εικόνα 9.3 Βρόχος κλειδώματος φάσης.

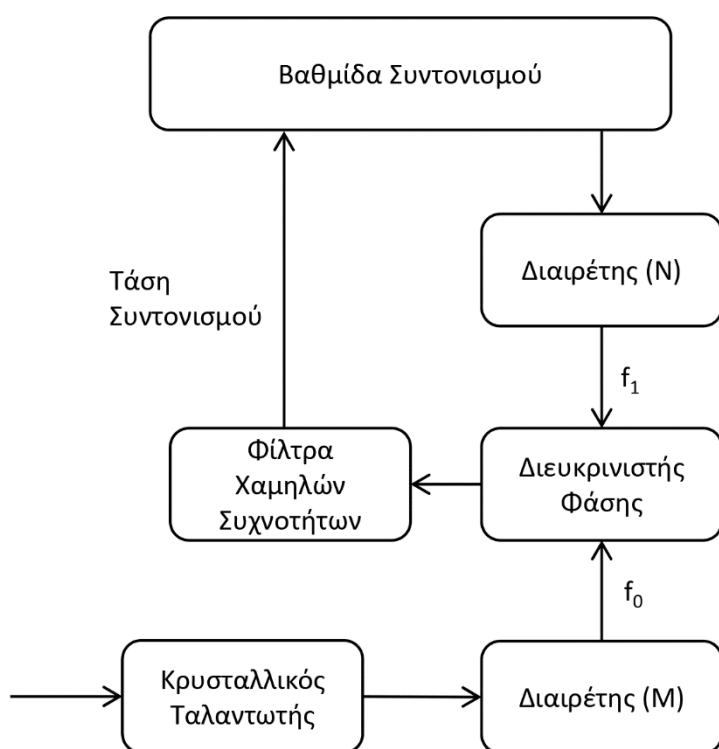
Χωρίς σήμα (ανάδρασης) στον διευκρινιστή φάσης, ο ταλαντωτής δημιουργεί μια συγκεκριμένη συχνότητα f_o . Με την είσοδο ενός σήματος ο διευκρινιστής συγκρίνει τη συχνότητα του σήματος εισόδου έστω f_1 με αυτή που δημιουργείται από τον ταλαντωτή (το VCO), δηλαδή την f_o . Τυχόν διαφορά στις συχνότητες αυτές συνεπάγεται μια σταθερή τάση η οποία αφού φιλτραριστεί (ώστε να αποκοπούν οι υψηλές συχνότητες) εισάγεται στον (στην ουσία ελέγχει τον) ταλαντωτή και τον κάνει να αλλάξει τη συχνότητα του. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να εξισωθούν οι δύο συχνότητες, οπότε λέμε ότι το PLL έχει κλειδώσει.

9.2.2.2 Συντονισμός με Σύνθεση

Ο συντονισμός με σύνθεση συχνότητας (*Frequency Synthesized Tuning, FST*) δημιουργεί μια συχνότητα με σταδιακή αύξηση της τιμής. Στον συντονισμό με τη σύνθεση συχνότητας η τάση συντονισμού προέρχεται από ένα προγραμματιζόμενο PLL το οποίο αποτελείται από τον τοπικό ταλαντωτή, έναν ελεγχόμενο βαθμονομητή (scaler), έναν διευκρινιστή φάσης και ένα φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων.

Ένα δείγμα της συχνότητας του τοπικού (κρυσταλλικού) ταλαντωτή εισέρχεται στον διευκρινιστή φάσης μέσω ενός ελεγχόμενου διαιρέτη, ο οποίος ονομάζεται προ-διαμορφωτής. Ο ελεγχόμενος διαιρέτης διαιρεί τη συχνότητα του τοπικού ταλαντωτή με την τιμή M οπότε έστω προκύπτει η τιμή της συχνότητας f_0 .

Η βαθμίδα συντονισμού λειτουργεί σε μια συχνότητα την οποία θέλουμε να προσαρμόσουμε. Για τον σκοπό αυτό διαιρούμε τη συχνότητα αυτή με τη βοήθεια ενός ελεγχόμενου διακόπτη. Αυτός διαιρεί τη συχνότητα του σήματος με την τιμή N . Η τιμή N προκύπτει από την επιλογή του καναλιού και καθορίζει την συχνότητα f_1 η οποία εισέρχεται ως είσοδος στο διευκρινιστή φάσης. Ο διευκρινιστής συγκρίνει τη συχνότητα f_1 με μια συχνότητα αναφοράς f_0 η οποία προέρχεται από τον τοπικό ταλαντωτή. Οι βασικές βαθμίδες φαίνονται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 9.4 Συντονισμός με σύνθεση.

Η έξοδος σταθερής τάσης η οποία δημιουργείται είναι ανάλογη της διαφοράς των συχνοτήτων. Μετά το φιλτράρισμα η έξοδος αυτή δίνεται ως είσοδος στη βαθμίδα συντονισμού ώστε να τροποποιήσει κατάλληλα τη συχνότητά του και σταδιακά η τάση που προκύπτει από τον διευκρινιστή να μηδενιστεί. Η σταθερότητα του κυκλώματος συντονισμού εξαρτάται από τη σταθερότητα της συχνότητας αναφοράς. Για αυτόν τον λόγο η συχνότητα η οποία προέρχεται από τον κρυσταλλικό ταλαντωτή διαιρείται με έναν μεγάλο αριθμό ώστε να ενισχυθεί περαιτέρω η σταθερότητα. Η λειτουργία της σύνθεσης δίνει εν γένει πολύ σταθερή έξοδο χωρίς μετατόπιση συχνότητας.

9.2.2.3 Μίξη

Το σήμα ενδιάμεσης συχνότητας δημιουργείται μετά τη μίξη του σήματος RF με το σήμα του τοπικού ταλαντωτή. Ο τοπικός ταλαντωτής δημιουργεί ένα σήμα του οποίου η συχνότητα είναι κατά 39,5MHz υψηλότερη από τη συχνότητα του φέροντος του καναλιού. Η ενδιάμεση συχνότητα προκύπτει από την

επιλογή, μέσω φιλτραρίσματος, του όρου που αντιστοιχεί στη διαφορά μεταξύ των δύο συχνοτήτων: της συχνότητας του τοπικού ταλαντωτή μείον τη συχνότητα του εισερχόμενου σήματος.

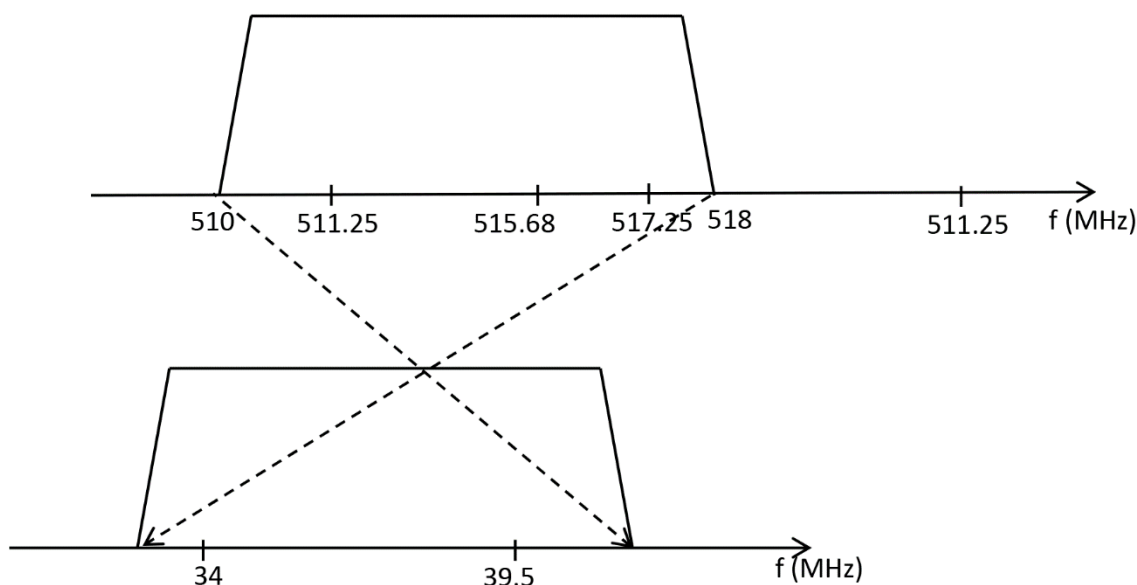
Εάν, λοιπόν, ο δέκτης συντονίζεται σε ένα κανάλι στα 511,25 MHz τότε ο τοπικός ταλαντωτής λειτουργεί στη συχνότητα

$$f_o = 511,25 + 39,5 = 550,75 \text{ MHz.} \quad (1)$$

Η φέρουσα συχνότητα του ήχου είναι πιο υψηλή από αυτή της φέρουσας του βίντεο (ανάλογα, βέβαια, με το σύστημα που χρησιμοποιείται). Ας θεωρήσουμε ότι είναι υψηλότερη κατά 5,5 MHz οπότε η φέρουσα του ήχου βρίσκεται στα:

$$511,25 + 5,5 = 516,75 \text{ MHz.} \quad (2)$$

Μετά τη μίξη, η φέρουσα του βίντεο είναι στα 39,5 MHz και η δε φέρουσα του ήχου είναι κατά 5,5 MHz πιο χαμηλά, δηλαδή στα 34 MHz, λόγω της μίξης. Το αποτέλεσμα της μίξης παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα. Στο πάνω μέρος παρατηρούμε το φάσμα του τηλεοπτικού καναλιού καθώς αυτό εισέρχεται στη βαθμίδα της λήψης. Έστω ότι μας απασχολεί το κανάλι 26 των UHF το οποίο εκκινεί στα 510 MHz. Στο κάτω μέρος παρατηρούμε το φάσμα του σήματος που προκύπτει κατόπιν της μίξης, του πολλαπλασιασμού, δηλαδή, με το σήμα του τοπικού ταλαντωτή και στη συνέχεια του φιλτραρίσματος ώστε να παραμείνουν μόνο οι ενδιάμεσες συχνότητες.



Εικόνα 9.5 Μίξη.

Παρατηρούμε ότι το φάσμα του καναλιού αναστρέφεται λόγω της μίξης και οι συχνότητες των φερουσών υποβιβάζονται σε αυτές που ονομάζουμε ενδιάμεσες συχνότητες (34 MHz για τον ήχο και 39,5 MHz για το σήμα της φωτεινότητας). Ανεξαρτήτως του καναλιού στο οποίο συντονίζεται ο δέκτης, οι ενδιάμεσες συχνότητες έχουν τις ίδιες τιμές.

9.2.3 Απόκριση Ενδιάμεσης Συχνότητας

Η απόκριση συχνότητας της βαθμίδας ενδιάμεσης συχνότητας στοχεύει (α) στο να περιορίσει την επίδραση του προηγούμενου και του επόμενου καναλιού, μηδενίζοντας τα σημεία (συχνότητες) όπου υπάρχει η

μεγαλύτερη ισχύς και (β) στο να εξασφαλίσει ότι η ενίσχυση του σήματος που εισέρχεται στον ενισχυτή ενδιάμεσης συχνότητας είναι τέτοια που δεν θα παραμορφώσει το σήμα.

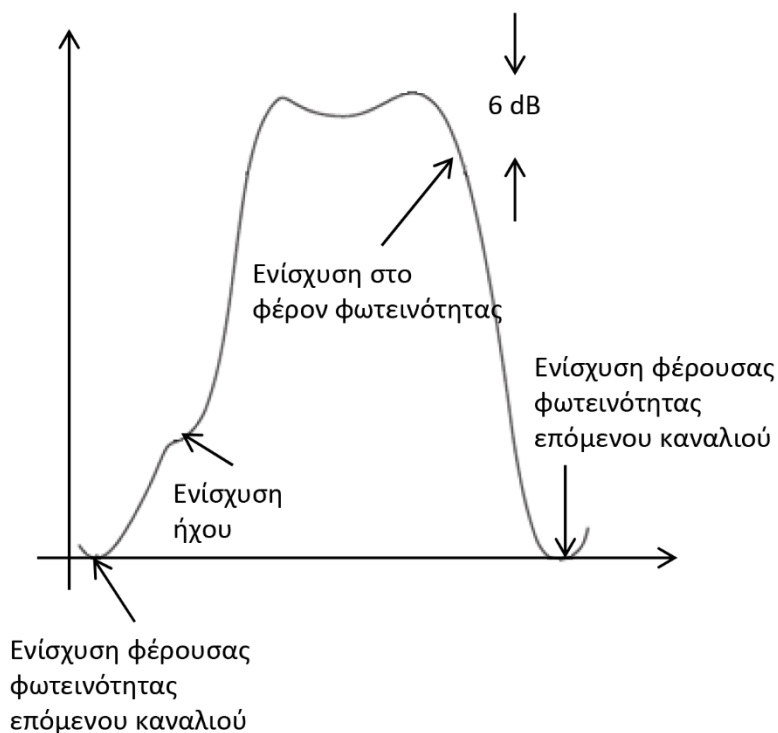
Ο περιορισμός της επίδρασης του προηγούμενου και του επόμενου καναλιού γίνεται ως εξής:

- Απόρριψη του φάσματος από το επόμενο κανάλι για να περιοριστεί κατά το δυνατόν ο θόρυβος. Η συχνότητα του φέροντος της φωτεινότητας του επόμενου καναλιού είναι κατά 8 MHz κάτω από τη φέρουσα του βίντεο, δηλαδή στα $39,5-8=31,5$ MHz.
- Η απόρριψη του ήχου του προηγούμενου καναλιού. Η ενδιάμεση συχνότητα της φέρουσας του ήχου είναι κατά 8 MHz υψηλότερη από τη φέρουσα του ήχου, δηλαδή στα $34+8=42$ MHz.

Αναφορικά με τη μορφή του κέρδους για την ενίσχυση ενδιάμεσης, ο ενισχυτής πρέπει:

- Να πετύχει απόσβεση 26 dB στα 33,5 MHz. Αυτό γίνεται για να αποτρέψει παρεμβολή μεταξύ των σημάτων του βίντεο και του ήχου. Στο σημείο παρατηρούμε ένα σκαλοπάτι ώστε να σταθεροποιηθεί η ενίσχυση του σήματος ήχου. Το σκαλοπάτι αυτό αποτρέπει τη διαμόρφωση κατά πλάτος του σήματος του ήχου (γιατί σε μια τέτοια περίπτωση θα έπρεπε να θεωρηθεί τμήμα του σήματος βίντεο και θα γινόταν αποδιαμόρφωση αυτού, δημιουργώντας θόρυβο στην οθόνη).
- Να επιτύχει μια σταθερή πτώση στο πλάτος από τα 38 MHz μέχρι και τα 41 MHz για να εξυπηρετήσει τη διαμόρφωση υπολειπόμενη πλευρικής ζώνης και να δώσει έμφαση στις συχνότητες που μεταδίδονται μία μόνο φορά.

Στο επόμενο σχήμα αναπαρίσταται η απόκριση συχνότητας του ενισχυτή ενδιάμεσης συχνότητας ενός τηλεοπτικού δέκτη.



Εικόνα 9.6 Απόκριση συχνότητας ενισχυτή ενδιάμεσης συχνότητας.

Παρατηρούμε ότι στα 4,43 MHz από τη φέρουσα του βίντεο βρίσκεται η υποφέρουσα του χρώματος η οποία κατά την ενδιάμεση συχνότητα πέφτει στα $39,5-4,43=35,07$ MHz και απέχει λίγο από τη φέρουσα του ήχου IF. Για να αποφευχθεί παρεμβολή θα πρέπει το πλάτος της απόκρισης να καλύπτει τη φέρουσα του χρώματος, αλλά στη συνέχεια να πέφτει σχετικά απότομα ώστε να μην ενισχύεται το κομμάτι που αφορά τον

ήχο. Εάν δεν συμβεί αυτό θα έχουμε *συνδιαμόρφωση* μεταξύ του φέροντος του χρώματος στα 4,43 MHz και του φέροντος του ήχου στα 5,5 MHz.

9.2.4 Φωρατής Οπτικού Σήματος

Κατά τη διαμόρφωση πλάτους του σήματος βίντεο η χρήσιμη πληροφορία, την οποία θέλουμε να ανακτήσουμε κατά την αποδιαμόρφωση, βρίσκεται στην αλλαγή του πλάτους στο φέρον. Αυτό σημαίνει ότι ο φωρατής εικόνας πρέπει να δημιουργήσει εκ νέου την περιβάλλουσα η οποία αντιστοιχεί στο αρχικό σήμα, απομακρύνοντας ταυτόχρονα το φέρον σήμα το οποίο έχει την υψηλή συχνότητα.

Η αποδιαμόρφωση (φώραση) γίνεται με μια δίοδο ανόρθωσης και ένα Φίλτρο Χαμηλών Συχνοτήτων. Ο φωρατής πρέπει να έχει μικρότερη σταθερά χρόνου από τον κύκλο του σήματος εικόνας που είναι στα 5,5 MHz και μεγαλύτερο από έναν κύκλο της φέρουσας συχνότητας που είναι στα 39,5 MHz.

Ο *διαχωριστής παλμών* διαχωρίζει τους παλμούς στο σύνθετο βίντεο και τους διακρίνει στους παλμούς γραμμής και πεδίου. Η διαδικασία αυτή πρέπει να είναι ανεξάρτητη από το περιεχόμενο της εικόνας αλλά και του πλάτους του σήματος βίντεο. Όπως έχουμε δει στα προηγούμενα, οι παλμοί επιστροφής (οριζόντιοι και κατακόρυφοι) καταλαμβάνουν περίπου το 25% του συνολικού σήματος.

Ο παλμός επιστροφής γραμμής (οριζόντιος) είναι ένας απλός παλμός, ενώ ο παλμός πεδίου αποτελείται από μία κυματομορφή διαμορφωμένη με βάση το μήκος των παλμών (Pulse Width Modulation, PWM) η οποία αποτελείται από πέντε διαδοχικούς παλμούς με συχνότητα διπλάσια αυτής των παλμών γραμμής.

9.2.5 Διαχείριση Πληροφορίας Χρώματος

Η πληροφορία του χρώματος διαμορφώνεται με διπλευρική διαμόρφωση καταπιεσμένου φέροντος (Double Side Band Suppressed Carrier, DSB-SC) με το φέρον στα 4,43-MHz. Τα δύο επιμέρους σήματα που αποτελούν το χρώμα διαμορφώνονται με διαφορά φάση 90°, οπότε επιτυγχάνεται ορθογωνική διαμόρφωση (Quadrature Amplitude Modulation, QAM). Όπως είδαμε οι χρωμοδιαφορές C_b και C_r , μετατρέπονται σε σήματα U και V και διαμορφώνουν το υποφέρον κατά QAM. Το φέρον αυτό αποτελεί και τμήμα του σήματος σύνθετου βίντεο.

Στον δέκτη η πληροφορία του χρώματος διαχωρίζεται από το σήμα φωτεινότητας με χρήση ενός ειδικού φίλτρου (Combfilter), αποκωδικοποιείται και εφαρμόζεται σε μήτρα η οποία επαναφέρει το σήμα στην μορφή RGB ώστε να εφαρμοστεί στον καθοδικό σωλήνα. Οι βασικές βαθμίδες για την επεξεργασία του σήματος βίντεο περιλαμβάνουν το τμήμα επεξεργασίας του σήματος burst, τη βαθμίδα αποκωδικοποίησης του χρώματος και τον ενισχυτή του σήματος χρώματος.

9.2.5.1 Επεξεργασία του σήματος burst

Το σήμα burst αποτελείται από ένα τμήμα του φέροντος του χρώματος ώστε να είναι δυνατή η επαναδημιουργία του στον δέκτη (αφού κατά τη διαμόρφωση το φέρον του χρώματος καταπνίγεται στο πλαίσιο της διαμόρφωσης DSB-SC). Συγκεκριμένα, το φέρον του χρώματος πρέπει να αποκατασταθεί με ακρίβεια τόσο όσον αφορά τη συχνότητα όσο και τη φάση. Τα δύο υπο-φέροντα διαφέρουν μεταξύ τους κατά 90° ώστε να είναι μεταξύ τους ορθογώνια.

Υπενθυμίζεται ότι ο βασικό σημείο διαφοροποίησης του συστήματος PAL σε σχέση με το σύστημα NTSC είναι η αλλαγή της φάσης της χρωμοδιαφοράς C_r ανά δύο γραμμές ώστε να αντιμετωπίζεται πιο αποτελεσματικά το τυχόν φασικό σφάλμα. Αυτό σημαίνει ότι στο σύστημα PAL το υποφέρον της χρωμοδιαφοράς του C_r η φάση πρέπει να αντιστρέφεται ανά δύο γραμμές (λόγω της αλλαγής φάσης κατά 180°).

Το σήμα burst αποτελείται από 10 κύκλους του υποφέροντος βρίσκεται στο πίσω μέρος του παλμού οριζόντιου συγχρονισμού. Το σήμα αυτό, πέρα από την επαναδημιουργία του χρωμοφέροντος, επιτρέπει τον αυτόματο έλεγχο του μέτρου του σήματος των χρωμάτων (Automatic Chrominance Control, ACC). Το ACC αποτρέπει την αλλαγή του μέτρου του σήματος χρώματος σε σχέση με το πλάτος του σήματος φωτεινότητας λόγω εξωτερικών συνθηκών της διάδοσης. Το κέρδος της βαθμίδας αυτής είναι μεταβλητό με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που ισχύει για τον ενισχυτή της ενδιάμεσης συχνότητας. Συγκεκριμένα, το σήμα ελέγχου του ACC είναι ανάλογο με το σήμα της χρωμικότητας. Το σήμα ελέγχου δεν προέρχεται από τις τιμές του

σήματος χρώματος (αφού αυτό είναι μεταβλητό) αλλά από το σήμα burst το οποίο έχει σταθερό πλάτος. Μια πτώση σε αυτό το πλάτος οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα στις εξωτερικές συνθήκες.

Στην περίπτωση αποστολής ασπρόμαυρου προγράμματος απαιτείται μια βαθμίδα η οποία απενεργοποιεί τον ενισχυτή του χρώματος. Η βαθμίδα αυτό ονομάζεται *φονέας χρώματος* και ενεργοποιείται με την απουσία του σήματος burst.

9.2.5.2 Αποδιαμόρφωση Χρώματος

Το σήμα χρωματικής πληροφορίας διαχωρίζεται από το σήμα φωτεινότητας πριν την αποδιαμόρφωση. Το εύρος ζώνης του σήματος χρώματος κυμαίνεται γύρω στο 1 MHz. Ο διαχωρισμός των σημάτων γίνεται με χρήση ενός ειδικού φίλτρου, το οποίο ονομάζεται φίλτρο χτένας (comb filter). Στη συνέχεια το σήμα χρώματος διαχωρίζεται στις δύο συνιστώσες U και V καθεμία από τις οποίες αποκωδικοποιείται ξεχωριστά ώστε να δώσει τις αντίστοιχες χρωμοδιαφορές. Τα δύο σήματα οδηγούνται στους αποδιαμορφωτές, οι οποίοι τροφοδοτούνται με το χρωμοφέρων στα 4,43MHz στη σωστή φάση για να έχουμε σύγχρονη αποδιαμόρφωση.

Τα σήματα (χρωμοδιαφορές) που προκύπτουν έχουν ήδη υποστεί διόρθωση γάμμα. Η δε τρίτη χρωμοδιαφορά προκύπτει από τις δύο προηγούμενες και την φωτεινότητα. Οι τρεις χρωμοδιαφορές μαζί με την φωτεινότητα οδηγούνται στην μήτρα RGB. Προσθέτοντας την φωτεινότητα στις χρωμοδιαφορές προκύπτουν οι αρχικές συνιστώσες R, G και B οι οποίες και οδηγούνται στη συσκευή απεικόνισης (για παλαιότερες συσκευές στον καθοδικό σωλήνα).

Λόγω της διαδικασίας αποκωδικοποίησης το σήμα του χρώματος έχει κάποια καθυστέρηση σε σχέση με το σήμα της φωτεινότητας. Για τον σκοπό αυτό το σήμα φωτεινότητας υφίσταται μια αντίστοιχη καθυστέρηση.

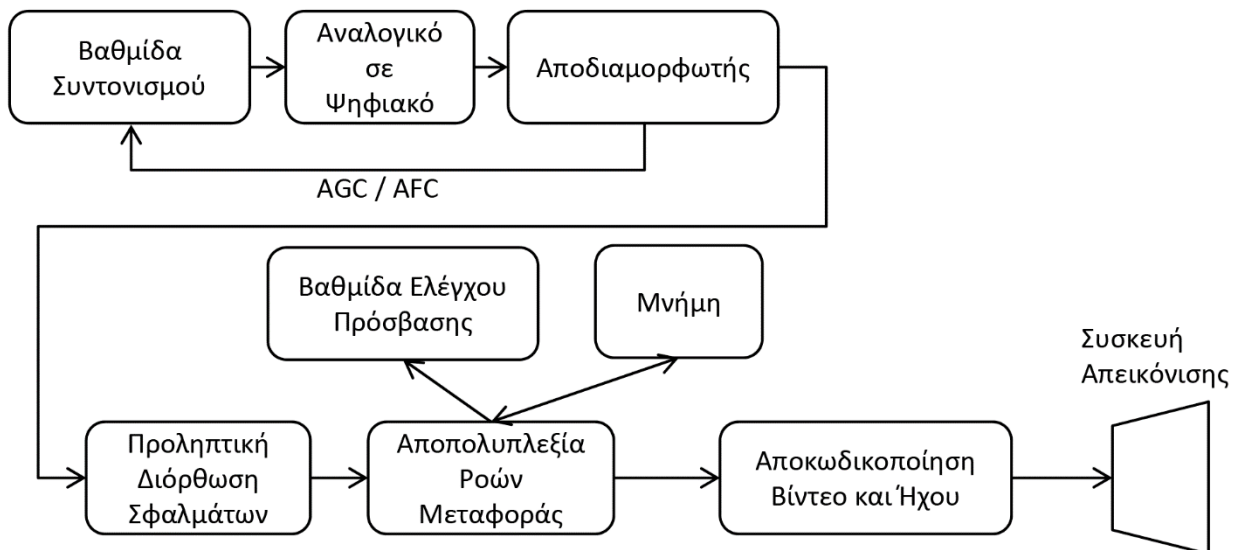
9.3 Ψηφιακός Δέκτης

Στην περίπτωση του ψηφιακού σήματος, ο δέκτης πρέπει να είναι σε θέση να λάβει, να επεξεργαστεί και να αποκωδικοποιήσει το ψηφιακό σήμα. Αυτό γίνεται είτε απευθείας με χρήση των βαθμίδων του δέκτη, είτε με τη βοήθεια ενός επιτραπέζιου αποκωδικοποιητή (Set Top Box, STB) με τη δεύτερη περίπτωση να αφορά κυρίως σε παλαιότερα μοντέλα τηλεοπτικών δεκτών χωρίς τη δυνατότητα αποκωδικοποίησης του ψηφιακού σήματος (63, 64).

Οι βασικές λειτουργίες του τηλεοπτικού δέκτη στην περίπτωση του ψηφιακού σήματος, περιλαμβάνουν:

- Την επιλογή και τον συντονισμό στο κανάλι.
- Την εξαγωγή των δεδομένων που αφορούν το πρόγραμμα.
- Την αποκωδικοποίηση των δεδομένων του προγράμματος.
- Τον έλεγχο των δικαιωμάτων του χρήστη και
- Την αναπαραγωγή του βίντεο, του ήχου και των τυχόν υπηρεσιών στη συσκευή του χρήστη.

Το επόμενο σχήμα δείχνει τα βασικά στοιχεία ενός ψηφιακού αποκωδικοποιητή.



Εικόνα 9.7 Βασικές βαθμίδες ψηφιακού δέκτη.

Περιγράφουμε στη συνέχεια συνοπτικά τα βασικά βήματα που εκτελούνται. Το ψηφιακό σήμα εισέρχεται στη συσκευή του χρήστη με τρόπο αντίστοιχο με την περίπτωση του αναλογικού σήματος, με χρήση της κεραίας επίγειας λήψης. Στη συνέχεια το υψηλής συχνότητας σήμα μετατρέπεται σε σήμα ενδιάμεσης συχνότητας.

Η βαθμίδα συντονισμού εξαρτάται από το είδος της μετάδοσης (επίγειας, δορυφορικής και καλωδιακής). Για τον σκοπό αυτό αποτελείται από το κύκλωμα συντονισμού (tuner), τον μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό (ADC), τον αποδιαμορφωτή και τη βαθμίδα προληπτικής διόρθωσης σφαλμάτων. Εάν απαιτείται έλεγχος πρόσβασης ο αποπλέκτης αποστέλλει τη ροή στη βαθμίδα ελέγχου πρόσβασης (Conditional Access Module, CAM), η οποία ελέγχει τα δικαιώματα του χρήστη στο συγκεκριμένο πρόγραμμα ή υπηρεσία. Ο έλεγχος αυτός γίνεται συνήθως με τη συνεργασία υλικού (για παράδειγμα, μιας έξυπνης κάρτας) το οποίο διαπιστώνει την ταυτότητα του αποκωδικοποιητή.

Στην περίπτωση που ο έλεγχος έχει θετικό αποτέλεσμα (ή εάν δεν απαιτείται κάποιος έλεγχος αφού π.χ. το πρόγραμμα διατίθεται ελεύθερα), η ροή μεταφοράς αποστέλλεται στον αποπλέκτη. Το επόμενο βήμα αφορά την εξαγωγή της ροής μεταφοράς MPEG (Transport Stream) που αφορά το πρόγραμμα που έχει επιλέξει ο χρήστης. Όπως έχει συζητηθεί στα προηγούμενα, η ροή μεταφοράς αποτελείται από πακέτα των 204 Bytes τα οποία ανήκουν σε ένα ή περισσότερα τηλεοπτικά προγράμματα και χρειάζεται να υποστούν αποπολυπλεξία με χρήση της αντίστοιχης βαθμίδας.

Η βαθμίδα αυτή (αποπλέκτης) επιλέγει τα πακέτα τα οποία αφορούν το συγκεκριμένο πρόγραμμα (με χρήση των σχετικών πινάκων και του αναγνωριστικού πεδίου PID) όπου περιγράφονται οι ροές μεταφοράς. Τα επιλεγμένα πακέτα ενώνονται εκ νέου και ανασυνθέτουν τις πακετοποιημένες στοιχειώδεις ροές (Packetized Elementary Stream, PES) του προγράμματος. Με τη βοήθεια μνήμης αποθηκεύεται προσωρινά το περιεχόμενο μέχρι να φτάσει στον αποκωδικοποιητή.

Ο αποκωδικοποιητής MPEG αποκωδικοποιεί το βίντεο και τον ήχο από τις πακετοποιημένες στοιχειώδεις ροές (PES). Συγκεκριμένα μετατρέπει τις ροές PES του βίντεο στα αρχικά σήματα: την φωτεινότητα Y και τις χρωμοδιαφορές Cb και Cr. Οι εικόνες δημιουργούνται εκ νέου από τα πλαίσια τύπου I, P και B. Η σύνθεση αυτή προϋποθέτει την ταυτόχρονη αποθήκευση αυτών των πλαισίων, με τη βοήθεια της μνήμης της συσκευής. Τα τρία επιμέρους σήματα στη συνέχεια αποστέλλονται στη συσκευή απεικόνισης.

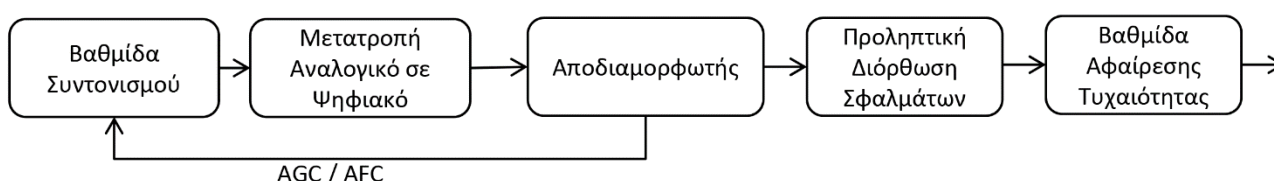
Τα πακέτα του ήχου αποκωδικοποιούνται ώστε να παράγουν τα δύο αναλογικά σήματα από τα οποία προέρχονται το δεξί και το αριστερό. Αντίστοιχη μνήμη χρησιμοποιείται και υπάρχει μια καθυστέρηση (περίπου 1 second) για τον συγχρονισμό βίντεο και ήχου. Αυτό συμβαίνει επειδή η αποκωδικοποίηση του βίντεο απαιτεί περισσότερο χρόνο σε σχέση με την αντίστοιχη του ήχου.

9.3.1 Συντονισμός και Αποκωδικοποίηση Καναλιού

Οι λειτουργίες του αποκωδικοποιητή καναλιού εξαρτώνται από τον τύπο του δέκτη (επίγειος, δορυφορικός ή καλωδιακός, DVB-S, DVB-T και DVB-C αντίστοιχα). Η βαθμίδα εισόδου αποτελείται από τα εξής βασικά υποσυστήματα:

- Βαθμίδα συντονισμού.
- Μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό.
- Αποδιαμορφωτή OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) στην περίπτωση της επίγειας λήψης.
- Βαθμίδα προληπτικής διόρθωσης σφαλμάτων (Forward Error Correction, FEC).
- Βαθμίδα αφαίρεσης τυχαιότητας.

Οι βαθμίδες αυτές αναπαρίστανται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 9.8 Βασικές βαθμίδες ψηφιακού δέκτη.

Η βαθμίδα συντονισμού λαμβάνει τα σήματα τα οποία έχουν διαμορφωθεί στη μπάνα των UHF μέσω της κεραίας, επιλέγει το κανάλι που επιθυμεί ο χρήστης και μετατρέπει το RF σήμα σε σήμα ενδιάμεσης συχνότητας. Στη συνέχεια λαμβάνεται το σήμα βασικής ζώνης διατηρείται με κεντρική συχνότητα περί τα 4,75 MHz (χαμηλή ενδιάμεση συχνότητα - Low IF). Η υποβίβαση της συχνότητας γίνεται με τη βοήθεια μίξης και ενός Φίλτρου Χαμηλών Συχνοτήτων. Όπως είδαμε και στην περίπτωση του αναλογικού σήματος με τη μίξη αλλάζει η συχνότητα του σήματος εισόδου.

Μετά τη διέλευση από το φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων, η έξοδος του φίλτρου περιέχει τις συχνότητες από τα φέροντα του OFDM. Το άθροισμα αυτών των συνιστωσών δίνει το βασικό σήμα. Ο αποδιαμορφωτής OFDM ανακτά την αρχική διαμορφώνουσα ροή μεταφοράς την ψηφιοποιείται με χρήση του μετατροπέα ADC και την αποστέλλει στον αποκωδικοποιητή FEC.

9.3.1.1 Αποδιαμόρφωση OFDM

Η ανάκτηση της αρχικής ροής από τα δύο διαμορφωμένα κατά φάση φέροντα I και Q περιλαμβάνει δύο στάδια: την ανάκτηση της φάσης και την ανάκτηση των δεδομένων. Η ανάκτηση της φάσης αντιλαμβάνεται τις αλλαγές στη φάση του φέροντος και η ανάκτηση των δεδομένων επαναδημιουργεί την αρχική ροή. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται αντιστοίχιση συμβόλου σε αλληλουχία bits. Υπενθυμίζεται ότι στο OFDM χρησιμοποιείται μεγάλο πλήθος από φέροντες (1.705 και 6.817 στους τρόπους 2K και 8K αντίστοιχα). Κάθε φέροντα διαμορφώνεται με χρήση ενός συμβόλου που αποτελείται από 4 bits (16-QAM) ή 6 bits (64-QAM). Ο σκοπός του αποδιαμορφωτή είναι να ανακτήσει τα 4-bit ή τα 6-bit όπως αυτά αντιπροσωπεύονται στη μετατόπιση φάσης των φερόντων.

Κατά την αποδιαμόρφωση διαχωρίζεται η φάση από τη συνιστώσα με τη συχνότητα η οποία είναι διπλάσια από αυτή του φέροντος. Παρόλο που η χρήση φίλτρου είναι μια πρώτη λύση, αυτό δεν μπορεί να λειτουργήσει για το μεγάλο πλήθος από φέροντα που υπάρχουν στο OFDM. Η διαδικασία περιπλέκεται από το γεγονός ότι κάθε τοπικός ταλαντωτής θα δημιουργούσε σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα φέροντα πολλά διαφορετικά αθροίσματα και διαφορές. Με κάποιον τρόπο πρέπει να αφαιρεθούν όλα τα σήματα πλην αυτών που αφορούν τις φάσεις.

Ο ολοκληρωτής συνδράμει προς αυτήν την κατεύθυνση. Το ολοκλήρωμα ενός ημιτόνου είναι μηδενικό στο διάστημα ενός πλήρους κύκλου (ή περισσότερων, ακέραιου αριθμού, κύκλων). Στην περίπτωση του OFDM η απόσταση μεταξύ των συχνοτήτων των φερόντων είναι συγκεκριμένη και μάλιστα 4.464 Hz για

τον τρόπο 2K και 1.116 Hz για τον τρόπο 8K. Κάθε φέρον έχει συχνότητα η οποία είναι πολλαπλάσιο του 4.464 ή του 1.116. Αυτό σημαίνει ότι αν ολοκληρωθεί το βασικό σήμα όλα τα φέροντα θα δώσουν μηδενικό αποτέλεσμα και θα παραμείνει μόνο η φάση κάθε φέροντος η οποία αντιπροσωπεύει τα μεταδιδόμενα δεδομένα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα φέροντα.

Ο αποκωδικοποιητής FEC ανακτά τα bits από τα διαμορφωμένα κατά QPSK φέροντα και διατάσσει την πληροφορία με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η ανίχνευση σφαλμάτων. Η βαθμίδα FEC αποτελείται από τρεις επιμέρους βαθμίδες:

- Τη βαθμίδα αποκωδικοποίησης Viterbi η οποία χρησιμοποιεί την αρχικά επιλεγμένη συνελκτική κωδικοποίηση για να διαπιστώσει κατά πόσο ένα bit είναι 0 ή 1.
- Τη βαθμίδα απεμπλοκής, επαναφοράς δηλαδή στην αρχική σειρά (de-interleaver) η οποία επανατοποθετεί τα σύμβολα και τα bits στην αρχική σειρά πριν τη διεμπλοκή τους.
- Τον αποδιαμορφωτή Reed–Solomon (RS) ο οποίος ελέγχει και αποφασίζει κατά πόσο ένα πακέτο περιέχει σφάλμα. Εάν όντως περιέχεται ένα σφάλμα, η βαθμίδα FEC θα επιχειρήσει να το διορθώσει. Εάν αποτύχει τότε το πακέτο επισημαίνεται ως εσφαλμένο και απορρίπτεται.

Στο τέλος της διαδικασίας προκύπτουν πακέτα των 188 Bytes. Προτού αυτά δοθούν στη διαδικασία αποπολυπλεξίας, αίρεται η ψευδοτυχαία διασπορά ενέργειας που είχε εφαρμοστεί αρχικά με τον αντίστροφο αλγόριθμο. Αυτό γίνεται με τη βαθμίδα αφαίρεσης της τυχαιότητας. Στην πραγματικότητα, οι βαθμίδες αυτές περιλαμβάνονται σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα με ενσωματωμένο επεξεργαστή το οποίο είναι σε θέση να πραγματοποιήσει διαφορετικά είδη αποκωδικοποίησης συμπεριλαμβανομένων των BPSK, QPSK, 64-QAM, 256-QAM.

9.3.2 Αποπολυπλεξία TS και Αποκωδικοποίηση MPEG

Ο απεμπλοκέας της ροής μεταφοράς και ο αποκωδικοποιητής ήχου και βίντεο βρίσκονται συνήθως σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα με είσοδο τη ροή μεταφοράς η οποία αποτελείται από βίντεο, ή και υπηρεσίες τεσσάρων ή περισσότερων προγραμμάτων. Η ροή μεταφοράς αποτελείται από πακέτα των 188-byte. Αρχικά εξετάζεται η τυχόν ανάγκη για ελεγχόμενη πρόσβαση. Στην περίπτωση που απαιτείται η σχετική βαθμίδα (CAM) επιβεβαιώνει ότι ο χρήστης έχει πρόσβαση, η ροή αποκρυπτογραφείται και επιστρέφει στον αποπλέκτη για την περαιτέρω επεξεργασία. Στην περίπτωση που ο θεατής δεν έχει τα σχετικά δικαιώματα η ροή μεταφοράς απορρίπτεται με σχετική ενημέρωση του χρήστη για το πρόβλημα.

Ο αποπλέκτης εξάγει τα πακέτα που αφορούν το συγκεκριμένο πρόγραμμα. Αρχικά εντοπίζει το πακέτο με κωδικό αναγνώρισης 0x00 (Packet Identification, PID=0). Αυτό το πακέτο περιέχει τον πίνακα συσχέτισης προγραμμάτων (Program Association Table, PAT) όπου περιέχεται το PID του πακέτου που περιέχει τον πίνακα αντιστοίχισης ροών σε πρόγραμμα (Program Map Table, PMT). Μέσω του PMT ο αποπλέκτης εντοπίζει τα PID για τα PES που αποτελούν το πρόγραμμα (βίντεο, ήχο και υπηρεσίες). Έχοντας αυτήν την πληροφορία εξάγει τα πακέτα από το Transport Stream. Τα πακέτα αυτά δημιουργούν τις αρχικές στοιχειώδεις ροές για βίντεο, ήχο λοιπές υπηρεσίες.

Ο αποκωδικοποιητής βίντεο του MPEG επαναδημιουργεί την εικόνα στην αρχική της μορφή. Αυτό περιλαμβάνει την αποσυμπίεση των δεδομένων, τον ανάστροφο Διακριτό Μετασχηματισμό Συνημιτόνου (Inverse DCT, IDCT) και την ανακατασκευή από τα πλαίσια τύπου I, P και B ώστε να προκύψουν τα σήματα Y , C_R και C_B . Στο πλαίσιο της διαδικασίας αυτής αποθηκεύονται ένα πλήθος από πλαίσια στη μνήμη.

Ο ήχος προκύπτει από τον αποπλέκτη στην μορφή πακέτων που περιέχουν δεδομένα διαμορφωμένα (κατά PCM, Pulse Code Modulation) μαζί με δεδομένα ελέγχου. Αυτά αποκωδικοποιούνται από τον αποκωδικοποιητή MPEG. Η αποκωδικοποίηση περιλαμβάνει την επαναδημιουργία των δύο σημάτων (δεξί και αριστερό) του ήχου. Η διεπαφή σειριακού PCM audio αποτελείται από τρεις γραμμές: τη γραμμή δεδομένων PCM και δύο ρολόγια ελέγχου το αριστερό και το δεξί. Τα δύο κανάλια ήχου πολυπλέκονται στο χρόνο και αποστέλλονται οι τιμές εναλλάξ για κάθε κανάλι. Η συχνότητα κάθε καναλιού είναι η μισή από τον ρυθμό δειγματοληψίας.

Η πληροφορία που αφορά τη συχνότητα δειγματοληψίας που είχε χρησιμοποιηθεί από την πλευρά του πομπού μεταδίδεται στον αποπλέκτη μέσω της ροής μεταφοράς. Η προσωρινή αποθήκευση δεδομένων ήχου γίνεται αντίστοιχα με χρήση μνήμης η οποία βέβαια προκαλεί κάποια καθυστέρηση.

9.4 Τεχνολογία Συσκευών Απεικόνισης

9.4.1 Τεχνολογία Καθοδικού Σωλήνα

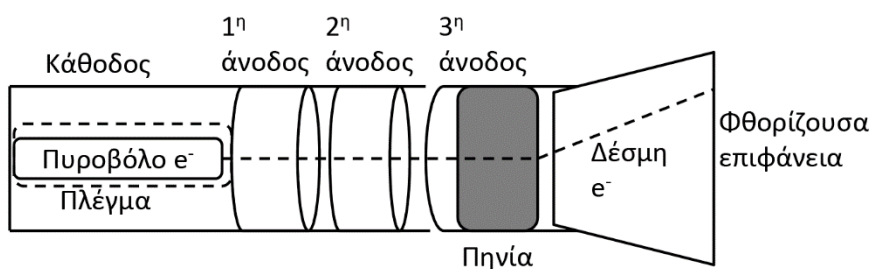
Η τεχνολογία οθονών καθοδικού σωλήνα (Cathode Ray Tube, CRT) αποτέλεσε τη βασική τεχνολογία η οποία χρησιμοποιήθηκε για αρκετές δεκαετίες και τον τελευταίο καιρό η χρήση της τείνει να περιοριστεί. Η συγκριμένη τεχνολογία έχει περάσει από διαδοχικά στάδια ωρίμανσης. Αυτά περιλαμβάνουν βελτιώσεις στα υλικά κατασκευής των οθονών, των επιμέρους εξαρτημάτων (για παράδειγμα του πυροβόλου ηλεκτρονίων) αλλά και την κατανάλωση ενέργειας.

Στις οθόνες CRT ένα πολυβόλο ηλεκτρονίων εκπέμπει μια δέσμη ηλεκτρονίων (ρυθμιζόμενης έντασης και κατεύθυνσης) η οποία εστιάζεται και επιταχύνει ώστε να προσπέσει στην οθόνη, η οποία λειτουργεί ως θετικά φορτισμένη άνοδος. Η οθόνη έχει υποστεί επικάλυψη με φθορίζον υλικό, οπότε όταν προσπίπτουν τα ηλεκτρόνια έχουμε το φαινόμενο της λάμψης / του φθορισμού. Το χρώμα εξαρτάται από τον τύπο του φθορίζοντος υλικού που χρησιμοποιείται. Για μονοχρωματική οθόνη, χρησιμοποιείται ένα απλό είδος φθορίζοντος υλικού. Για έγχρωμη οθόνη απαιτούνται τρία είδη φθορίζοντος υλικού τα οποία αντιπροσωπεύουν τα τρία βασικά χρώματα.

9.4.1.1 Μονοχρωματική Οθόνη

Η μονοχρωματική οθόνη αποτελείται από ένα πυροβόλο ηλεκτρονίων, μια συστοιχία από ανόδους και την επιφάνεια θέασης (την επιφάνεια, δηλαδή, που έχει υποστεί επίστρωση με το φθορίζον υλικό). Η δέσμη διέρχεται από τη συστοιχία των ανόδων, η οποία δημιουργεί επιτάχυνση (η 1η άνοδος είναι η άνοδος για επιτάχυνση), ηλεκτροστατική εστίαση (η 2η άνοδος) και την άνοδο υπερ-υψηλής τάσης (3η άνοδος στο σχήμα).

Η υπερ-υψηλή τάση (Extra High Tension, EHT) βρίσκεται στην περιοχή των 15–30 kV (η πρώτη τιμή αντιστοιχεί συνήθως στις ασπρόμαυρες οθόνες ενώ η δεύτερη στις έγχρωμες). Η απαίτηση για μια τόσο υψηλή τιμή προέρχεται από την ανάγκη να έλκει και να επιταχύνει τα ηλεκτρόνια τα οποία εκπέμπονται από το πολυβόλο. Οι βασικές βαθμίδες της οθόνης παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 9.9 Συνοπτικό διάγραμμα οθόνης CRT.

Η εκπομπή των ηλεκτρονίων εξαρτάται από το δυναμικό του πλαισίου, καθώς και από τη διαφορά δυναμικού μεταξύ της καθόδου και της ανόδου. Μία αύξηση αυτής της διαφοράς δυναμικού προκαλεί και αύξηση στο πλήθος των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται και αντίστροφα. Η ισχύς που απαιτείται από τα πηνία σάρωσης είναι συνάρτηση του σχήματος και της γεωμετρίας του σωλήνα (συγκεκριμένα εξαρτάται από το μέγεθος οθόνης και τη διάμετρο του λαιμού της οθόνης), καθώς και της γωνίας απόκλισης και της υπερ-υψηλής τάσης της τελικής ανόδου. Οι πραγματικές τιμές του δυναμικού στο σωλήνα εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά και το μέγεθος του καθοδικού σωλήνα.

Ενδεικτικές τιμές για μονοχρωματική οθόνη είναι οι ακόλουθες:

- Κάθοδος 70V
- Πλαίσιο 30V
- 1η άνοδος 300–400 V (άνοδος επιτάχυνσης)
- 2η άνοδος μεταβλητή τιμή μέχρι περίπου το 500V (άνοδος εστίασης)

- 3η άνοδος 15–20 kV (τελικό σημείο συστοιχίας ανόδων)

Το πυροβόλο ηλεκτρονίων και η συστοιχία ανόδων περιέχονται εντός ενός γυάλινου σωλήνα με κενό αέρος. Το εσωτερικό και το εξωτερικό του σωλήνα έχει επίστρωση από υλικό (συνήθως γραφίτη). Η εξωτερική επίστρωση συνδέεται με το σασί της συσκευής και η εσωτερική με την υπερ-υψηλή τάση. Το διαχωριστικό γυαλί μεταξύ τους λειτουργεί ως διηλεκτρικός πυκνωτής, οπότε τα υλικά αυτά λειτουργούν ως πυκνωτής.

Η δέσμη ηλεκτρονίων πρέπει να μπορεί να αποκλίνει οριζόντια και κατακόρυφα. Η απόκλιση γίνεται με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με τη βοήθεια δύο ειδών πηνίων, των πηνίων οριζόντιας και κατακόρυφης σάρωσης τα οποία βρίσκονται εντός του σωλήνα. Η γωνία της απόκλισης αποτελεί ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του σωλήνα CRT και κυμαίνεται μεταξύ 90° και 110°. Όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια της οθόνης, τόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι η γωνία απόκλισης και εξαρτάται από τη δύναμη του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από τα πηνία.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των οθονών CRT αποτελεί το μέγεθος της οθόνης το οποίο αφορά τη διαγώνιο, μετρούμενη σε ίντσες (συνήθως) ή σε εκατοστόμετρα.

$$1 \text{ inch} = 2.54 \text{ centimeter}$$

(3)

Βέβαια το μέγεθος της οθόνης δεν αντιστοιχεί ακριβώς στο μέγεθος της συσκευής, αφού υπάρχει και το εξωτερικό πλαίσιο. Επιπλέον οι συσκευές CRT δεν είναι σε θέση να προβάλλουν εικόνα στα άκρα της οθόνης. Μια οθόνη, για παράδειγμα, των 71 cm έχει ορατή επιφάνεια στα 66 cm. Οι ακριβείς διαστάσεις της οθόνης εξαρτώνται από την αναλογία των διαστάσεων για παράδειγμα 4:3 ή 16:9.

9.4.1.2 Έγχρωμες Οθόνες

Οι έγχρωμες οθόνες CRT έχουν τρία πυροβόλα ηλεκτρονίων, ένα για κάθε βασικό χρώμα, κάθε ένα από τα οποία είναι υπεύθυνο να βομβαρδίζει την οθόνη σε σημεία όπου υπάρχει επίστρωση φθορίζοντος υλικού διαφορετικού χρώματος (που αντιστοιχούν στα βασικά χρώματα). Τα φθορίζοντα σημεία είναι τοποθετημένα είτε σειριακά είτε σε τριγωνική μορφή (τριάδα τριών χρωμάτων). Οι τάσεις που απαιτούνται για τις έγχρωμες οθόνες είναι τυπικά μεγαλύτερες από τις μονόχρωμες και φθάνουν την περιοχή των 30 kV.

Η σωστή αναπαραγωγή των χρωμάτων απαιτεί οι τρεις δέσμες να χτυπούν τα σημεία όπου βρίσκονται οι συγκεκριμένες φθορίζουσες περιοχές. Η ιδιότητα αυτή σχετίζεται με την *καθαρότητα* της εικόνας που προβάλλεται. Η ρύθμιση της καθαρότητας επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση του μαγνητικού πεδίου, όπως αυτό δημιουργείται από τα πεδία σάρωσης. Η ρύθμιση αυτού του πεδίου επιτυγχάνει τη σωστή στόχευση των δεσμών και επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός ζεύγους διπολικών μαγνητών σε μορφή δακτυλίου στον λαιμό της οθόνης.

9.4.2 Επίπεδες Οθόνες

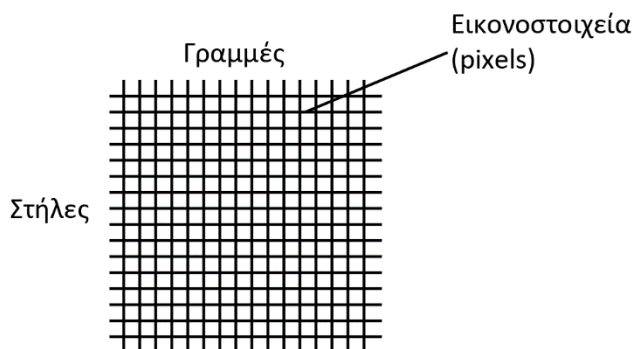
Για αρκετά χρόνια η τεχνολογία του καθοδικού σωλήνα αποτέλεσε τη βασική τεχνολογία στην κατασκευή των οθονών. Τα χαρακτηριστικά αυτού του τύπου των οθονών έχουν βελτιωθεί αισθητά, ωστόσο, η βασική πρόκληση του όγκου που καταλαμβάνουν λόγω του καθοδικού σωλήνα παραμένει. Εδώ και κάποια χρόνια οι τεχνολογίες των επίπεδων οθονών έχουν κερδίσει αισθητά έδαφος και αποτελούν πλέον τη βασική τεχνολογική λύση. Οι επίπεδες οθόνες έχουν μια σειρά πλεονεκτημάτων σε σχέση με αυτές του καθοδικού σωλήνα, όπως τον μικρότερο όγκο (αναφορικά κυρίως με το πάχος της) και το μικρότερο βάρος της συσκευής, την ψηφιακή λειτουργία, τη μεγαλύτερη επιφάνεια θέασης και την καλύτερη ποιότητα της εικόνας η οποία δεν επηρεάζεται από τον θόρυβο και τη μεγαλύτερη ανάλυση της οθόνης.



[Παρατίθεται ένα εισαγωγικό βίντεο για τη λειτουργία των επίπεδων οθονών CCD.](#)

Οι επίπεδες εικόνες αποτελούνται από ένα πλήθος εικονοστοιχείων τα οποία είναι γνωστά ως εικονοστοιχεία (pixels, picture elements) και τα οποία είναι τοποθετημένα σε μορφή πίνακα αποτελούμενου

από γραμμές και στήλες όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα. Για τη διαχείριση του χρώματος κάθε εικονοστοιχείου αυτό χωρίζεται σε τρία κελιά.



Εικόνα 9.10 Εικονοστοιχεία επίπεδης οθόνης.

Η ανάλυση σε μια επίπεδη οθόνη ορίζεται από το πλήθος των εικονοστοιχείων από τα οποία αποτελείται η οθόνη. Η ανάλυση ορίζεται ως γινόμενο X επί Y , όπου X και Y το πλήθος των εικονοστοιχείων στην οριζόντια και την κατακόρυφη διάσταση αντίστοιχα. Παρόλο που θεωρητικά μπορούν να υποστηριχθούν διαφορετικές αναλύσεις, τυπικές αναλύσεις αποτελούν οι επόμενες:

- VGA (Video Graphic Array): 640 x 480
- SVGA (Super VGA): 800 x 600
- XVGa (ExtendedVGA): 1024 x 768
- SXGA (Super Extended Graphic Array): 1280 x 1024
- UXGA (Ultra Extended Graphic Array): 1600 x 1200

Το συνολικό πλήθος από εικονοστοιχεία προκύπτει από το γινόμενο X επί Y . Για παράδειγμα στην περίπτωση του SVGA το πλήθος είναι $800 * 600 = 480.000$. Λόγω της υποστήριξης της χρωματικής προβολής, το πλήθος των κελιών είναι το τριπλάσιο από αυτό δηλαδή

$$3 * 800 * 600 = 1.440.000 \quad (4)$$

Έτσι το πλήθος των γραμμών είναι 600, ενώ το πλήθος των στηλών είναι $3 * 800 = 2.400$ (στην περίπτωση που τα τρία κελιά τοποθετούνται οριζόντια). Το μέγεθος ενός εικονοστοιχείου δεν είναι σταθερό και εξαρτάται από το μέγεθος της οθόνης και την ανάλυσή της. Όπως είναι ευνόητο, μεγαλύτερη ανάλυση για το ίδιο μέγεθος οθόνης οδηγεί σε μικρότερο μέγεθος εικονοστοιχείου και αντίστροφα.

9.4.2.1 Τεχνολογίες Επίπεδων Οθονών

Εξετάζουμε συνοπτικά κάποιες βασικές τεχνολογίες επίπεδων οθονών, και συγκεκριμένα της τεχνολογίας πλάσματος (Plasma Display Panel, PDP) η οποία ήταν και η πρώτη που εμφανίστηκε και η χρήση της πλέον έχει περιοριστεί, της τεχνολογίας υγρού κρυστάλλου (Liquid Crystal Display, LCD) και της τεχνολογίας διόδων εκπομπής φωτός (Light Emitting Diodes, LED).

Οι οθόνες **τεχνολογίας πλάσματος** αποτέλεσαν την πρώτη τεχνολογία επίπεδων οθονών. Αποτελούνται από μικρές λάμπες φθορισμού με τρεις λάμπες να αντιστοιχούν σε ένα εικονοστοιχείο. Καθεμία από αυτές μπορεί να παράγει ένα από τα τρία χρώματα, κόκκινο, πράσινο ή μπλε. Η αρχή λειτουργίας μιας τηλεόρασης πλάσματος βασίζεται στη λειτουργία του αερίου νέον. Συγκεκριμένα, όταν αυτό υφίσταται υψηλή ηλεκτρική τάση, τότε υφίσταται κατάρρευση στην κατάσταση πλάσματος και γίνεται εκφόρτιση του πλάσματος. Το πλάσμα είναι ηλεκτρικά ουδέτερο και σε υψηλό βαθμό ιονισμένο αποτελούμενο από ηλεκτρόνια, θετικά ιόντα και ουδέτερα σωματίδια. Επειδή είναι ηλεκτρικά ουδέτερο περιέχει ίσες ποσότητες ηλεκτρονίων και ιόντων και είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού. Η εκφόρτιση του

πλάσματος δημιουργεί την κυκλοφορία ρεύματος και επιπλέον μετατρέπει ένα τμήμα της ηλεκτρικής ενέργειας σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα συμπεριλαμβανομένου και του ορατού φωτός. Η απόχρωση στα τρία βασικά χρώματα επιτυγχάνεται με τη χρήση υλικών που είναι φθορίζοντα σε κάθε ένα εκ των εικονοστοιχείων.

Οι οθόνες πλάσμα θεωρούνται ότι αποδίδουν με πολύ καλή ποιότητα το μαύρο και επίσης έχουν πολύ χαμηλό χρόνο απόκρισης. Ένα αδύναμο σημείο είναι ότι η φωτεινότητά τους δεν μπορεί να λάβει τη μέγιστη τιμή για αυτό και αποδίδουν καλύτερα σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού.

Οι **οθόνες υγρών κρυστάλλων** (Liquid Crystal Display, LCD) αποτελούνται από ένα φάσμα υγρών κρυστάλλων που φιλτράρει επιλεκτικά το φως το οποίο προέρχεται από λάμπες φθορισμού που βρίσκονται στο οπίσθιο μέρος. Το κάθε εικονοστοιχείο χωρίζεται σε τρία επιμέρους, ώστε να επιτρέπουν τη διέλευση των διαφορετικών αποχρώσεων. Ως γνωστόν, το φως είναι εγκάρσιο ηλεκτρομαγνητικό κύμα το οποίο αποτελείται από ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο. Τα δύο πεδία είναι ορθογώνια (σε ορθή γωνία) μεταξύ τους και κινούνται με την ταχύτητα του φωτός. Στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο το ηλεκτρικό πεδίο καθορίζει την πόλωση του πεδίου: εάν το ηλεκτρικό πεδίο είναι κατακόρυφο το πεδίο ονομάζεται κατακόρυφα πολωμένο και αντίστροφα εάν το ηλεκτρικό πεδίο είναι οριζόντιο τότε το ηλεκτρομαγνητικό κύμα ονομάζεται οριζόντια πολωμένο. Το φυσικό φως από τον ήλιο ή οποιαδήποτε άλλη πηγή δεν είναι πολωμένο και περιέχει τόσο την κατακόρυφη όσο και την οριζόντια πόλωση. Το φως μπορεί να πολωθεί εάν μειωθεί ή απομακρυνθεί η οριζόντια ή η κατακόρυφη πόλωση, μέσω, για παράδειγμα, ενός φίλτρου πόλωσης. Εάν αφαιρεθεί η οριζόντια πόλωση τότε το φως είναι κατακόρυφα πολωμένο και αντίστροφα.

Η ενεργός περιοχή της οθόνης αποτελείται από μια δομή μήτρας εντός της οποίας το ενεργό στοιχείο, δηλαδή ο υγρός κρύσταλλος, είναι τοποθετημένο στο σημείο που διασταυρώνονται δύο ηλεκτρικοί αγωγοί. Οι υγροί κρύσταλλοι επιτρέπουν ή όχι τη διέλευση του φωτός ανάλογα με την πόλωση του φωτός. Η διέλευση του φωτός μπορεί να γίνει με ρυθμιζόμενη ένταση. Η απλή αυτή αρχή επιτρέπει τον έλεγχο της φωτεινότητας ενός κελιού υγρού κρυστάλλου.

Οι οθόνες τύπου LCD έχουν καλή απόδοση στο θέμα της φωτεινότητας με τη χρήση της πηγής φωτός που λειτουργεί στο οπίσθιο μέρος. Θεωρείται ότι υστερούν στην εμφάνιση του μαύρου, αφού ακόμα και όταν οι υγροί κρύσταλλοι δεν επιτρέπουν τη διέλευση του φωτός υπάρχει ένα συνεχές ανεπαίσθητο φως, το οποίο προέρχεται από τη λάμπα φθορισμού που είναι δύσκολο να αποκλειστεί.

Οι **οθόνες τεχνολογίας διόδων εκπομπής φωτός** (Light Emitting Diode, LED) αποτελούν εξέλιξη των οθονών τεχνολογίας υγρών κρυστάλλων με κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα. Οι LED τηλεοράσεις είναι πιο λεπτές και προσφέρουν μεγαλύτερη φωτεινότητα από τις συμβατικές LCD. Επίσης υπερέχουν στην πιο περιορισμένη χρήση ενέργειας. Παρέχουν καλύτερη απόδοση των χρωμάτων. Για αυτόν τον λόγο θεωρείται ότι θα αποτελέσουν τη νέα βασική τεχνολογία και κερδίζουν σταδιακά σημαντικό κομμάτι της αγοράς οθονών. Οι οθόνες LED έχουν αντίστοιχη λογική με τις LCD. Διαφέρουν στο ότι η πηγή φωτός δεν είναι ένας λαμπτήρας φθορισμού, αλλά χρησιμοποιείται τεχνολογία LED. Η απόδοση του μαύρου χρώματος στις LED τηλεοράσεις είναι καλύτερη από της LCD, αν και σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει διαρροή φωτός με αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνεται πραγματικό μαύρο.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

63. J. Stevenson. *A Multi-Standard Analog and Digital TV Tuner for Cable and Terrestrial Applications*. IEEE Solid State Circuit Conference, San Francisco, 2007
64. G. Maier. *New system approach to TV tuner design*. IEEE Transactions on Consumer Electronics Vol. 36, Issue 3, 2002

Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1

Εντοπίστε τις βασικές ομοιότητες και διαφορές μεταξύ των τηλεοπτικών δεκτών οι οποίοι δέχονται αναλογικό και ψηφιακό τηλεοπτικό σήμα.

Απάντηση/Λύση

Οι βασικές ομοιότητες και διαφορές εντοπίζονται στον επόμενο πίνακα.

Κριτήριο	Δέκτης αναλογικού σήματος με οθόνη CRT	Δέκτης ψηφιακού σήματος με επίπεδη οθόνη
Αναφορικά με τη λήψη και την επεξεργασία του σήματος		
Λήψη σήματος RF	VHF/UHF	Η περιοχή συχνοτήτων δεν έχει αλλάξει. Λόγω συμπίεσης είναι δυνατή η μετάδοση περισσότερων του ενός προγραμμάτων (π.χ. 4) στο ίδιο κανάλι (με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται οικονομία στο φάσμα).
Προληπτική διόρθωση σφαλμάτων	Δεν υφίσταται	Υφίσταται προληπτική διόρθωση σφαλμάτων με χρήση των αλγορίθμων εξωτερικής και εσωτερικής κωδικοποίησης.
Αποπολυπλεξία προγραμμάτων	Κάθε πρόγραμμα αντιστοιχεί σε ένα κανάλι	Περισσότερα από ένα προγράμματα μπορεί να αντιστοιχούν σε ένα κανάλι, οπότε γίνεται αποπολυπλεξία στον δέκτη με χρήση των πινάκων PAT και PMT καθώς και του αναγνωριστικού PID.
Διαμόρφωση σημάτων βίντεο και ήχου	Τα σήματα βίντεο και ήχου είναι διακριτά (ξεχωριστά) και υφίστανται διαμόρφωση (VSB και FM αντίστοιχα) με χρήση φερόντων σε διαφορετικές συχνότητες.	Τα σήματα βίντεο και ήχο κωδικοποιούνται και η πληροφορία βρίσκεται σε πακέτα συγκροτώντας μια ενιαία ροή πακέτων η οποία διαμορφώνεται κατά στα υποφέροντα του OFDM κατά QAM (QPSK, 16QAM, 64QAM κ.λπ.).
Διαχείριση χρωμάτων	Τα χρώματα αποτελούν δύο διαφορετικά σήματα προερχόμενα από τις χρωμοδιαφορές. Διαμορφώνονται κατά DSB-SC με χρήση του χρωμοφέροντος. Σε αυτά διατίθεται μικρότερο φάσμα σε σχέση με το φάσμα που διατίθεται για τη φωτεινότητα. Χρησιμοποιούνται τα συστήματα NTSC, PAL και SECAM.	Η πληροφορία του χρώματος (αφού υποστεί υποδειγματοληψία) εισάγεται σε πακέτα (πακετοποιείται) σε μια διακριτή πακετοποιημένη στοιχειώδη ροή (PES) και εντάσσεται και αυτή στο βασικό σήμα.
Πακετοποίηση	Δεν υφίσταται, αφού το σήμα είναι αναλογικό.	Χρησιμοποιείται η λογική του MPEG TransportStream.
Ως προς τις συσκευές απεικόνισης		
Διακριτοποίηση	Η ανάλυση μιας οθόνης CRT ορίζεται ως το μέγιστο πλήθος σημείων τα οποία μπορούν να απεικονιστούν χωρίς να υπάρχει επικάλυψη.	Χρήση εικονοστοιχείων με συγκεκριμένη τιμή ανάλυσης οθόνης.
Μηχανισμός ενεργοποίησης σημείων οθόνης	Καθώς μετακινείται η κινούμενη δέσμη δεν ενεργοποιεί ξεχωριστά κάθε σημείο. Το φωσφορίζον υλικό στην επιφάνεια που σαρώνεται εκπέμπει με ένταση αντίστοιχη της έντασης της δέσμης που προσπίπτει σε αυτήν την επιφάνεια. Η επιφάνεια της έκτασης που σαρώνεται από τη δέσμη εξαρτάται από τη δυνατότητα εστίασης της δέσμης και την απόσταση μεταξύ των περιοχών του ίδιου χρώματος.	Η συχνότητα εμφάνισης των εικόνων στις ψηφιακές συσκευές απεικόνισης είναι υψηλότερη από τη συχνότητα ανανέωσης των εικόνων (στο εισερχόμενο σήμα).

Πίνακας 9.1 Σύγκριση αναλογικών και ψηφιακών συσκευών.

Κεφάλαιο 10 – Αναμενόμενες Εξελίξεις

Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζουμε κάποιες από τις εκτιμώμενες εξελίξεις στο πεδίο της ψηφιακής τηλεόρασης. Αρχικά περιγράφουμε προσεγγίσεις για την παροχή υπηρεσιών προστιθέμενης αξίας, οι οποίες παρέχονται παράλληλα με το τηλεοπτικό σήμα. Από τις υπάρχουσες τεχνολογίες MHP και MHEG μεταβαίνουμε στις έξυπνες τηλεοράσεις. Στη συνέχεια εξετάζουμε τους σύγχρονους τρόπους κωδικοποίησης του βίντεο, περιλαμβάνοντας το καθιερωμένο πλέον (σε πολλές χώρες) MPEG4 (AVC/H.264) και το επερχόμενο HVEC. Το κεφάλαιο κλείνει με την εξέταση των βασικών χαρακτηριστικών του τρισδιάστατου τηλεοπτικού σήματος και του σήματος υπερ-υψηλής ευκρίνειας.

Προαπαιτούμενη γνώση

Ενδείκνυται γνώση της γενικής εικόνας του συστήματος και των επιμέρους βαθμίδων που το αποτελούν τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη, ώστε να γίνει αντιληπτή η σημασία της λειτουργικότητας που περιγράφουμε σε αυτό το κεφάλαιο.

10.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζουμε κάποιες από τις εκτιμώμενες εξελίξεις στο πεδίο της ψηφιακής τηλεόρασης. Αρχικά εξετάζουμε την παροχή υπηρεσιών προστιθέμενης αξίας, οι οποίες παρέχονται παράλληλα με το τηλεοπτικό σήμα. Η παροχή τέτοιων υπηρεσιών (προστιθέμενης αξίας) υπήρξε ένα από τα πεδία τα οποία κατά καιρούς έχουν κερδίσει το ενδιαφέρον, ωστόσο έχουν μείνει κλειστά τόσο από την άποψη των τεχνολογιών όσο και από τους ρόλους που εμπλέκονται σε σχετικά σενάρια.

Πιο συγκεκριμένα, έχουν υπάρξει τεχνολογικά πλαίσια που προβλέπουν την παροχή υπηρεσιών στους δέκτες, ωστόσο κανένα από αυτά (μέχρι τώρα) δεν έχει επιδείξει σημαντική αποδοχή. Οι λόγοι υπήρξαν αρκετοί, από τη δυσκολία στην υποστήριξη της αλληλεπίδρασης για τον χρήστη (π.χ. λόγω της μη ύπαρξης ενσωματωμένου καναλιού αλληλεπίδρασης απαιτείται νέο κανάλι όπως το κινητό), το είδος του παρεχόμενου τηλεοπτικού περιεχομένου έως και την κουλτούρα που έχει αναπτυχθεί αναφορικά με τη λήψη και την κατανάλωση του τηλεοπτικού περιεχομένου. Εν γένει τέτοιου είδους υπηρεσίες ελέγχονται από το τηλεοπτικό κανάλι, αλλά μπορούν να παρέχονται από τρίτους παρόχους υπηρεσιών.

Η χρήση των τελευταίων τεχνολογιών και αλγορίθμων έχει ενισχύσει την απόδοση της κωδικοποίησης. Στο κεφάλαιο αυτό αναφερόμαστε στο MPEG4 (AVC/H.264) το οποίο αποτελεί ένα πρότυπο συμπίεσης το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί εδώ και αρκετά χρόνια στον χώρο. Επίσης, αναφέρουμε κάποια βασικά χαρακτηριστικά για την κωδικοποίηση βίντεο υψηλής απόδοσης (High Efficiency Video Coding, HEVC).

Τέλος, όσον αφορά το ίδιο το τηλεοπτικό σήμα, δύο ήταν οι βασικοί σταθμοί στην εξέλιξή του. Ο πρώτος έχει να κάνει με τη μετάβαση από το ασπρόμαυρο στο έγχρωμο και ο δεύτερος με τη μετάβαση από το αναλογικό σήμα στο ψηφιακό. Θεωρούμε ότι δύο από τις αναμενόμενες εξελίξεις στην περιοχή του τηλεοπτικού σήματος αφορούν την εκτεταμένη υποστήριξη της υπερ-υψηλής ευκρίνειας και του τρισδιάστατου (ξεκινώντας με το στερεοσκοπικό) σήματος.



[Παρατίθεται μια συνέντευξη του Καθ. Krivonozhev \(ITU\) για κάποιες από τις αναμενόμενες εξελίξεις στην ψηφιακή τηλεόραση.](#)

10.2 Παροχή Υπηρεσιών Προστιθέμενης Αξίας

Εξετάζουμε κάποιες από τις αρχικές τεχνολογίες που είχαν αναπτυχθεί για την παροχή υπηρεσιών αλλά και την τρέχουσα κατάσταση, όπου η είσοδος των «έξυπνων» τηλεοράσεων φαίνεται να είναι σε θέση να αλλάξει το τοπίο στην παροχή υπηρεσιών προστιθέμενης αξίας.

10.2.1 MHEG

Το MHEG-5 (Multimedia and Hypermedia Experts Group) υπήρξε μια από τις πρώτες τεχνολογίες για την παροχή υπηρεσιών προστιθέμενης αξίας στην τηλεόραση. Συγκεκριμένα, αποτελεί μία από τις πρώτες προσπάθειες προτυποποίησης ως μεσισμικό για αλληλεπιδραστικές υπηρεσίες και χρησιμοποιείται τόσο για τη λήψη αλλά και για την αποστολή σήματος. Στο πρότυπο αυτό η αλληλεπίδραση υποστηρίζεται από ένα κανάλι αλληλεπίδρασης (MHEG-5 Interaction Channel, MHEG-IC), το οποίο επιτρέπει τη διανομή υπηρεσιών μέσω μιας σύνδεσης διαδικτύου. Το κανάλι αυτό στοχεύει στην ενίσχυση του τηλεοπτικού περιεχομένου με υπηρεσίες που μεταφέρονται μέσω του διαδικτύου, σαν επέκταση του καναλιού. Το διαδικτυακό περιεχόμενο μπορεί να περιλαμβάνει βίντεο το οποίο παρέχεται ως ροή, μαζί με τα γραφικά, το κείμενο, αλλά και τις σελίδες διαδικτύου (65).

Το MHEG-5 είναι μια αντικειμενοστραφής γλώσσα προγραμματισμού η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή κειμένου, εικόνων και βίντεο. Μια εφαρμογή MHEG-5 αποτελείται από σκηνές στις οποίες μετακινείται ο χρήστης της υπηρεσίας. Κάθε σκηνή παρέχει αντικείμενα κειμένου και γραφικά. Περιέχει επίσης τμήματα κώδικα τα οποία εκτελούνται ανάλογα με τις επιλογές που κάνει ο χρήστης και συγκεκριμένα ανάλογα με τα γεγονότα τα οποία δημιουργούνται από αυτές τις επιλογές. Αυτά περιλαμβάνουν το πάτημα κουμπιών, γεγονότα που συνδέονται με την πάροδο χρονικών διαστημάτων ή το φόρτωμα περιεχομένου στη μνήμη. Ο κώδικας αυτός αποτελείται από στοιχειώδεις ενέργειες οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν την αλλαγή σε κάποιο εμφανιζόμενο κείμενο ή την αναπαραγωγή κάποιου βίντεο.

10.2.2 MHP

Η οικιακή πολυμεσική πλατφόρμα MHP (Multimedia Home Platform) είναι ένα ανοικτό μεσισμικό το οποίο έχει σχεδιαστεί από το DVB project για την παροχή υπηρεσιών αλληλεπιδραστικής τηλεόρασης. Η τεχνολογία MHP επιτρέπει τη λήψη εφαρμογών και την εκτέλεσή τους στον τηλεοπτικό δέκτη. Οι υπηρεσίες αυτές μπορούν να ληφθούν από το τηλεοπτικό κανάλι ως τμήμα του σήματος μαζί με τις ροές βίντεο και ήχου. Οι υπηρεσίες MHP μπορούν να χρησιμοποιήσουν ένα κανάλι επιστροφής το οποίο να χρησιμοποιεί την τεχνολογία του διαδικτύου (όπως αντίστοιχα έχει σχεδιαστεί και για το MHEG) (66).

Η τεχνολογία MHP παρέχει ένα προγραμματιστικό περιβάλλον εκτέλεσης για τις ψηφιακές τηλεοπτικές υπηρεσίες, το οποίο είναι ανεξάρτητο από το υποκείμενο υλικό και λογισμικό. Το υλικό και το λογισμικό εξαρτώνται συνήθως από τον κατασκευαστή του τηλεοπτικού δέκτη. Η ανεξαρτησία αυτή από τα υποκείμενα στρώματα είναι εν γένει χαρακτηριστικό της γλώσσας προγραμματισμού Java που χρησιμοποιείται. Το MHP παρέχει την εικονική μηχανή (Java Virtual Machine, JVM) και με τη χρήση προγραμματιστικών διεπαφών (Application Programming Interfaces, APIs) παρέχεται πρόσβαση στους πόρους που διαχειρίζεται ο δέκτης. Οι εφαρμογές του MHP εκτελούνται με τη βοήθεια αυτών των διεπαφών. Η πρόσβαση στις εφαρμογές διευκολύνεται από το ίδιο το περιβάλλον, μέσω εφαρμογών πλοήγησης. Οι εφαρμογές Java αποτελούνται από κάποιες κλάσεις και μεταδίδονται μαζί με το τηλεοπτικό σήμα. Ονομάζονται Xlets (η ονομασία είναι αντίστοιχη των applets για τις εφαρμογές Java οι οποίες ενσωματώνονται στις σελίδες διαδικτύου). Παράλληλα με τις εφαρμογές που είναι γραμμένες σε Java το πρότυπο ορίζει και μία ακόμη κατηγορία εφαρμογών. Αυτές που βασίζονται στη γλώσσα HTML (η κατηγορία ονομάζεται DVB-HTML) και περιέχει τις συναφείς τεχνολογίες Cascade Style Sheets (CSS), Document Object Model (DOM) και ECMAScript. Αυτή η κατηγορία εφαρμογών είναι πιο πρόσφατη και έχει γνωρίσει μικρότερη χρήση σε σχέση με τις εφαρμογές που εκτελούνται με χρήση της γλώσσας Java.

Οι συσκευές που εκτελούν κώδικα MHP παρέχουν ένα κανάλι επικοινωνίας και αλληλεπίδρασης για τις εφαρμογές που επιθυμούν να επικοινωνήσουν με κάποιον εξωτερικό εξυπηρετητή, στο πλαίσιο της εκτέλεσης μιας υπηρεσίας (π.χ. αγορές μέσω διαδικτύου). Μία ακόμη επιλογή για το κανάλι επιστροφής είναι το επίγειο κανάλι επιστροφής (Return Channel Terrestrial, DVB-RCT) το οποίο αποτελεί μια ασύρματη τεχνολογία η οποία αξιοποιεί την υποδομή DVB και παρέχει έναν εύρο ζώνης της τάξης των kbps ανά χρήστη για υπηρεσίες.

10.2.3 Smart TV

Τα τελευταία χρόνια υπήρξε μεγάλη πρόοδος στο πεδίο των πολυμεσικών συσκευών (συμπεριλαμβανομένων των τηλεοπτικών δεκτών) και συγκεκριμένα στη λειτουργικότητα, τη διασυνδεσιμότητα και τη διαλειτουργικότητα που αυτές προσφέρουν. Με την έλευση των έξυπνων τηλεοράσεων (Smart TV) τα χαρακτηριστικά του τυπικού τηλεοπτικού δέκτη έχουν ενισχυθεί σημαντικά και ενισχύεται η σύγκλιση των τηλεοράσεων με τους υπολογιστές.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των έξυπνων τηλεοράσεων είναι η διασυνδεσιμότητα με το διαδίκτυο, για αυτό και κάποιες φορές αναφέρονται ως διασυνδεδεμένες τηλεοράσεις ή και υβριδικές τηλεοράσεις. Μία υβριδική τηλεόραση είναι μια συσκευή η οποία υποστηρίζει σύνδεση με το διαδίκτυο, παράλληλα με τη λήψη τηλεοπτικού σήματος από τα κλασσικά τηλεοπτικά κανάλια. Με αυτόν τον τρόπο οι έξυπνες τηλεοράσεις μπορούν να υποστηρίξουν πρόσβαση στο διαδίκτυο, αλληλεπιδραστικά πολυμέσα, καθώς και υπηρεσίες με πιο προηγμένα χαρακτηριστικά. Η σύγκλιση των τηλεοπτικών συσκευών με τους υπολογιστές ενισχύεται από την ύπαρξη ενός λειτουργικού συστήματος στους τηλεοπτικούς δέκτες. Το λειτουργικό αυτό σύστημα πρέπει να μπορεί να διαχειρίζεται τις ιδιαιτερότητες της συσκευής. Μπορεί να εκτελεί υπηρεσίες χρησιμοποιώντας τους πόρους του τηλεοπτικού δέκτη. Οι εφαρμογές μπορεί να είναι φορτωμένες εκ των προτέρων ή να γίνονται διαθέσιμες μέσω του διαδικτύου.

Αναφορικά με τις υποστηριζόμενες υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας η γκάμα έχει αυξηθεί σημαντικά αφού πλέον ένα σημαντικό μέρος της λειτουργικότητάς τους εκτελείται σε έναν κεντρικό υπολογιστή, οπότε στην απλούστερη περίπτωση η συσκευή είναι υπεύθυνη για τη λήψη του περιεχομένου και την απεικόνισή του. Θέματα συντονισμού με το περιεχόμενο που διατίθεται από το τηλεοπτικό κανάλι και το οποίο προβάλλεται στη συσκευή μπορούν συνήθως αντιμετωπίζονται κεντρικά (δηλαδή στον εξυπηρετητή).

Πέρα από αυτή καθεαυτή τη λειτουργικότητα των εφαρμογών, είναι σημαντικό το ότι έχει αρχίσει να επιτρέπεται σε τρίτους κατασκευαστές λογισμικού (πέρα δηλαδή από τα τηλεοπτικά κανάλια) η

δημιουργία εφαρμογών. Η λογική που αναμένεται να ακολουθηθεί αναφορικά με τη διάθεση των εφαρμογών είναι αντίστοιχη αυτή που ακολουθείται και στις κινητές τηλεπικοινωνίες.

10.3 Κωδικοποίηση

10.3.1 MPEG 4 AVC / H. 264

Η κωδικοποίηση και η συμπίεση του τηλεοπτικού περιεχομένου (και κυρίως του βίντεο) αποτελούν σημαντικό παράγοντα στην εξέλιξη της τηλεόρασης. Στην Ελλάδα πρόσφατα υιοθετήθηκε η χρήση του κωδικοποιητή MPEG4 Advanced Video Codec (AVC). Ο αλγόριθμος αυτός επιτυγχάνει καλύτερη συμπίεση σε σχέση με το MPEG-2 για αντίστοιχη ποιότητα περιεχομένου. Το MPEG-4/H.264 Part 10, Advanced Video Coding (MPEG-4 AVC) έχει προτυποποιηθεί επίσης από την ITU ως H.264. Στη συνέχεια αναφέρουμε ορισμένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του αλγορίθμου που επιτρέπουν την υψηλή του απόδοση. Αρχικά αναφέρουμε την αύξηση του πλήθους των εικόνων αναφοράς που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη του περιεχομένου μιας εικόνας (ενδεικτικό νούμερο, περί τις 16 εικόνες). Αυτό αποτελεί σημαντική εξέλιξη σε σχέση με τις προηγούμενες κωδικοποιήσεις με χρήση των πλαισίων P και B όπου στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιούνται 1 και 2 πλαίσια αναφοράς (το προηγούμενο και το επόμενο I ή P στην περίπτωση του B) (67, 68).

Στο AVC η εκτίμηση κίνησης γίνεται σε τμήματα εικόνων τα οποία έχουν μεταβλητό μέγεθος (Variable Block Size Motion Compensation, VBSMC), το οποίο μπορεί να φτάνει και το 16 x 16. Είναι επίσης δυνατή η εκμετάλλευση του χωρικού πλεονασμού εντός ενός μόνο πλαισίου. Το AVC επιτρέπει την ευέλικτη κωδικοποίηση διαπλεγμένου βίντεο με τη χρήση μακρο-μπλοκ. Το AVC επιτρέπει ακόμη νέους μετασχηματισμούς που έχουν καλύτερη απόδοση από το DCT, επιτρέποντας την πιο αποδοτική διαχείριση τμημάτων της εικόνας (π.χ. μπλοκ 8x8) καθώς και δυναμική επιλογή παραμέτρων του κωδικοποιητή, όσον αφορά για παράδειγμα το μέγεθος του μπλοκ προς κωδικοποίηση. Επίσης επιτυγχάνεται βελτίωση του κβαντισμού με έλεγχο του μεγέθους του βήματος και προσαρμοζόμενες κλίμακες.

Κατά την κωδικοποίηση της εντροπίας επιτυγχάνεται συμπίεση συντακτικών στοιχείων στο βίντεο με γνωστές τις πιθανότητες εμφάνισης αυτών. Σχετικοί αλγόριθμοι είναι ο Context Adaptive Binary Arithmetic Coding (CABAC) και η μικρότερης πολυπλοκότητας λογική του Context Adaptive Variable Length Coding (CAVLC). Επιπλέον υποστηρίζεται η δημιουργία ενός δικτύου προσαρμογής το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλά δικτυακά περιβάλλοντα επιτρέποντας ευέλικτο τεμαχισμό των δεδομένων και την αρίθμηση των πλαισίων (γεγονός το οποίο διευκολύνει τη διαχείριση των πακέτων από τα επίπεδα του δικτύου).

10.3.2 HVEC

Η κωδικοποίηση βίντεο υψηλής απόδοσης (High Efficiency Video Coding, HEVC) είναι ένα πρότυπο συμπίεσης βίντεο το οποίο αποτελεί το διάδοχο του H.264/MPEG-4 AVC (Advanced Video Coding). Αναπτύχθηκε από τις ομάδες ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 11 Moving Picture Experts Group (MPEG) και ITU-TSG16/Q.6 Video Coding Experts Group (VCEG) με την ονομασία ISO/IEC 23008-2 MPEG-H Part 2 και ITU-T H.265 (69).

Το πρότυπο HVEC θεωρείται ότι είναι σε θέση να διπλασιάσει τον ρυθμό συμπίεσης που επιτυγχάνει το H.264/MPEG-4 AVC σε αντίστοιχο επίπεδο ποιότητας. Αντίστοιχα έχοντας τον ίδιο ρυθμό συμπίεσης βελτιώνει αισθητά το επίπεδο ποιότητας. Η πρώτη έκδοση έγινε διαθέσιμη το 2013, ενώ η δεύτερη την περίοδο που γράφεται αυτό το σύγγραμμα είναι υπό εκπόνηση. Η σχεδίαση του αλγορίθμου δίνει έμφαση στην απόδοση της κωδικοποίησης. Κάποιες από τις καινοτομίες που περιλαμβάνει είναι οι κλιμακωτές επεκτάσεις κωδικοποίησης (Scalable Coding Extensions, SCE), και η υποστήριξη περιεχομένου πολλαπλών οπτικών γωνιών (Multi-View Extensions, MVE).

10.4 Εξέλιξη Τηλεοπτικού Σήματος

10.4.1 Τρισδιάστατο Σήμα

Το τρισδιάστατο σήμα περιγράφεται από το ύψος, το πλάτος, αλλά και το βάθος. Όταν μεταδίδεται τρισδιάστατο σήμα λέμε ότι έχουμε τρισδιάστατη τηλεόραση (3D television, 3DTV). Η πιο απλή περίπτωση τρισδιάστατου σήματος είναι το στερεοσκοπικό σήμα (δηλαδή το σήμα το οποίο προκύπτει από δύο οπτικές γωνίες). Η εξέλιξη του στερεοσκοπικού σήματος είναι η απεικόνιση περιεχομένων από πολλαπλές οπτικές γωνίες (multi-view) (70).

Αναφορικά με την αναπαραγωγή και τη θέαση του σήματος οι συνηθισμένες τεχνολογίες απαιτούν τη χρήση γυαλιών (για την υποστήριξη των δύο διαστάσεων. Υπάρχει και η περίπτωση του αυτό-στερεοσκοπικού το οποίο δεν απαιτεί τη χρήση γυαλιών. Οι τεχνολογίες απεικόνισης έχουν ως στόχο να φιλτράρουν τις εικόνες που θα εμφανιστούν για το αριστερό και το δεξί μάτι. Άλλες βασικές τεχνολογίες απεικόνισης του τρισδιάστατου σήματος περιλαμβάνουν το ανάγλυφο τρισδιάστατο σήμα με παθητικά φίλτρα χρώματος, το τρισδιάστατο σύστημα πόλωσης με παθητικά φίλτρα πόλωσης, το ενεργό τρισδιάστατο σύστημα θέασης.

Επίσης, υπάρχουν οθόνες οι οποίες προσαρμόζονται στο κεφάλι και αποτελούνται από δύο επιμέρους οθόνες τοποθετημένες μπροστά από κάθε μάτι ώστε να βλέπει το αντίστοιχο περιεχόμενο. Οι αυτοστερεοσκοπικές οθόνες αναφέρονται και ως Auto 3D και είναι οι μόνες οι οποίες (ως αυτοστερεοσκοπικές) δεν χρησιμοποιούν φίλτρα.

10.4.1.1 Παραγωγή Τρισδιάστατου Σήματος

Θα εξετάσουμε την παραγωγή στερεοσκοπικού σήματος, το οποίο αποτελεί και την απλούστερη περίπτωση. Η διαδικασία δημιουργίας αυτού του τύπου βίντεο προϋποθέτει ένα σύστημα το οποίο θα μπορεί να λαμβάνει βίντεο από δύο οπτικές γωνίες. Στην πραγματικότητα αποτελείται από δύο κάμερες, οι οποίες είναι τοποθετημένες η μία δίπλα στην άλλη και απέχουν απόσταση περίπου όσο απέχει το ένα μάτι από το άλλο (η μία κόρη από την άλλη).

Στην περιγραφή των σημείων πέρα από το μήκος και το πλάτος (X και Y) εμπλέκεται πλέον και το βάθος (το οποίο συνήθως συμβολίζεται ως Z). Η διαφοροποίηση στις συντεταγμένες είναι αισθητή για αντικείμενα τα οποία είναι κοντά στο προσκήνιο αλλά για μακρινά αντικείμενα τα δύο μάτια τα αντιλαμβάνονται σαν να είναι στο ίδιο σημείο. Στην περίπτωση που έχουμε πολύ κοντινά αντικείμενα είναι πιθανή η παραμόρφωση. Για το μεγαλύτερο μέρος των σκηνών η υπέρθεση των εικόνων που προέρχονται για το αριστερό και το δεξί μάτι δημιουργούν μια αποδεκτή εικόνα. Πέρα από το στερεοσκοπικό σήμα, το οποίο αποτελεί και την πιο συνηθισμένη και απλή περίπτωση, υπάρχει και το σήμα το οποίο προκύπτει από λήψη από πολλαπλές οπτικές γωνίες (multi-viewcapture). Στην περίπτωση αυτή απαιτείται η λήψη από πολλές κάμερες για κάθε σκηνή. Οι κάμερες αυτές δημιουργούν ανεξάρτητες ροές βίντεο.

Η ακολουθία εμφάνισης των πλαισίων είναι εναλλάξ από κάθε οπτική γωνία. Τα αριστερά και τα δεξιά πλαίσια εμφανίζονται εναλλάξ προς εμφάνιση και επηρεάζουν το σύστημα απεικόνισης (π.χ. στις περιπτώσεις των συστημάτων πόλωσης). Αυτή η εναλλάξ εμφάνιση των πλαισίων σημαίνει ότι η συχνότητα αναπαραγωγής των σκηνών υποδιπλασιάζεται.

Ως συνέχεια αυτού του τρόπου προβολής (της εναλλασσόμενης, δηλαδή, προβολής) και ειδικά για τις περιπτώσεις όπου είναι δυνατή η υποστήριξη μεγάλων αναλύσεων, υπάρχει και η ταυτόχρονη παράθεση των εικόνων (SidebySide, SBS). Στην παράθεση αυτή η αριστερή και η δεξιά εικόνα τοποθετούνται η μία δίπλα στην άλλη ώστε να σχηματίσουν τη συνολική εικόνα. Μία άλλη εναλλακτική είναι η παράθεση των δύο εικόνων στο άνω και το κάτω μέρος (Top and Bottom, TAB).

10.4.1.2. Συμπύεση

Στο τρισδιάστατο σήμα, είναι ευνόητο ότι αυξάνεται σημαντικά ο όγκος του περιεχομένου και συνακόλουθα αυξάνεται η ανάγκη για συμπύεση. Μια συνηθισμένη τεχνική είναι να κωδικοποιείται πλήρως η μία εκ των δύο όψεων (π.χ. η αριστερή) και η άλλη (στο παράδειγμά μας η δεξιά) να κωδικοποιείται με βάση την ήδη κωδικοποιημένη όψη. Αυτό προκαλεί μείωση του απαιτούμενου όγκου. Σε άλλες τεχνικές διαχωρίζεται η

πληροφορία των δύο διαστάσεων από την πληροφορία του βάθους οπότε δημιουργείται ένα σήμα δύο διαστάσεων συν το βάθος (2D plus depth).

Η κωδικοποίηση του τρισδιάστατου σήματος βασίζεται στο πρότυπο H.264/MPEG4 AVC το οποίο επιτρέπει την αποστολή στερεοσκοπικού σήματος, χωρίς απώλεια στην ανάλυση και εκμεταλλεύόμενο τον χωρικό πλεονασμό, με συμπίεση περίπου 50%. Παρόλο που κάτι τέτοιο εφαρμόζεται στην τοπική αναπαραγωγή περιεχομένου, η ευρεία χρήση του σε σενάρια ευρυεκπομπής δεν έχει γίνει πραγματικότητα λόγω των αυξημένων απαιτήσεων όσον αφορά την επεξεργασία του περιεχομένου (ιδίως αν αυτό λαμβάνεται σε πραγματικό χρόνο).

10.4.2 Σήμα Υπερ-Υψηλής Ευκρίνειας

Η ποιότητα του σήματος (άρα και το κατά πόσο είναι υψηλής και υπέρ-υψηλής ευκρίνειας) εξαρτάται από την ανάλυση του πλαισίου, το σύστημα σάρωσης και τον ρυθμό λήψης πλαισίων. Αν και έχουμε αναλύσει αυτές τις παραμέτρους, επανερχόμαστε με μια σύντομη αναφορά:

- Η ανάλυση εξαρτάται από το πλήθος των εικονοστοιχείων που περιέχονται οριζόντια και κατακόρυφα σε ένα πλαίσιο. Είναι, δηλαδή, ένα γινόμενο π.χ. 1.280×720 ή 1.920×1.080 . Λόγω του ότι χρησιμοποιούνται συγκεκριμένοι λόγοι μεταξύ των οριζόντιων και των κατακόρυφων πλαισίων, πολλές φορές αναφέρεται μόνο το πλήθος των κατακόρυφων π.χ. 720 ή 1080.
- Η σάρωση εξαρτάται από το αν είναι διαπλεγμένη (interlaced, i) ή προοδευτική (progressive, p). Στην πρώτη περίπτωση η οποία χρησιμοποιήθηκε κατά κόρον στην αναλογική τηλεόραση και στην αρχική περίοδο της ψηφιακής τηλεόρασης, η εικόνα χωρίζεται σε μονές και ζυγές γραμμές και κάθε φορά σαρώνεται ένα εξ αυτών των συνόλων (τα σύνολα αυτά λέμε ότι αποτελούν τα δύο πεδία της εικόνας). Στην προοδευτική σάρωση, από την άλλη, έχουμε τη σάρωση του συνόλου της εικόνας (όλων δηλαδή των γραμμών ζυγών και περιττών). Η προοδευτική σάρωση μιας εικόνας οδηγεί στο διπλάσιο όγκο δεδομένων σε σχέση με τη διαπλεγμένη (εφόσον, βέβαια, ο ρυθμός σάρωσης είναι ο ίδιος).
- Ο ρυθμός λήψης πλαισίων έχει να κάνει με το πλήθος των πλαισίων που σαρώνονται στην μονάδα του χρόνου. Για την περίπτωση της διαπλεγμένης σάρωσης διαφοροποιείται ο ρυθμός σάρωσης των πλαισίων από τον ρυθμό σάρωσης των πεδίων.

Οι τρεις αυτές παράμετροι καθορίζουν τα χαρακτηριστικά του σήματος βίντεο. Η σημειογραφία που ακολουθείται είναι συνήθως η επόμενη:

[μέγεθος πλαισίου] [σύστημα σάρωσης] [ρυθμός λήψης πλαισίων]

Κάποιες από αυτές τις παραμέτρους μπορεί να παραληφθούν ανά περίπτωση ή οι σχετικές πληροφορίες να γραφτούν με διαφορετικό τρόπο. Για παράδειγμα, το σήμα 1920×1080p25 σημαίνει πλαίσια με ανάλυση 1920 1080 pixels, προοδευτική σάρωση και ότι η σάρωση των πλαισίων έχει συχνότητα 25 πλαίσια το δευτερόλεπτο. Η έκφραση 1080i60 σημαίνει ότι έχουμε πλαίσια με ανάλυση 1080x1920 pixels, διαπλεγμένη σάρωση και συχνότητα σάρωσης πεδίων 60 πεδία το δευτερόλεπτο (άρα 30 πλαίσια το δευτερόλεπτο). Τέλος, η έκφραση 720p60 αντιστοιχεί σε πλαίσια με ανάλυση 720 x 1.280 pixels, προοδευτική σάρωση και συχνότητα 60 πλαίσια το δευτερόλεπτο. Η ανάλυση 720 x 1.280 αποτελεί την ελάχιστη ανάλυση ώστε να έχουμε σήμα υψηλής ευκρίνειας. Το σήμα υπερ-υψηλής ευκρίνειας ενισχύει ακόμη περισσότερο την ανάλυση.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

65. Multimedia and Hypermedia Experts Group (MHEG). *ISO/IEC/JTC1SC 29 working group*. Coding of audio, picture, multimedia and hypermedia information. Multimedia and Hypermedia Experts Group, 2015.
66. Digital Video Broadcasting (DVB). *Multimedia Home Platform Open Middleware for Interactive TV, DVB Factsheet*. Digital Video Broadcasting, 2011.
67. T. Wiegand, G. Sullivan, G. Bjøntegaard, A. Luthra. *Overview of the H.264/AVC Video Coding Standard*. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2011.
68. J. Ostermann, J. Bormans, P. List, D. Marpe, M. Narroschke, F. Pereira, T. Stockhammer, T. Wedi. *Video coding with H.264/AVC: Tools, Performance, and Complexity*. IEEE Circuits and Systems Magazine, 2011.
69. G. Sullivan, J. Boyce, Y. Chen, J. Ohm, C. Segall, A. Vetro. *Standardized Extensions of High Efficiency Video Coding* (PDF). IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing, 2013.
70. A. Smolic. *3D Video and Free Viewpoint Video – Technologies*. Applications and MPEG Standards, IEEE Multimedia and Expo, 2006.