



ΑΕΙ ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ-Παράρτημα Σπάρτης
ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Επίγεια Ψηφιακή Τηλεόραση

Πτυχιακή Εργασία

Σπουδαστές

Κύργιος Αλέξανδρος 2005031
Περιάλης Ευάγγελος 2005056

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ. *Κάραλη Ευαγγελία*

Σπάρτη 2010



ΑΤΕΙ ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ-Παράρτημα Σπάρτης
ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Επίγεια Ψηφιακή Τηλεόραση

Πτυχιακή Εργασία

Σπουδαστές

Κύργιος Αλέξανδρος 2005031

Περίαλης Ευάγγελος 2005056

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: *Καράλη Ευαγγελία*

Σπάρτη 2010

Περίληψη

Σκοπός της συγγραφής της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της τεχνολογίας της Επίγειας Ψηφιακής Τηλεόρασης. Το DVB-T αποτελεί το πρότυπο για την επίγεια μετάδοση, το οποίο έχει αναπτυχθεί με έναν ιδιαίτερα πολύπλοκο τρόπο συγκριτικά με εκείνα που χρησιμοποιούνται για δορυφορική και καλωδιακή μετάδοση. Με το DVB-T επιτυγχάνονται καλύτερες επιδόσεις απ' ότι με τη χρήση αναλογικού προτύπου και με τη χρησιμοποίησή του προσφέρονται πολλά πλεονεκτήματα στην επίγεια μετάδοση αλλά και στη λήψη του σήματος. Επίσης μέσω αυτού, είναι δυνατή η εισαγωγή νέων, καινοτόμων εφαρμογών.

Αρχικά πραγματοποιείται μια εισαγωγή αναφορικά με το εύρος χρήσης του προτύπου DVB-T και την αναγκαιότητα της ψηφιακής εκπομπής, καθώς και των συχνοτήτων της. Έπειτα παρουσιάζονται οι βασικές τεχνικές ψηφιοποίησης και τα πρότυπα που χρησιμοποιούνται για την υλοποίησή τους.

Κατόπιν αναλύονται εκτενώς τα Ψηφιακά Συστήματα Διαμόρφωσης και η λειτουργία τους, καθώς επίσης και οι βέλτιστες συχνότητες εκπομπής τους. Επιπροσθέτως, παραθέτονται οι τρόποι εκπομπής και τα διάφορα προβλήματα που μπορούν να προκύψουν κατά τη διάρκειά τους.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση των σπουδών μας, αποτέλεσμα κοπιαστικής δουλειάς τεσσάρων ετών στο Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Καλαμάτας στο τμήμα Τεχνολογίας Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών στην Σπάρτη, και διαπιστώνοντας πως αυτή η εργασία ολοκληρώθηκε με την βοήθεια αρκετών ανθρώπων, θα θέλαμε να τους ευχαριστήσουμε ονομαστικά, καθώς θα ήταν άδικο να μην γίνει μια ιδιαίτερη αναφορά σ' αυτούς.

Αρχικά, θα θέλαμε να εκφράσουμε την ευγνωμοσύνη μας προς την επιβλέπουσα καθηγήτρια κ. Κάραλη Ευαγγελία, για την υποστήριξη της σε κάθε μας βήμα αυτούς τους τελευταίους έξι μήνες, παρέχοντάς μας υλική και ηθική βοήθεια όπου αυτή χρειαζόταν έτσι ώστε να προχωρήσουμε προς την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης εργασίας.

Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον Προϊστάμενο του Τμήματος κ. Παπουτσή Ιωάννη ο οποίος τα τελευταία τέσσερα χρόνια στάθηκε δίπλα μας σε κάθε εμπόδιο που μας παρουσιάστηκε, προσπαθώντας για το καλύτερο της σχολής και των φοιτητών της, καθώς και τον Καθηγητή Εφαρμογών της Σχολής κ. Λιαπέρδο Ιωάννη που με ανεξάντλητη υπομονή και όρεξη μας συμβούλευε ακούραστα για οποιοδήποτε θέμα χρειαστήκαμε τη βοήθειά του.

Ακόμα, τους υπόλοιπους καθηγητές που ήταν εκεί όταν τους είχαμε ανάγκη, πάντα πρόθυμοι και έτοιμοι να μας βοηθήσουν, αντιμετωπίζοντας μας σαν συνάδελφους και όχι σαν απλούς διδασκόμενους, δίνοντάς μας απλόχερα τη γνώση και την εμπειρία τους.

Τέλος, ευχαριστούμε όλους εκείνους που μαζί τους μάθαμε να εργαζόμαστε, να συνεργαζόμαστε, να σκεφτόμαστε και να αναζητούμε. Όλους εκείνους που μας δίδαξαν ότι οι επιστήμες της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών δεν περιορίζονται μόνο στην τεχνική πρόοδο, αλλά βοηθούν τους ανθρώπους να ξεπεράσουν προσωπικούς περιορισμούς και αποστάσεις, ανοίγοντας έτσι διάλους αληθινής και ανθρώπινης επικοινωνίας με τους συνανθρώπους τους.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	2
Ευχαριστίες.....	3
Ακρωνύμια.....	5
Εισαγωγή	6
Κεφάλαιο 1 : Βασικά χαρακτηριστικά	7
1.1 Μετάβαση στην ψηφιακή εποχή.....	7
1.2 Καινοτομίες της ψηφιακής τηλεόρασης	8
1.3 Ο ρόλος του τηλεθεατή και του παρόχου	9
Κεφάλαιο 2 : DVB-T.....	11
2.1 Εισαγωγή στα πρότυπα DVB	11
2.1.1 DVB-T	12
2.1.2 Δυνατότητες του DVB-T	16
Κεφάλαιο 3 : Ψηφιοποίηση και Συμπύεση	18
3.1 Εισαγωγή	18
3.2 Το πρότυπο 4:2:2	19
3.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Ψηφιοποίησης.....	20
3.4 Συμπύεση Τηλεοπτικού Σήματος	21
3.4.1 Το πρότυπο MPEG-2	22
Κεφάλαιο 4 : Ψηφιακά Συστήματα Διαμόρφωσης	26
4.1 Εισαγωγή στην PSK (Phase Shift Keying).....	26
4.1.1 Διαμόρφωση BPSK (Binary Phase Shift Keying)	26
4.1.2 Διαμόρφωση QPSK (Quadrature Phase Shift Keying).....	27
4.2 Διαμόρφωση QAM (Quadrature Amplitude Modulation).....	27
Κεφάλαιο 5: Τεχνικές Πολυπλεξίας.....	29
5.1 Πολύπλεξη με διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Multiplexing-FDM)	29
5.2 Διασυμβολική Παρεμβολή (InterSymbol Interference)	29
5.3. Πολύπλεξη με ορθογωνική διαίρεση συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing-OFDM).....	31
5.4 COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing)	35
5.4.1 Forward Error-correction coding (FEC)	36
5.5 Δίκτυα μιας συχνότητας (Single Frequency Networks-SFNs).....	39
Συμπεράσματα.....	42
Βιβλιογραφία	44

Ακρωνύμια

ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line
CBR: Constant Bit Rate
CCI: Co-Channel Interference
DCT: Discrete Cosine Transform
DTV: Digital Television
DVB: Digital Video Broadcasting
DVB-C: Digital Video Broadcasting - Cable
DVB-H: Digital Video Broadcasting – Handheld
DVB-S: Digital Video Broadcasting - Satellite
DVB-T: Digital Video Broadcasting – Terrestrial
ETSI: European Telecommunications Standards Institute
FFT: Fast Fourier Transform
FWA: Fixed Wireless Access
GPRS: General Packet Radio Service
GSM: Global System for Mobile Communications
HDTV: High Definition Television
INA: Interactive Network Adapter
IP: Internet Protocol
ISDN: Integrated Services Digital Network
LAN: Local Area Network
MHP: Multimedia Home Platform
MPEG: Motion Picture Experts Group
NT: Network Termination
NTSC: National Television Standards Committee
OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PAL: Phase Alternating Line
PCM: Pulse Code Modulation
PLMN: Public Land Mobile Network
PSTN: Public Switched Telephone Network
QAM: Quadrature Amplitude Modulation
QM: Quality Meter
QPSK: Quadrature Phase Shift Keying
RF: Radio Frequency
RS: Reed Solomon
SDTV: Standard Definition TV
SECAM: Sequential Color and Memory
SFN: Single Frequency Network
TCP: Transport Control Protocol
UHF: Ultra High Frequency
VBR: Variable Bit Rate

Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί μεγάλες αλλαγές στα τηλεοπτικά δρώμενα, τόσο στην Ευρώπη όσο και στον υπόλοιπο κόσμο. Οι αλλαγές αυτές αποτελούν ουσιαστικά μια επανάσταση στην τηλεόραση και στα πολυμέσα, που εξελίσσεται μπροστά στα μάτια μας. Η τηλεόραση έχει μετεξελιχθεί, από την παραδοσιακή αναλογική της μορφή, σε ψηφιακή, φέρνοντας μαζί της μια σειρά από επαναστατικές καινοτομίες με σημαντική επίδραση στην ανθρώπινη ζωή.

Παραδοσιακά η επίγεια αναλογική τηλεόραση, όπως τη γνωρίζουμε, βασίζεται σε τηλεοπτικά κανάλια γενικού ενδιαφέροντος. Ο αριθμός των καναλιών ανά χώρα είναι σχετικά μικρός και η εκπομπή τους ελεύθερη. Τα έσοδα τους προέρχονται από διαφημίσεις, χορηγίες και απευθείας φορολογία. Παράλληλα, υπάρχει και η αναλογική καλωδιακή και δορυφορική τηλεόραση με μεγάλο αριθμό κρυπτογραφημένων καναλιών που προσφέρονται στους πελάτες με συνδρομή.

Στην αναλογική τηλεόραση η διαδραστικότητα (interactivity), δηλαδή η ευχέρεια του θεατή να δρα επιλεκτικά και να επηρεάζει το περιεχόμενο στο δέκτη του, βρίσκεται σε εμβρυακή μορφή και περιορίζεται στις δυνατότητες άντλησης πληροφοριών μέσω teletext[1].

Η Ψηφιακή Επίγεια Εκπομπή Τηλεόρασης (*Digital Terrestrial Television Broadcasting, DTTB*) είναι μετάδοση ψηφιακά κωδικοποιημένου σήματος εικόνας, ήχου και συμπληρωματικών υπηρεσιών από επίγειους πομπούς και αναμεταδότες σε δίαυλο εύρους 6, 7 ή 8 MHz στις περιοχές συχνοτήτων VHF (Band I και III) και UHF (Band IV και V). Έχουν αναπτυχθεί 3 συστήματα DTTB, το ATSC που σχεδιάστηκε και χρησιμοποιείται στη Β. Αμερική, το ISDB-T που χρησιμοποιείται στην Ιαπωνία και το DVB-T που εφαρμόζεται από την EBU στον ευρωπαϊκό χώρο (Σχήμα 1). Η παρούσα εργασία αναφέρεται αποκλειστικά στο DVB-T.



Σχήμα 1. Εύρος χρήσης DVB-T ανά την υφήλιο.

Κεφάλαιο 1 : Βασικά χαρακτηριστικά

1.1 Μετάβαση στην ψηφιακή εποχή

Στη σημερινή εποχή τόσο η Τηλεόραση όσο και οι Τηλεπικοινωνίες έχουν περάσει ολοκληρωτικά στην ψηφιακή εποχή και είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με την πληροφορική. Σήμερα η ψηφιακή τηλεόραση παρέχει στο συνδρομητή τη δυνατότητα πρόσβασης σε διαδραστικές υπηρεσίες και στο διαδίκτυο. Από την άλλη πλευρά, είναι επίσης δυνατή η πρόσβαση σε τηλεοπτικά προγράμματα και άλλες εφαρμογές πολυμέσων απευθείας στο συνδρομητή μέσω διαδικτύου.

Ιστορικά, η τηλεόραση ως μηχανή ήταν αξιόπιστη και απλή. Για χρόνια η παρακολούθησή της αποτελούσε μια από τις λίγες και κλασικές στην εποχή μας ομαδικές οικογενειακές δραστηριότητες. Από την άλλη, ο υπολογιστής ήταν για χρόνια συγκριτικά δύσχρηστος και απρόσιτος στο καταναλωτικό κοινό. Η ενασχόληση του ανθρώπου με τον υπολογιστή ήταν σχεδόν πάντοτε μια μοναχική δραστηριότητα. Σταδιακά όμως παρουσιάζεται σύγκλιση μεταξύ των ιδιοτήτων της τηλεόρασης και του υπολογιστή. Με τη διαδραστικότητα η τηλεόραση γίνεται πιο σύνθετη, αλλά οδηγεί σε προσωπική παρά ομαδική τηλεθέαση. Αντίθετα, ο υπολογιστής γίνεται σταδιακά απλούστερος, φιλικότερος και αρκετά φτηνότερος. Όμως, πιο σημαντική από τη σύγκλιση των μηχανών είναι η σύγκλιση στις πλατφόρμες παροχής των υπηρεσιών, αλλά και του τελικού προϊόντος που προσφέρεται στον καταναλωτή.

Οι εφαρμογές που αφορούν τις τηλεοπτικές και διαδραστικές υπηρεσίες μέσω διαδικτύου γνωρίζουν ιδιαίτερη άνθηση τον τελευταίο καιρό. Η πρόοδος στις τεχνικές κωδικοποίησης και μεταφοράς τηλεοπτικής εικόνας και ήχου μέσω διαδικτύου είναι τέτοια που επιτρέπει την εμπορική εκμετάλλευση της υπηρεσίας. Η αποκωδικοποίηση των προγραμμάτων μπορεί να γίνει είτε σε υπολογιστή, είτε σε αποκωδικοποιητή πανομοιότυπο με αυτούς που χρησιμοποιούνται στις πλατφόρμες παροχής ψηφιακής τηλεόρασης. Πρέπει να σημειωθεί ότι η αποκωδικοποίηση άρχισε πλέον να γίνεται κυρίως από λογισμικό.

Αξιοσημείωτη είναι και η πρόοδος στην ψηφιακή παραγωγή, αποθήκευση, διαχείριση και επεξεργασία περιεχομένου. Ήδη, έχει κυκλοφορήσει στους κινηματογράφους η πρώτη ταινία η παραγωγή της οποίας έγινε ολοκληρωτικά με ψηφιακά μέσα, χωρίς τη χρήση φιλμ. Η ψηφιακή αποθήκευση του περιεχομένου αναπτύσσεται γοργά και η αρχειοθέτηση συστηματοποιείται και αυτοματοποιείται, διευκολύνοντας τη μεταφορά και την επεξεργασία. Στο ψηφιακό περιβάλλον, τα παραδοσιακά ραδιοτηλεοπτικά προγράμματα μπορούν να τύχουν περαιτέρω επεξεργασίας και να παρουσιαστούν με ελκυστικότερο τρόπο. Εκτός από ήχο και εικόνα, μπορούν να συνοδεύονται από συμπληρωματικό κείμενο και διαδραστικές επιλογές (όπως, για παράδειγμα, τη δυνατότητα ανάκλησης του βιογραφικού της πρωταγωνίστριας, αλλά και τη δυνατότητα άμεσης παραγγελίας του φορέματός της).

Η τεχνολογία ψηφιακής αποθήκευσης έχει επίσης ωριμάσει και στην πλευρά του συνδρομητή. Για πρώτη φορά οικιακοί αποκωδικοποιητές θα έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης προγραμμάτων 24-48 ωρών στο σκληρό τους δίσκο. Ο εξοπλισμός αυτός παρέχει την ευχέρεια να μεταφέρεται μεγάλος όγκος περιεχομένου στους συνδρομητές στις ώρες που η πλατφόρμα μεταφοράς παρουσιάζει χαμηλή κίνηση.

Έτσι, διευκολύνεται η παρακολούθηση προγραμμάτων κατά ζήτηση, αφού είναι πλέον πολύ πιθανό το περιεχόμενο που ενδιαφέρει συνήθως το συνδρομητή να βρίσκεται στον αποκωδικοποιητή του από την προηγούμενη νύχτα.

Το περιεχόμενο, το προϊόν δηλαδή που προωθείται, μπορεί να προσφερθεί απευθείας στους συνδρομητές από διαφορετικές ευρυφασματικές πλατφόρμες. Η παραδοσιακότερη ψηφιακή πλατφόρμα είναι η δορυφορική, η οποία χρησιμοποιεί δορυφόρους ψηλής ισχύος που επιτρέπουν λήψη με μικρές κεραιές στο κάθε σπίτι.

Άλλη ψηφιακή πλατφόρμα είναι η καλωδιακή, η οποία χρησιμοποιεί ομοαξονικά καλώδια που καταλήγουν στους συνδρομητικούς δέκτες. Τα δίκτυα αυτά αναπτύχθηκαν παλαιότερα στην πλειονότητα τους και χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για την παροχή αναλογικής συνδρομητικής τηλεόρασης.

Ευρυφασματική πρόσβαση μπορεί επίσης να εξασφαλιστεί και από πλατφόρμες που χρησιμοποιούν ασύρματες συνδέσεις στις συχνότητες της παραδοσιακής αναλογικής τηλεόρασης (DVB-T) και στις μικροκυματικές συχνότητες (LMDS).

1.2 Καινοτομίες της ψηφιακής τηλεόρασης

Με την εισαγωγή της ψηφιακής τεχνολογίας, αρχικά με την ψηφιακή δορυφορική τηλεόραση γύρω στο 1995, άρχισαν να παρουσιάζονται μια σειρά από μεγάλες αλλαγές. Από την αρχή έκαναν την εμφάνιση τους τα ψηφιακά μπουκέτα, τα οποία περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό θεματικών καναλιών και προσφέρονται κατά κανόνα κρυπτογραφημένα σε συνδρομητική βάση. Τα κλασικά ελεύθερα κανάλια εξακολουθούν να προσφέρονται και ψηφιακά, είτε από μόνα τους είτε ως μέρος των μπουκέτων, αλλά ο ρόλος τους μεταβάλλεται.

Παράλληλα, παρουσιάζονται και νέες υπηρεσίες που εκμεταλλεύονται τις δυνατότητες της ψηφιακής τεχνολογίας. Πρώτα εμφανίστηκε ο ηλεκτρονικός οδηγός προγραμμάτων, που παρέχει πληροφορίες για τα προγράμματα που προσφέρονται στο μπουκέτο και δίνει την ευκαιρία στο συνδρομητή να επιλέγει εύκολα τις εκπομπές που ενδιαφέρεται να παρακολουθήσει. Παρουσιάζεται επίσης η δυνατότητα παρακολούθησης συγκεκριμένων εκπομπών επί πληρωμή (pay per view), όπως για παράδειγμα σημαντικά αθλητικά γεγονότα.

Όμως, η πιο ενδιαφέρουσα εξέλιξη είναι η δυνατότητα παρακολούθησης προγραμμάτων κατά ζήτηση (Video on Demand). Σε πρώτο στάδιο, οι συνδρομητές μπορούσαν να επιλέξουν την ταινία που τους ενδιέφερε και να αρχίσουν να την παρακολουθούν σε μερικά λεπτά. Σε δεύτερο στάδιο, έγινε δυνατή και η άμεση έναρξη της προβολής σε ψηφιακά καλωδιακά συστήματα.

Η ψηφιακή τεχνολογία φέρνει επίσης μαζί της και την ουσιαστική ανάπτυξη της διαδραστικότητας. Οι ψηφιακοί αποκωδικοποιητές εφοδιάζονται με modems, παρέχοντας την ευκαιρία στους συνδρομητές να επικοινωνούν με το κέντρο διαχείρισης συνδρομητών. Αρχικά οι πληροφορίες που έδιναν και έπαιρναν οι συνδρομητές ήταν σχετικά απλές, όπως η επιλογή ταινιών, οι πληροφορίες για τον καιρό και η αυτόματη τηλεψηφοφορία. Πολύ σύντομα όμως προσφέρθηκαν δυνατότητες αγοράς και πληρωμής προϊόντων μέσω τηλεόρασης, η διεκπεραίωση τραπεζικών συναλλαγών, καθώς και τα παιχνίδια. Σημαντική εξέλιξη ήταν και η προσφορά στο συνδρομητή της δυνατότητας να επεμβαίνει και στο περιεχόμενο που παρακολουθεί, όπως για παράδειγμα να επαναπαρακολουθήσει αυτόματα τα τέρματα ενός ποδοσφαιρικού αγώνα.

Τέλος, εμφανίστηκαν το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο και το διαδίκτυο, που με τη χρήση ασύρματου τηλεπικοινωνιακού προσφέρουν την ευχέρεια επικοινωνίας μέσω τηλεόρασης, ακόμα και χωρίς ηλεκτρονικό υπολογιστή. Αυτές οι εξελίξεις έφεραν δραστικές αλλαγές στην τηλεόραση του σήμερα. Ο συνδρομητής αποκτά την ευχέρεια πρόσβασης σε μεγάλο όγκο προγραμμάτων που μπορεί να επιλέξει και να παρακολουθήσει όποτε αυτός θέλει. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον η ταυτότητα και ο ρόλος των γνωστών μας τηλεοπτικών καναλιών αλλάζει. Επίσης, η διαφήμιση αναγκαστικά μεταβάλλεται, αφού έννοιες που υπάρχουν στα κλασικά τηλεοπτικά κανάλια, όπως η ώρα υψηλής ακροαματικότητας, αρχίζουν να χάνουν το νόημα τους. Από την άλλη πλευρά, η ψηφιακή πλατφόρμα προσφέρει τη δυνατότητα καλύτερης στόχευσης της διαφήμισης προς τον υποψήφιο αγοραστή, με βάση το προφίλ προγραμμάτων που παρακολουθεί και των αγορών που πραγματοποιεί.

Η δυνατότητα του συστήματος να εκπέμπει τα προγράμματα περισσότερων από ενός καναλιών στην ίδια συχνότητα οδηγεί στην ανάγκη διαχείρισης της διαδικασίας εκπομπής σε ανώτερο επίπεδο. Κάθε κανάλι δεν θα έχει τη δυνατότητα να δημιουργεί αυτόνομα δικό του δίκτυο εκπομπής, όπως συμβαίνει σήμερα στην Ελλάδα και σε αρκετές άλλες ευρωπαϊκές χώρες. Ο «πάροχος» του τηλεοπτικού προγράμματος θα είναι ο φορέας που θα δέχεται το πρόγραμμα των τηλεοπτικών παραγωγών που εξυπηρετεί, και θα αναλαμβάνει την διαδικασία πολυπλεξίας και εκπομπής. Είναι δυνατόν να υπάρχουν και περισσότεροι του ενός πάροχοι σε μία χώρα, αρκεί ο κάθε ένας να εξυπηρετεί έναν ικανό αριθμό από δίκτυα-πελάτες ώστε να μπορεί να χρησιμοποιήσει αποτελεσματικά το φάσμα που διαχειρίζεται. Ο «πάροχος» μπορεί να είναι είτε κρατικός φορέας είτε εταιρία ιδιωτικών συμφερόντων ή ακόμα και κοινοπραξία των παραπάνω, και μπορεί να λειτουργεί σε τοπικό είτε σε πανεθνικό επίπεδο. Στα αρχικά στάδια της ψηφιακής εκπομπής σε κάθε χώρα, οπου θα προκύψουν και οι μεγαλύτερες δυσκολίες από τη συνύπαρξη με τα υπάρχοντα αναλογικά συστήματα είναι προτιμότερο το ρόλο του παρόχου να τον κατέχει η κρατική αρχή που διαχειρίζεται το τηλεπικοινωνιακό φάσμα. Έτσι θα διευκολυνθεί ο σχεδιασμός και ο συντονισμός της μετάβασης στην ψηφιακή εκπομπή και συγχρόνως θα επιλύονται πιο άμεσα και αποτελεσματικά τα όποια προβλήματα ενδεχομένως προκύψουν. Ανεξάρτητα από τη μορφή που θα έχει η διαχείριση στη μεταβατική περίοδο, η ύπαρξη των παρόχων θα διευκολύνει σημαντικά την εποπτεία του τηλεοπτικού φάσματος και θα συμβάλλει στον περιορισμό των παράνομων εκπομπών.

1.3 Ο ρόλος του τηλεθεατή και του παρόχου

Η ψηφιακή τηλεόραση βγαίνει από τα επιστημονικά εργαστήρια το 1972. Ένα νέο τεχνολογικό επίτευγμα που θα έφερνε καταγιστικές αλλαγές στο τηλεοπτικό πεδίο, είχε μόλις εφευρεθεί. Από τότε, η τεχνολογική πρόοδος ήταν ραγδαία και σήμερα η διαδικασία της ψηφιοποίησης (της μετατροπής δηλαδή, του ήχου και της

εικόνας στα δύο “μαγικά” νούμερα 0 και 1) υπόσχεται να μπει σε κάθε τηλεοπτικό

δέκτη και να μεταμορφώσει τη μικρή οθόνη μας κι εμάς από παθητικούς δέκτες

τηλεοπτικών προγραμμάτων σε ενεργούς χρήστες προγραμμάτων, αλλά και υπηρεσιών.

Η ψηφιακή ραδιοτηλεοπτική μετάδοση (Digital Video Broadcasting – DVB) είναι το νέο αγγλοσαξονικό αρκτικόλεξο που φιλοδοξεί να μπει στη ζωή μας. Τα αρχικά θυμίζουν, όχι τυχαία, το DVD. Κοινό σημείο ανάμεσα στις δύο τεχνολογίες. Και οι δύο στοχεύουν στο να μεταφέρουν στις οθόνες μας άριστης ποιότητας εικόνα, που θα συνοδεύεται από κρυστάλλινο στερεοφωνικό ήχο. Το DVB όμως φιλοδοξεί να μας προσφέρει ακόμα περισσότερες καινοτομίες και να αλλάξει τις τηλεοπτικές μας συνήθειες.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της νέας, ψηφιακής τεχνολογίας είναι:

- Απόλυτη ευκρίνεια και άριστη ποιότητα ήχου.
- Ο τηλεθεατής μπορεί να επιλέξει τι θα παρακολουθήσει μέσα από μια ευρεία γκάμα προγραμμάτων.
- Ο τηλεθεατής μπορεί να επιλέξει ακόμα και πότε θα παρακολουθήσει το πρόγραμμα της αρεσκείας του.
- Πλήθος υπηρεσιών διατίθενται πλέον από απόσταση με το πάτημα ενός κουμπιού ακόμη και σύνδεση στο διαδίκτυο.

Επίσης, χάρη στην ψηφιακή τεχνολογία, ο τηλεθεατής θα έχει τη δυνατότητα να παραλάβει την καρέκλα του σκηνοθέτη και να επιλέξει, για παράδειγμα, την κάμερα από την οποία θα παρακολουθήσει ένα στιγμιότυπο ποδοσφαιρικού αγώνα ή πότε θα δει το σκορ, τα στατιστικά και ένα replay. Ο τομέας προγραμματισμού των καναλιών θα αδυνατίσει, καθώς ο τηλεθεατής θα είναι πλέον εκείνος που θα επιλέγει πότε θα δει μία εκπομπή. Η τεχνολογία παρέχει τη δυνατότητα προβολής 72 διαφορετικών ταινιών μέσα σε μια ημέρα ή μιας ταινίας 48 φορές μέσα στην ίδια ημέρα, με έναρξη προβολής κάθε μισή ώρα. Οι επιλογές του θεατή θα γίνονται με τη βοήθεια ενός τηλεχειριστηρίου που θα θυμίζει το σημερινό, αλλά θα έχει πολλές επιπλέον δυνατότητες. Τον ρόλο του βοηθού σε κάθε επιλογή θα παίζει ο Ηλεκτρονικός Οδηγός Προγράμματος (EPG), ένα είδος εξελιγμένης τηλεκειμενογραφίας (Teletext) με εικόνες και πολλές δυνατότητες αμφίδρομων λειτουργιών[2].

Κεφάλαιο 2 : DVB-T

2.1 Εισαγωγή στα πρότυπα DVB

Η οικογένεια προτύπων DVB (digital video broadcasting) αναπτύχθηκε για να προσφέρει υπηρεσίες ψηφιακής τηλεόρασης εκμεταλλευόμενη ένα ευρύ φάσμα μέσωσων διανομής, δορυφορικών, καλωδιακών και επίγειων. Όλα τα DVB standards έχουν υιοθετήσει τα πρότυπα MPEG-2 για την συμπίεση ήχου και κινούμενης εικόνας. Χάρη στη χρήση των πακέτων μεταφοράς MPEG-2 ως γενικευμένων 'μεταφορέων δεδομένων' (data containers), ένα MPEG-2 Transport stream και συνεπώς ένα σύστημα DVB μπορεί να μεταφέρει σχεδόν πολλαπλά κανάλια PAL/SECAM/NTSC μέχρι και υψηλής ταχύτητας υπηρεσίες πολυμέσων και δεδομένων.

- Το δορυφορικό σύστημα DVB-S (digital video broadcasting-satellite) είναι το παλαιότερο και πιο διαδεδομένο από την οικογένεια προτύπων DVB και έχει αδιαμφισβήτητα τύχει παγκόσμιας αποδοχής. Το DVB-S σχεδιάστηκε για να εκμεταλλεύεται πλήρως το εύρος ζώνης των δορυφορικών τηλεοπτικών αναμεταδοτών. Χρησιμοποιεί ρυθμό μεταφοράς των 54 Mbps με διαμόρφωση QPSK σε συνδυασμό με ένα σχήμα διπλής κωδικοποίησης και διεμπλοκής (coding/interleaving). Είναι το μόνο πρότυπο από την οικογένεια DVB που έχει τύχει εμπορικής εφαρμογής και στη χώρα μας.
- Το καλωδιακό σύστημα DVB-C (digital video broadcasting-cable) έχει τεχνικά αρκετές ομοιότητες με το DVB-S. Η διαφορά του έγκειται στο ότι χρησιμοποιεί την αποδοτικότερη αλλά και πιο ευαίσθητη σε παρεμβολές διαμόρφωση 64QAM αντί για την QPSK. Έτσι ένα καλωδιακό κανάλι των 8MHz μπορεί να μεταφέρει 38.5 Mbps. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί QAM λιγότερων ή περισσότερων επιπέδων. Σε κάθε περίπτωση, υπάρχει μια αντιστάθμιση μεταξύ ταχύτητας και αξιοπιστίας.
- Το επίγειο σύστημα DVB-T (digital video broadcasting-terrestrial) αποτελεί το τελευταίο χρονικά μέλος της οικογενείας DVB. Επιτυγχάνει ψηφιακή μετάδοση υψηλών ταχυτήτων πάνω από το δύσκολο επίγειο κανάλι χρησιμοποιώντας διαμόρφωση πολλαπλών φερόντων στο σχήμα της πολυπλεξίας με ορθογωνική διαίρεση συχνότητας (orthogonal frequency division multiplexing-OFDM). Το σχήμα OFDM του DVB-T χρησιμοποιεί ένα μεγάλο αριθμό φερόντων (6817 ή 1704 για μετάδοση 8K και 2K αντίστοιχα), κάθε ένα από τα οποία διαμορφώνεται κατά QPSK ή 16QAM ή 64QAM. Έτσι η πληροφορία κατανέμεται ομοιόμορφα στο φάσμα και σε συνδυασμό με κωδικοποίηση και διεμπλοκή δύο στρωμάτων, το σήμα αποκτά

μεγάλη ευρωστία ακόμη και σε περιβάλλοντα με ισχυρές διαλείψεις και φαινόμενα πολυδιαδρομικής μετάδοσης (multipath)[3].

- Το DVB-H (Digital Video Broadcasting-Handheld) επιτρέπει την παροχή ζωντανής εκπομπής τηλεόρασης σε συμβατές κινητές συσκευές χειρός. Το πρότυπο DVB-H είναι εγκεκριμένο από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Τηλεπικοινωνιών (ETSI) και χρησιμοποιήθηκε σε πιλοτικά προγράμματα κινητής τηλεόρασης σε διάφορες χώρες. Το DVB-H στηρίζεται στην υπάρχουσα DVB-T υποδομή γεγονός που μειώνει το κόστος της υλοποίησης. Συγκεκριμένα περιέχει επιπλέον χαρακτηριστικά που ικανοποιούν τις απαιτήσεις κινητών δεκτών χειρός που λειτουργούν με μπαταρία. Οι τέσσερις κύριες απαιτήσεις είναι: 1. υπηρεσίες εκπομπής για κινητή χρήση με αποδεκτή ποιότητα, 2. ένα τυπικό περιβάλλον χρήσης και γεωγραφική κάλυψη, όπως το κινητό ραδιόφωνο, 3. πρόσβαση σε υπηρεσίες εν κινήσει με υψηλή ταχύτητα και μη αντιληπτή μετάβαση (handover) από τη μια κυψέλη στην άλλη και 4. συμβατότητα με το DVB-T. Το κυριότερο χαρακτηριστικό κατά την ανάπτυξη μιας συσκευής χειρός είναι η διάρκεια της μπαταρίας. Για τη μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής της μπαταρίας το DVB-H χρησιμοποιεί μια διαδικασία που ονομάζεται τεμαχισμός του χρόνου (time slicing). Με αυτόν τον τρόπο τα δεδομένα μεταδίδονται στη συσκευή χειρός κατά ριπές. Όταν δεν μεταδίδονται δεδομένα ο δέκτης είναι ανενεργός και η συσκευή καταναλώνει μικρότερη ενέργεια. Οι ριπές των δεδομένων αποθηκεύονται στη μνήμη του δέκτη και εμφανίζονται στην οθόνη του χρήστη συνεχώς, χωρίς αυτός να αντιλαμβάνεται διακοπές κατά τη λήψη[4][5].

Το DVB-T είναι το πιο πρόσφατο (και πιο εξελιγμένο τεχνολογικά) πρότυπο και οι προοπτικές χρήσης του είναι πολυάριθμες. Δίκτυα παροχής δεδομένων βασισμένα στο DVB-S και DVB-C έχουν ήδη αναπτυχθεί αλλά οι δυνατότητες και οι προοπτικές τους είναι σχετικά περιορισμένες. Επίσης το επίγειο σύστημα δεν απαιτεί ιδιαίτερο εξοπλισμό από πλευράς χρήστη (π.χ. δορυφορικό δέκτη ή καλωδιακή υποδομή) και από την πλευρά του παροχέα αποτελεί την πιο προσιτή και πιο ευέλικτη λύση σε σχέση με την δορυφορική μετάδοση ή το καλωδιακό δίκτυο[6]. Τέλος, ένα επίγειο ψηφιακό σύστημα μπορεί να οργανωθεί σε περιοχές κάλυψης με κυψελωτή δομή και να προσφέρει υπηρεσίες και σε κινούμενους χρήστες μια δυνατότητα που οι υπόλοιπες τεχνολογίες δεν μπορούν να προσφέρουν.

2.1.1 DVB-T



Το πρότυπο DVB-T όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ορίζει τις προδιαγραφές για την επίγεια μετάδοση ψηφιακού τηλεοπτικού σήματος. Αναπτύχθηκε όπως και τα υπόλοιπα προαναφερθέντα standards από το DVB Forum και εγκρίθηκε από τον ETSI ως πανευρωπαϊκό πρότυπο το 1997. Το πρώτο επίγειο ψηφιακό πρόγραμμα ξεκίνησε στην Αγγλία έναν χρόνο αργότερα. Σήμερα συστήματα DVB-T είναι σε χρήση στην ευρωπαϊκή ένωση, τη Ρωσία, την ανατολική Ευρώπη, την Ινδία, την Σιγκαπούρη και την Αυστραλία. Το σύστημα ATSC που αναπτύχθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες υπολείπεται ως προς κάποια χαρακτηριστικά (κινητικότητα χρήστη, αντοχή σε multipath, δημιουργία SFN), ενώ το ISDB-T της Ιαπωνίας βασίστηκε ουσιαστικά στη φιλοσοφία του DVB-T.

Καθώς το DVB-T από μόνο του ορίζει ένα σύστημα εκπομπής ευρείας κάλυψης (broadcasting) παραλείποντας τον ορισμό της τεχνολογίας επιστροφής (reverse path) και δεδομένου ότι η μορφή του σήματος βασικής ζώνης και ο αλγόριθμος συμπίεσης της εικόνας περιγράφεται στην προδιαγραφή MPEG-2, το πρότυπο DVB-T περιορίζεται αποκλειστικά στην περιγραφή των λειτουργιών του διαμορφωτή. Αυτός δέχεται από τον πολυπλέκτη το ρεύμα μεταφοράς MPEG-2 που περιέχει πολυπλεγμένες τις υπηρεσίες εικόνας, ήχου και δεδομένων υπό την μορφή σήματος βασικής ζώνης και παράγει το προς μετάδοση RF σήμα. Το τελευταίο έχει εύρος ζώνης 8MHz και είναι κεντραρισμένο σε ένα από τα κανάλια 21-69 της μπάντας των UHF δηλαδή όπως ακριβώς ένα αναλογικό τηλεοπτικό κανάλι.

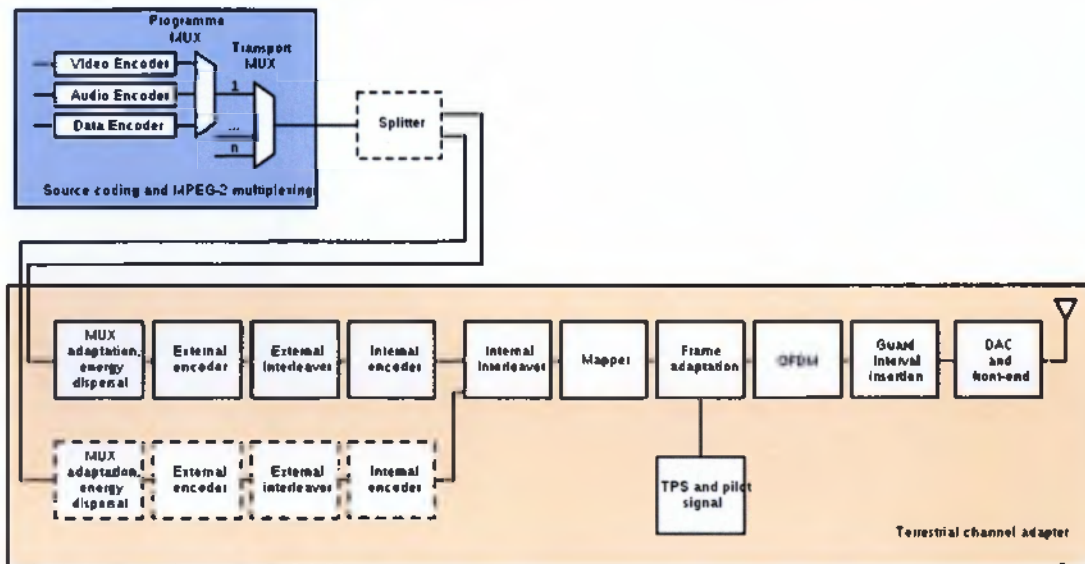
Αντί για single carrier διαμόρφωση ο διαμορφωτής DVB-T χρησιμοποιεί σχήμα OFDM για να αντιμετωπίσει στη μετάδοση διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα. Αυτό το χαρακτηριστικό του OFDM διευκολύνει πολύ τη λήψη δεδομένων ευρείας ζώνης και από κινητούς χρήστες. Γι' αυτό εξάλλου και ως τεχνολογία γενικά είναι η κύρια υποψήφια για τις τεχνολογίες προσωπικών επικοινωνιών 4th γενιάς καθώς θεωρείται το μέλλον των ασύρματων επικοινωνιών υψηλής ταχύτητας. Στο χώρο μάλιστα των τεχνολογιών εκπομπής (broadcasting) το OFDM παρέχει τη δυνατότητα κατασκευής δικτύων με διεσπαρμένους πομπούς που εκπέμπουν συγχρονισμένα τα ίδια δεδομένα στην ίδια συχνότητα χωρίς η συμβουλή των σημάτων τους να επηρεάζει σημαντικά τον δέκτη. Τέτοια δίκτυα ονομάζονται single frequency networks και μπορούν να αυξήσουν την συνολική χωρητικότητα του δικτύου σε ολόκληρη την γεωγραφική επικράτεια μέχρι και 45 φορές καθώς εξαλείφεται η ανάγκη να υπάρχουν ελεύθερα κανάλια σε ορισμένες περιοχές για να αποφεύγονται παρεμβολές με γειτονικούς πομπούς. Οδηγίες για τον σχεδιασμό και την τοπολογία των SFNs παρέχονται από τον ETSI[7].

Το πρότυπο DVB-T συνδυάζει το OFDM με σύνθετες τεχνικές ισοστάθμισης και κωδικοποίησης εισάγοντας την τεχνολογία του κωδικοποιημένου OFDM. Συνδυάζοντας κωδικοποίηση και διεμπλοκή δύο επιπέδων, η διαδικασία

διαμόρφωσης καθιστά το σήμα ιδιαίτερα ανθεκτικό σε πολυδιαδρομική διάδοση και παρεμβολές.

Η λειτουργία του διαμορφωτή είναι σχετικά σύνθετη (σχήμα 2). Οι λειτουργίες αυτές με τη σειρά που εφαρμόζονται στο ρεύμα μεταφοράς είναι οι εξής:

- Προσαρμογή MPEG-2 πακέτων και τυχαιοποίηση (randomization).
- Εξωτερική κωδικοποίηση (προστασία έναντι λαθών με κώδικα Reed-Solomon).
- Εξωτερική συνελκτική διεμπλοκή (convolutional interleaving).
- Εσωτερική κωδικοποίηση με διάτρητο συνελκτικό κώδικα (punctured convolutional code).
- Εσωτερική διεμπλοκή (inner interleaving) στον χρόνο και στη συχνότητα.
- Αντιστοίχιση και διαμόρφωση των φερόντων.
- Πολυπλεξία κατά OFDM με αντίστροφο ταχύ μετασχηματισμό Fourier (IFFT).
- Άνω μετατροπή (up conversion) στην τελική RF συχνότητα.



Σχήμα 2. Τα στάδια του DVB-T

Η τελευταία λειτουργία δεν υποστηρίζεται εγγενώς από αρκετούς διαμορφωτές οπότε απαιτείται μία πρόσθετη μονάδα για άνω μετατροπή.

Στην περίπτωση της διαμόρφωσης το σήμα βασικής ζώνης προϋπάρχει διαιρεμένο σε δύο ρεύματα μεταφοράς: ένα υψηλής μεταφοράς (high priority TS) και ένα χαμηλής (low priority TS). Τα δύο σήματα διαμορφώνονται ταυτόχρονα σε ένα ιεραρχικό QAM σχήμα. Ως αποτέλεσμα ένας δείκτης με κακές συνθήκες λήψης λαμβάνει μόνο τα δεδομένα υψηλής προτεραιότητας, ενώ ένας με καλύτερες λαμβάνει το σύνολο. Η λειτουργία ιεραρχικής διαμόρφωσης παρέχει σημαντική ευελιξία στο σύστημα, ιδίως όταν συνοδεύεται από κλιμακωτή κωδικοποίηση της κινούμενης εικόνας κατά MPEG-2 (scalable MPEG-2 encoding). Δυστυχώς η λειτουργία αυτή υποστηρίζεται από ελάχιστους διαμορφωτές και από ακόμη λιγότερους δέκτες.

Προσαρμογή MPEG-2 πακέτων και τυχαιοποίηση (Randomization)

Το σήμα βασικής ζώνης που εισέρχεται στο διαμορφωτή είναι σταθερού ρυθμού (constant bit rate – CBR) και οργανωμένο σε πακέτα σταθερού μήκους των 188 bytes. Κάθε πακέτο ξεκινά με το byte συγχρονισμού. Προκειμένου να περιοριστεί το ενδεχόμενο να υπάρχουν μεγάλα διαστήματα χωρίς δυαδική μεταβολή (μακριές ακολουθίες “0” ή “1” – κάτι που συμβαίνει π.χ. σε πακέτα κενού περιεχομένου που χρησιμοποιούνται μόνο για stuffing), ακολουθείται μια διαδικασία τυχαιοποίησης.

Εξωτερική κωδικοποίηση και συνελκτική διεμπλοκή

Μετά το στάδιο της τυχαιοποίησης ακολουθεί η εξωτερική κωδικοποίηση (outer coding). Ένας συντομευμένος κώδικας Reed-Solomon RS που προκύπτει από τον αρχικό συστηματικό κώδικα RS, εφαρμόζεται σε κάθε τυχαιοποιημένο πακέτο των 188 bytes. Ο κώδικας Reed-Solomon, αυξάνει το μήκος του πακέτου κατά 16 Bytes και επιτρέπει να διορθωθούν μέχρι και 8 λανθασμένα bytes σε τυχαίες θέσεις μέσα στο προστατευμένο πακέτο.

Μετά την κωδικοποίηση, τα προστατευμένα πακέτα υποβάλλονται σε μια συνελκτική διεμπλοκή (convolutional interleaving). Η διαδικασία διεμπλοκής βασίζεται στη μέθοδο Forney.

Εσωτερική κωδικοποίηση και διεμπλοκή

Το σύστημα επιτρέπει μια ευρεία επιλογή διατρητών συνελκτικών κωδικών (punctured convolutional codes), βασισμένων σε ένα μητρικό συνελκτικό κώδικα. Επιπρόσθετα με το μητρικό κώδικα, το σύστημα επιτρέπει διάτρητους κώδικες, εφαρμόζοντας συγκεκριμένα πρότυπα διάτρησης (puncturing patterns) στο μητρικό κώδικα.

Η έξοδος του εσωτερικού κωδικοποιητή υφίσταται διεμπλοκή τόσο σε επίπεδο bits όσο και σε επίπεδο συμβόλων. Η ακριβής αντιστοιχία των bits εισόδου στα τελικά διαμορφωμένα σύμβολα, εξαρτάται από τον τύπο της διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται.

Διαμόρφωση και μετάδοση

Η διαδικασία της εσωτερικής διεμπλοκής παράγει μια ακολουθία από bits ήδη οργανωμένη σε σύμβολα QAM. Τα δυνατά σχήματα διαμόρφωσης είναι : QPSK (2 bits / symbol), 16QAM (4 bits / symbol), και 64QAM (6 bits / symbol). Τα σύμβολα ομαδοποιούνται και μεταδίδονται ταυτόχρονα με τη χρήση πολυπλεξίας OFDM.

Ωφέλιμο bit rate

Η τιμή που περισσότερο ίσως ενδιαφέρει τον παροχέα DVB-T είναι το ωφέλιμο bit rate που μπορεί να μεταφερθεί το ψηφιακό σήμα, δηλαδή ο ρυθμός του ρεύματος μεταφοράς MPEG-2 που μεταδίδεται. Η τιμή αυτή εξαρτάται από τη διάρκεια του διαστήματος φρούρησης, τον ρυθμό κωδικοποίησης και τον τύπο της διαμόρφωσης, όπως φαίνεται και στον πίνακα 1 (τιμές σε Mbps).

Πίνακας 1: Ωφέλιμο Bit Rate για DVB-T, σε κανάλι 8 MHz

Available bitrates (Mbit/s) for a DVB-T system in 8 MHz channels					
Modulation	Coding rate	Guard interval			
		1/4	1/8	1/16	1/32
QPSK	1/2	4 976	5 529	5 855	6 032
	2/3	6 635	7 373	7 806	8 043
	3/4	7 465	8 294	8 782	9 048
	5/6	8 294	9 216	9 758	10 053
	7/8	8 709	9 676	10 246	10 556
16-QAM	1/2	9 953	11 059	11 709	12 064
	2/3	13 271	14 745	15 612	16 086
	3/4	14 929	16 588	17 564	18 096
	5/6	16 588	18 431	19 516	20 107
	7/8	17 418	19 353	20 491	21 112
64-QAM	1/2	14 929	16 588	17 564	18 096
	2/3	19 906	22 118	23 419	24 128
	3/4	22 394	24 882	26 346	27 144
	5/6	24 882	27 647	29 273	30 160
	7/8	26 126	29 029	30 737	31 668

Ο συνδυασμός των παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν βρίσκεται στην επιλογή του χρήστη. Γενικά πάντως ισχύει ότι όσο αυξάνει ο ωφέλιμος ρυθμός, τόσο πιο ευάλωτο γίνεται το σήμα σε φαινόμενα διαλείψεων και πολυδιαδρομικής μετάδοσης (Multipath)[8]. Απαιτείται δηλαδή να γίνει ένας συμβιβασμός (trade-off), από την πλευρά του παροχέα μεταξύ χωρητικότητας και ανθεκτικότητας του σήματος.

2.1.2 Δυνατότητες του DVB-T

Η δυνατότητα χρήσης του συστήματος εκπομπής της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης ως μέσου ευρυζωνικής μετάδοσης δεδομένων ανοίγει νέες προοπτικές για αμφίδρομες υπηρεσίες πληροφορίας και πολυμέσων στους τελικούς χρήστες. Εξάλλου παρόλο που η ψηφιακή τεχνολογία φαίνεται να ξεπερνά πολλούς περιορισμούς της αναλογικής μετάδοσης είναι σχεδόν βέβαιο ότι αυτά τα πλεονεκτήματα από μόνα τους δεν μπορούν να εγγυηθούν μια επιτυχημένη εισαγωγή του DVB-T σε χώρες όπως η Ελλάδα όπου η επίγεια αναλογική τηλεόραση κατέχει τη μερίδα του λέοντος στο χώρο της τηλεοπτικής μετάδοσης. Υπηρεσίες «προστιθέμενης αξίας» (added-value) είναι αναγκαίες για να προσελκύσουν περισσότερους χρήστες και να αυξήσουν τα κέρδη των τηλεοπτικών εταιρειών και των παροχέων υπηρεσιών. Μπορεί η αγορά της ψηφιακής τηλεόρασης μέχρι τώρα να συντηρείται με τη χρέωση απλής τηλεθέασης όπως γίνεται και στη χώρα μας αλλά το μέλλον όσον αφορά την εμπορική εκμετάλλευση βρίσκεται στις σύνθετες και

πραγματικά αμφίδρομες υπηρεσίες. Αυτές οι υπηρεσίες είναι που τελικά θα διαφοροποιήσουν τον ψηφιακό τηλεοπτικό παροχέα από τον ανταγωνισμό.

Για παράδειγμα η συνδυασμένη λήψη κινούμενης εικόνας, Internet και πολυμεσικού περιεχομένου από κινητούς χρήστες μπορεί να είναι ιδιαίτερα ελκυστική και ως εκ τούτου καταλυτική για την αποδοχή του DVB-T από το ευρύ κοινό. Εξάλλου μόνο η τεχνολογία της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης μπορεί να παρέχει δυνατότητα κίνησης σε έναν χρήστη αμφίδρομου τηλεοπτικού δικτύου. Και η δυνατότητα αυτή τονίζει μεταξύ άλλων την υπεροχή του ευρωπαϊκού DVB-T έναντι ανταγωνιστικών προτύπων.

Η λήψη του σήματος DVB-T από σταθερούς και κινητούς χρήστες με μικρούς σε μεγέθους και προσιτούς δέκτες / αποκωδικοποιητές δίνει τη δυνατότητα στον καθένα να προσπελάσει και να χρησιμοποιήσει παντού και οποτεδήποτε ακόμη και ευρυζωνικές υπηρεσίες δεδομένων για επαγγελματική ή προσωπική χρήση. Ιδιαίτερα απλοποιημένοι και οικονομικά προσιτοί δέκτες έχουν ήδη αναπτυχθεί και ενσωματωθεί σε ένα μόνο ολοκληρωμένο κύκλωμα, με απόδοση πολύ κοντά σε αυτή ενός προτύπου επαγγελματικού δέκτη. Ένα κανάλι επιστροφής χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις μπορεί να προστεθεί για να προδώσει το χαρακτήρα της αληθινής διαδραστικότητας (true interactivity) με ιδιαίτερα αξιόλογα αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 3 : Ψηφιοποίηση και Συμπύεση

3.1 Εισαγωγή

Η εκπομπή αναλογικού τηλεοπτικού σήματος η οποία είναι η βάση της σχεδίασης των σημερινών δικτύων δεν μπορεί πλέον να αντεπεξέλθει στις σύγχρονες απαιτήσεις των παραγωγών τηλεοπτικών προγραμμάτων. Τόσο η είσοδος της κάμερας όσο και η έξοδος του τηλεοπτικού δέκτη είναι βέβαια αναλογικά σήματα, ωστόσο όλα τα ενδιάμεσα στάδια (συμπύεση, επεξεργασία, αποθήκευση, μίξη κλπ.) γίνονται πλέον αποκλειστικά με ψηφιακό εξοπλισμό. Είναι φανερό λοιπόν ότι η εκπομπή του σήματος με ψηφιακό τρόπο θα διευκολύνει τη λειτουργία όλου του συστήματος και θα δώσει την ευκαιρία για χρήση νέων υπηρεσιών που μέχρι τώρα η εφαρμογή τους ήταν δύσκολη.

Το βασικό πλεονέκτημα όλων των ψηφιακών συστημάτων έναντι των αναλογικών είναι η δυνατότητα ακριβούς αναπαραγωγής στο δέκτη της ψηφιακής ακολουθίας που εστάλη από τον πομπό. Τα αναλογικά σήματα υφίστανται εξασθένηση και παραμόρφωση κατά τη μετάδοσή τους, ενώ η διέλευσή τους από τον εξοπλισμό εκπομπής και λήψης εισάγει επιπλέον θόρυβο. Τα φαινόμενα αυτά επιδρούν προσθετικά στο σήμα επιφέροντας μόνιμη αλλοίωση η οποία μπορεί βέβαια να περιοριστεί αποτελεσματικά, σε σημείο που να μην γίνεται αισθητή, δεν επιτρέπει όμως την ακριβή αναπαραγωγή του αρχικού σήματος. Αντίθετα, το ψηφιακό σήμα μπορεί να αναπαραχθεί ακριβώς, εφόσον ικανοποιείται ένα κατώφλι σηματοθορυβικού λόγου στο δέκτη. Η χρήση μάλιστα κώδικα με δυνατότητα διόρθωσης σφαλμάτων βελτιώνει ακόμα περισσότερο την αξιοπιστία του συστήματος. Στην περίπτωση τηλεοπτικών σημάτων αυτό σημαίνει ότι η ψηφιακή εκπομπή εξασφαλίζει άριστη ποιότητα λήψης με ελάχιστες διακυμάνσεις μέσα στα γεωγραφικά όρια κάλυψης. Το γεγονός ότι στα όρια της περιοχής κάλυψης ενός πομπού η λήψη του σήματος μεταβαίνει απότομα και σε μικρό περιθώριο ισχύος από το τέλειο στην κατάσταση όπου δεν είναι δυνατή η αναπαραγωγή εικόνας, διευκολύνει σημαντικά το σχεδιασμό των δικτύων εκπομπής ώστε να επιτύχουν τη βέλτιστη κάλυψη ενός δεδομένου χώρου.

Η ψηφιακή μετάδοση στις συχνότητες UHF και VHF θα επιτρέψει την αποδοτικότερη αξιοποίηση του τηλεοπτικού φάσματος, που στις περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες είναι πλέον ανεπαρκές. Ενδεικτικά, με το DVB-T σε ένα δίαυλο 8 MHz μπορεί να επιτευχθεί ρυθμός μετάδοσης μέχρι περίπου 32 Mbit/s, ενώ ένα τηλεοπτικό πρόγραμμα SDTV μαζί με τις συνοδευτικές υπηρεσίες (Teletext κ.α.) χρειάζεται από 3 έως 6 Mbit/s ανά περίπτωση. Πρακτικά ένας δίαυλος μπορεί να εξυπηρετήσει αποτελεσματικά 4 έως 6 πλήρη προγράμματα SDTV, είτε 1 πρόγραμμα υψηλής ευκρίνειας (HDTV)[9]. Ακόμη η ευκολία ενσωμάτωσης νέων υπηρεσιών σε υπάρχον πρόγραμμα σημαίνει ότι είναι δυνατή η αναβάθμιση και ο εμπλουτισμός ενός προγράμματος χωρίς να είναι απαραίτητη η εξασφάλιση επιπλέον συχνοτήτων.

Η αναλογική μετάδοση σήματος video, αποτελεί μια ώριμη πλέον τεχνολογία, μετά από εξήντα και πλέον χρόνια από την πρώτη εκπομπή ασπρόμαυρης τηλεόρασης. Πολλά εμπορικά συστήματα στηρίζονται ακόμη και σήμερα στις ίδιες βασικές αρχές για την επίτευξη ασύρματης μετάδοσης σήματος video, μεταξύ κάποιου πομπού και κάποιου δέκτη. Η κυριότερη όμως τάση που επικρατεί σήμερα αλλά θα επικρατήσει και στο μέλλον είναι η μετάδοση ψηφιακού σήματος video. Το σήμα αυτό πρέπει να υποστεί κάποιας μορφής συμπύεση πριν τη μετάδοσή του,

αλλιώς ο ρυθμός δεδομένων του είναι υπερβολικά μεγάλος για τη μετάδοσή του μέσα από τους τηλεπικοινωνιακούς διαύλους που υπάρχουν στην πράξη[10]. Η εξάλειψη των λαθών που συμβαίνουν στο σήμα αυτό όταν μεταδίδεται μέσα από ασύρματα κανάλια είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής και έχει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον.

3.2 Το πρότυπο 4:2:2

Προκειμένου να επεξεργαστούμε και να εκπέμψουμε πληροφορία video χρησιμοποιώντας ψηφιακές τεχνικές, είναι απαραίτητη η μετατροπή του αναλογικού σήματος video στο ψηφιακό πεδίο. Αναλογικά σήματα τηλεόρασης και video δειγματοληπτούνται και μετατρέπονται σε ψηφιακή μορφή. Η επιλογή του ρυθμού δειγματοληψίας και της ανάλυσης έχει σημαντική επίδραση στη ποιότητα του ψηφιακού σήματος video.

Από τη δεκαετία του 1980 καθιερώθηκε ως διεθνές πρότυπο ψηφιοποίησης των σημάτων των συμβατικών συστημάτων τηλεόρασης η αναφορά 601-4 της ITU. Στο πρότυπο αυτό που είναι γνωστό ως πρότυπο 4:2:2 η κωδικοποίηση των πληροφοριών χρώματος γίνεται με τη μέθοδο της κωδικοποίησης με συνιστώσες (component coding) στην οποία το σήμα φωτεινότητας (Y) και τα σήματα χρωμοδιαφοράς (CR και CB) κωδικοποιούνται και εκπέμπονται με ξεχωριστές ροές. Με τον τρόπο αυτόν εξουδετερώνονται τα προβλήματα που υπάρχουν στην αναλογική τηλεόραση από την ενδοδιαμόρφωση των σημάτων χρωμοδιαφοράς στο σήμα φωτεινότητας. Η διεθνής καθιέρωση του προτύπου ψηφιοποίησης του οπτικού σήματος 4:2:2 έχει τεράστια σημασία γιατί μειώνει τις διαφορές των τριών αναλογικών συστημάτων σε μια μόνο, τη συχνότητα πεδίου και τον αριθμό γραμμών ανά εικόνα. Το ευρωπαϊκό πρότυπο περιέχει 625 γραμμές ανά εικόνα με συχνότητα πεδίου 50Hz και το αμερικάνικο 525 γραμμές ανά εικόνα με συχνότητα πεδίου 60Hz. Με τον τρόπο αυτόν απλοποιείται η ανταλλαγή τηλεοπτικών και λοιπών προγραμμάτων σε παγκόσμια κλίμακα.

Στο πρότυπο 4:2:2, καθιερώνεται η χρήση παλμοκωδικής διαμόρφωσης (pulse code modulation - με ακρώνυμο PCM) με συχνότητα δειγματοληψίας 13,5 MHz και τεμαχισμό του σήματος σε $2^8 = 256$ επίπεδα. Το σήμα φωτεινότητας ενός πλαισίου NTSC (αμερικάνικο πρότυπο video) δειγματοληπτείται για να παράγει μια εικόνα 525 γραμμών με συχνότητα 60 Hz, η κάθε μια από τις οποίες περιλαμβάνει 858 δείγματα. Η ενεργός περιοχή του ψηφιοποιημένου πλαισίου είναι 720×486 εικονοστοιχεία (pixels). Το σήμα φωτεινότητας ενός πλαισίου PAL ή SECAM (ευρωπαϊκό πρότυπο video) δειγματοληπτείται για να δώσει μια εικόνα 625×486 δειγμάτων με συχνότητα πεδίου 50 Hz και η ενεργός περιοχή σ' αυτήν την περίπτωση είναι 720×576 εικονοστοιχεία. Τα σήματα χρωμικότητας δειγματοληπτούνται σε μικρότερο ρυθμό: η κάθετη ανάλυση είναι η ίδια, αλλά η οριζόντια είναι η μισή.

Για την κωδικοποίηση του εύρους του σήματος απαιτούνται 8 δυαδικά ψηφία. Η συχνότητα δειγματοληψίας των 2 σημάτων χρωμοδιαφοράς είναι 6,75 MHz και η ονομασία του προτύπου αυτού ακριβώς οφείλεται στη σχέση της συχνότητας δειγματοληψίας των σημάτων χρωμοδιαφοράς με τη συχνότητα δειγματοληψίας του οπτικού σήματος. Το πρότυπο 4:2:2 κρίνεται ότι είναι σταθμός στην ιστορία της τηλεόρασης και αποτελεί τη βάση στην οποία στηρίζεται η ψηφιακή τηλεόραση, ωστόσο με απλό υπολογισμό βρίσκουμε ότι η απαιτούμενη ταχύτητα bit stream είναι θεωρητικά 216 Mbit/s και στην πράξη 250 Mbit/s. Για το πρότυπο NTSC έχουμε 30

πλαίσια ανά δευτερόλεπτο, 858×525 δείγματα φωτεινότητας (ανά πλαίσιο), $429 \times 525 \times 2$ δείγματα χρωματικότητας, 8 bits ανά δείγμα, οπότε προκύπτει: Bit rate = $30 \times 8 \times ((858 \times 525) + (429 \times 525 \times 2)) = 216.216$ Mbps. Αντίστοιχα, για τα πρότυπα PAL ή SECAM έχουμε 25 πλαίσια ανά δευτερόλεπτο, 864×625 δείγματα φωτεινότητας, $432 \times 625 \times 2$ δείγματα χρωμικότητας, 8 bits ανά δείγμα, οπότε: Bit rate = $25 \times 8 \times ((864 \times 625) + (432 \times 625 \times 2)) = 216.0$ Mbps.

Σήμερα τα στούντιο της τηλεόρασης έχουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν ψηφιακά στις απαιτούμενες ταχύτητες bit stream και αυτός είναι ο λόγος που η ψηφιακή τεχνολογία εφαρμόστηκε αρχικά για να βελτιώσει τη λειτουργία των στούντιο. Τη βελτίωση αυτή την παρατηρούμε καθημερινά στην παρουσίαση των τηλεοπτικών προγραμμάτων, στην παραγωγή διαφόρων κινηματογραφικών εφέ ή ακόμα και στην παραγωγή ειδικών εικόνων και προγραμμάτων με υπολογιστή. Η μετάδοση όμως των ψηφιοποιημένων οπτικών σημάτων με ταχύτητες της τάξεως των 250 Mbit/s από τα τηλεπικοινωνιακά μέσα (επίγεια εκπομπή, ασύρματα δίκτυα ή καλωδιακοί άξονες) με τις συνηθισμένες μεθόδους διαμορφώσεως απαιτεί εύρος συχνοτήτων της τάξεως των 125MHz και βέβαια η απαίτηση αυτή είναι απαγορευτική, αν ληφθεί υπόψη ότι το αναλογικό τηλεοπτικό κανάλι δεν ξεπερνά τα 7MHz.

3.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Ψηφιοποίησης

Η ψηφιοποίηση του σήματος video (εικόνας) έχει πολλά πλεονεκτήματα τα κυριότερα των οποίων είναι:

- Η μικρή ευαισθησία των ψηφιακών σημάτων στο θόρυβο. Τα αναλογικά σήματα σε αντίθεση με τα ψηφιακά επηρεάζονται από κάθε θόρυβο που μεταβάλλει το πλάτος, τη συχνότητα ή τη φάση τους.
- Με τα ψηφιακά σήματα σήμερα παρέχονται περισσότερες δυνατότητες για την επεξεργασία τους σε αντίθεση με τα αναλογικά, όπως για παράδειγμα η αποθήκευσή τους.
- Υψηλή ποιότητα εικόνας και ήχου.
- Δυνατότητα λήψης πολλών καναλιών με αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος διανομής ανά πρόγραμμα.
- Αυξημένη δυνατότητα επιλογής προγραμμάτων και υπηρεσιών.

Η ψηφιοποίηση όμως του σήματος video έχει και κάποια μειονεκτήματα όπως:

- Απαίτηση για μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων από το κανάλι μετάδοσης. Το ψηφιοποιημένο οπτικό σήμα απαιτεί, χωρίς συμπίεση, ρυθμό μετάδοσης 250 Mbit/s για τη συμβατική τηλεόραση και 1200 Mbit/s για την υψηλής ευκρίνειας.

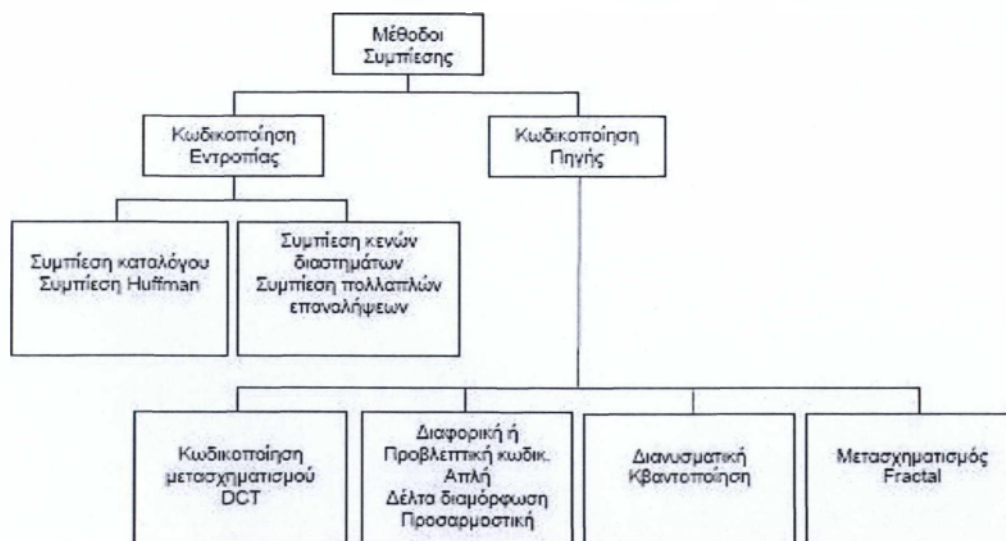
- Τα μεταδιδόμενα αναλογικά σήματα πρέπει πρώτα να μετατραπούν σε αναλογικά στο δέκτη.
- Με τη ψηφιακή μετάδοση δεν υπάρχει συμβατότητα με τις ήδη λειτουργούσες αναλογικές εγκαταστάσεις.

3.4 Συμπίεση Τηλεοπτικού Σήματος

Το ψηφιοποιημένο οπτικό σήμα του πρότυπου 4:2:2 απαιτεί ένα ρυθμό μετάδοσης περίπου 250 Mbit/s. Η άμεση εκπομπή αυτού του σήματος θα απαιτούσε ένα εύρος συχνοτήτων μεγαλύτερο από 100MHz. Το τεράστιο αυτό εύρος συχνοτήτων δεν είναι δυνατόν αλλά και οικονομικά εφικτό να διατεθεί. Χρειάζεται λοιπόν να γίνει μείωση της ποσότητας των δεδομένων που θα εκπεμφθούν. Δηλαδή τα δεδομένα να υποστούν συμπίεση (data compression). Η συμπίεση χαρακτηρίζεται από το λόγο συμπίεσης (compression ratio) που προκύπτει αν διαιρέσουμε την ποσότητα των δεδομένων πριν τη συμπίεση με αυτήν που έχουμε μετά τη συμπίεση.

Οι τεχνικές συμπίεσης ταξινομούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Τις χωρίς απώλεια δεδομένων και τις τεχνικές με απώλεια δεδομένων. Οι τεχνικές χωρίς απώλεια περιορίζουν τον όγκο των δεδομένων προσωρινά, για παράδειγμα κατά την εκπομπή του σήματος. Στο δέκτη το αρχικό σήμα μπορεί να ανακτηθεί με απόλυτη ακρίβεια, όπως ήταν τα αρχικά δεδομένα πριν τη συμπίεση. Οι τεχνικές συμπίεσης με απώλειες χαρακτηρίζονται από το ότι περιορίζουν μόνιμα τον όγκο δεδομένων. Στο δέκτη για παράδειγμα δεν υπάρχει η δυνατότητα το σήμα να ανακτηθεί με πλήρη ακρίβεια. Το πλεονέκτημα όμως αυτών των τεχνικών είναι ότι μπορούμε να πετύχουμε μεγάλους λόγους συμπίεσης.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη συμπίεση του ψηφιακού σήματος μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την κωδικοποίηση που γίνεται. Έχουμε λοιπόν την κωδικοποίηση εντροπίας και την κωδικοποίηση πηγής. Κάθε μια από αυτές περιλαμβάνει κάποιες επιμέρους τεχνικές (Σχήμα 3).



Σχήμα 3. Τεχνικές Ψηφιακής Συμπίεσης

Για την κατανόηση των τεχνικών κωδικοποίησης ορίζονται τα παρακάτω βήματα δείχνοντας μια τυπική ακολουθία από λειτουργίες που διεξάγεται κατά την συμπίεση εικόνων, βίντεο και ήχου (Σχήμα 4).



Σχήμα 4. Κυριότερα βήματα συμπίεσης δεδομένων

- Το **στάδιο της προετοιμασίας** περιλαμβάνει μετατροπή από αναλογική σε ψηφιακή και παράγει μια κατάλληλη ψηφιακή αναπαράσταση της πληροφορίας. Μια εικόνα διαιρείται σε blocks των 8x8 pixels και αναπαριστάται από ένα σταθερό αριθμό bits/pixel.
- Το **στάδιο της επεξεργασίας** είναι πραγματικά το πρώτο βήμα της διαδικασίας συμπίεσης το οποίο χρησιμοποιεί έμπειρους αλγορίθμους. Ένας μετασχηματισμός από το πεδίο χρόνου στο πεδίο συχνότητας μπορεί να διεξαχθεί χρησιμοποιώντας DCT. Στην περίπτωση συμπίεσης κινούμενου βίντεο η κωδικοποίηση χρησιμοποιεί ένα διάνυσμα κίνησης για κάθε block 8x8 pixel.
- Η **κωδικοποίηση εντροπίας** είναι συνήθως το τελευταίο βήμα. Αυτό συμπιέζει μια ακολουθιακή ψηφιακή ροή δεδομένων χωρίς απώλειες.

Η κωδικοποίηση και η κβαντοποίηση μπορούν να επαναληφθούν πολλές φορές σε αναδρομικές ανακυκλώσεις όπως στην περίπτωση της προσαρμοστικής, διαφορικής, παλμοκωδικής διαμόρφωσης (Adaptive Differential Pulse Code Modulation) ή ADPCM). Το Σχήμα 3, μας δείχνει τη διαδικασία συμπίεσης που ακολουθείται για την συμπίεση εικόνας. Η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται για την συμπίεση video και ήχου. Η αποσυμπίεση είναι η αντίστροφη διαδικασία της συμπίεσης.

Οι κωδικοποιητές και οι αποκωδικοποιητές μπορούν να εφαρμοστούν με ποικίλους τρόπους. Στις συμμετρικές εφαρμογές όπως είναι για παράδειγμα οι εφαρμογές διαλόγου έχουμε περίπου το ίδιο κόστος στην κωδικοποίηση και την αποκωδικοποίηση. Στην περίπτωση ασύμμετρων τεχνικών η διαδικασία αποκωδικοποίησης είναι λιγότερο δαπανηρή από την διαδικασία κωδικοποίησης.

3.4.1 Το πρότυπο MPEG-2

Τα πλεονεκτήματα της ύπαρξης τυποποίησης των δεδομένων στη συμπίεση των ψηφιοποιημένων οπτικών, ηχητικών και άλλων πληροφοριών είναι πάρα πολλά. Για τη δημιουργία αυτής της τυποποίησης το 1988 συστήθηκε μια επιτροπή, MPEG (Motion Picture Expert Group). Αρχικός σκοπός αυτής της επιτροπής ήταν να ορίσει τους αλγόριθμους για την κωδικοποίηση του οπτικού σήματος για την ψηφιακή αποθήκευση του σε CD-ROM με ένα ρυθμό περίπου 1,5 Mbit/s. Το πρότυπο που προέκυψε από τις εργασίες της επιτροπής ονομάστηκε MPEG-1. Οι εφαρμογές του MPEG-1 περιορίζονται σε μορφές οπτικού σήματος χωρίς αλληλοδιαδοχή πεδίων και

υποστηρίζει ρυθμούς μέχρι 1,5 Mbit/s. Το 1990 η ίδια επιτροπή άρχισε να εργάζεται για ένα άλλο πρότυπο το οποίο θα υποστήριζε ρυθμούς από 2 ως 10 Mbit/s και θα είχε τη δυνατότητα κωδικοποίησης οπτικού σήματος με αλληλοδιαδοχή πεδίων. Το 1994 δημοσιεύτηκε το νέο πρότυπο το οποίο ονομάστηκε MPEG-2 και έγινε διεθνές πρότυπο το 1995. Το πρότυπο MPEG-2, το οποίο σήμερα υποστηρίζει ρυθμούς μέχρι 30 Mbit/s, έτυχε γενικής αποδοχής και αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία στηρίζονται όλες οι προσπάθειες για τη δημιουργία συστημάτων ψηφιακής τηλεόρασης. Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας για την επιτυχία του MPEG-2 είναι η ικανότητα του να κωδικοποιεί την πληροφορία με μεταβλητό ρυθμό δεδομένων (VBR - Variable Bit Rate).

Το πρότυπο MPEG αποτελείται από τρία μέρη:

- Το σύστημα: Περιγράφει το συγχρονισμό ήχου και εικόνας την πολυπλεξία και άλλες λειτουργίες σχετικά με το σύστημα.
- Την εικόνα: Περιλαμβάνει την κωδικοποιημένη παρουσίαση των δεδομένων video και τη διαδικασία της αποκωδικοποίησης.
- Τον ήχο: Περιλαμβάνει την κωδικοποιημένη παρουσίαση των δεδομένων ήχου και τη διαδικασία της αποκωδικοποίησης.

Βασικό χαρακτηριστικό της κωδικοποίησης είναι ο εντοπισμός της επαναλαμβανόμενης πληροφορίας, ώστε αυτή να μην κωδικοποιείται περισσότερο από μια φορά αλλά να περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο αυτή η πληροφορία επαναλαμβάνεται. Αυτή η πληροφορία, που ουσιαστικά πλεονάζει, μπορεί το σύστημα να τη συμπιέσει χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές:

- Τον πλεονασμό στο χώρο στον οποίο εκμεταλλευόμαστε το γεγονός ότι πολλά γειτονικά εικονοστοιχεία είναι όμοια μεταξύ τους. Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται ευρύτητα και αποτελεσματικά ένας μαθηματικός μετασχηματισμός που είναι γνωστός ως διακριτός μετασχηματισμός του συνημίτονου DCT (Discrete Cosine Transform) και η συμπίεση αυτή καλείται ενδοπλαισιακή συμπίεση.
- Τον πλεονασμό στο χρόνο στον οποίο εκμεταλλευόμαστε το γεγονός ότι διαδοχικές εικόνες δεν διαφέρουν σε όλα τους τα σημεία, συνεπώς αντί να εκπέμπουμε την ίδια την εικόνα 25 φορές το δευτερόλεπτο εκπέμπουμε μόνον τις διαφορές των εικόνων, εάν υπάρχουν. Η συμπίεση αυτή αναφέρεται ως διαπλαισιακή συμπίεση.
- Τον στατικό πλεονασμό στον οποίο εκμεταλλευόμαστε το γεγονός ότι μερικοί κώδικες συμβαίνουν πιο συχνά από άλλους. Στην περίπτωση αυτή για τους κώδικες που συμβαίνουν συχνά χρησιμοποιούνται λιγότερα ψηφία.
- Τον ψυχοοπτικό πλεονασμό στον οποίο εκμεταλλευόμαστε την περιορισμένη ικανότητα της όρασεως να ξεχωρίζει τις λεπτομέρειες της εικόνας και τα κινούμενα είδωλα.

Η διαδικασία της συμπίεσης πραγματοποιείται με τα εξής στάδια:

- Το στάδιο της διαίρεσης της εικόνας σε macroblock.
- Το στάδιο του διακριτού μετασχηματισμού συνημιτόνου (DCT).
- Το στάδιο κβαντοποίησης και κωδικοποίησης.

Το πρότυπο MPEG-2 χρησιμοποιεί ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας, MPEG transport stream (MPEG-TS) για ήχο και δεδομένα. Είναι ένα είδος ψηφιακού μεταφορέα που ενθυλακώνει στοιχειωδώς ροές πακέτων δεδομένων [11]. Το πιο σημαντικό στοιχείο αυτής της διεργασίας είναι η πολυπλεξία, η οποία περιλαμβάνει συντονισμό ροών δεδομένων εισόδου και εξόδου, συντονισμό ρολογιών συγχρονισμού και διαχείριση ενταμιευτών. Τα δεδομένα διαιρούνται σε πακέτα (packets). Ο αποκωδικοποιητής παίρνει την πληροφορία που χρειάζεται για δέσμευση πόρων από αυτήν την ροή πολυπλεγμένων δεδομένων. Ο μέγιστος ρυθμός ροής δεδομένων περιγράφεται στην αρχή του πρώτου πακέτου της ροής δεδομένων.

Συγκεκριμένα το συμπίεμένο οπτικοακουστικό σήμα, που φέρει την ονομασία Στοιχειώδης Ροή (Elementary stream) μαζί με τις στοιχειώδεις ροές άλλων προγραμμάτων αλλά και οποιουδήποτε είδους άλλη ψηφιακή πληροφορία (όπως δεδομένα TCP/IP), πολυπλέκεται σε ένα κοινό ρεύμα μεταφοράς (MPEG-2 transport stream) που αποτελεί και το σήμα βασικής ζώνης για όλα τα συστήματα DVB όπως ορίζει η προδιαγραφή MPEG-2 Systems[11]. Το ρεύμα μεταφοράς περιέχει εκτός από στοιχειώδεις ροές, πληροφορίες για τις διάφορες υπηρεσίες, έλεγχο περιορισμένης πρόσβασης (conditional access), σηματοδότηση συγχρονισμού καθώς και ιδιωτικά δεδομένα (private data).

Το ρεύμα μεταφοράς είναι μια μορφή πολυπλεξίας σχεδιασμένη για σύνθετες εφαρμογές όπως τηλεοπτικά «μπουκέτα», που απαρτίζονται από πολλά ταυτόχρονα προγράμματα και ροές δεδομένων. Αποτελείται από μια διαδοχή πακέτων σταθερού μήκους των 188 bytes που ονομάζονται πακέτα μεταφοράς. Σύνολα δεδομένων που είναι μεγαλύτερα σε μέγεθος (για παράδειγμα μια συμπίεσμένη εικόνα, ένα τμήμα ήχου) θα υποστούν κατάτμηση και το περιεχόμενό τους θα μοιραστεί σε περισσότερα του ενός transport packets.

Το αναγνωριστικό πακέτο (Packet Identifier-PID) χρησιμοποιείται στη διαδικασία πολυπλεξίας και αποπολυπλεξίας για να ξεχωρίσει πακέτα με κοινό περιεχόμενο. Για παράδειγμα, τα πακέτα που φέρουν το σήμα εικόνας ενός τηλεοπτικού προγράμματος χαρακτηρίζονται από κοινό PID. Το πεδίο προσαρμογής (adaptation field) χρησιμοποιείται για να συμπληρώσει το τελευταίο από μια σειρά πακέτων που φέρουν ένα κατακερματισμένο σύνολο δεδομένων.

Η χρήση μικρών και σταθερού μήκους πακέτων διευκολύνει την προστασία του ψηφιακού σήματος από λάθη. Για παράδειγμα τα πρότυπα DVB για διαμόρφωση και μετάδοση ορίζουν ότι κάθε πακέτο MPEG-2 προστατεύεται με έναν block κώδικα του τύπου Reed-Solomon πριν προχωρήσει για περαιτέρω επεξεργασία στον πομπό. Η αυξημένη ανθεκτικότητα του ρεύματος μεταφοράς του προσφέρει μεγαλύτερες πιθανότητες «επιβίωσης» σε ένα κανάλι με λάθη, όπως είναι οποιοδήποτε περιβάλλον ασύρματης εκπομπής.

Η προδιαγραφή systems του MPEG-2 ορίζει την ακριβή μορφή του σήματος που εξέρχεται από τον πολυπλέκτη, στην προκειμένη περίπτωση του ρεύματος μεταφοράς. Δεν περιγράφει το φυσικό μέσο μεταφοράς και τα ηλεκτρικά

χαρακτηριστικά του, τη μέθοδο προστασίας έναντι λαθών ούτε και την τεχνική διαμόρφωσης[12]. Οι διαδικασίες αυτές ορίζονται από τις προδιαγραφές μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση από τα πρότυπα DVB

Για μια ροή δεδομένων δημιουργημένη σύμφωνα με το πρότυπο MPEG, παρέχει χρονοσφραγίδες (timestamps) που είναι απαραίτητες για συγχρονισμό. Οι χρονοσφραγίδες αυτές αναφέρονται στη συσχέτιση μεταξύ των πολυπλεγμένων ροών δεδομένων μόνο και όχι σε άλλες υπάρχουσες ροές δεδομένων του πρότυπου. Δεν ορίζει κωδικοποίηση σε πραγματικό χρόνο. Το MPEG καθορίζει την διαδικασία αποκωδικοποίησης αλλά όχι τον ίδιο τον αποκωδικοποιητή.

Το MPEG-2 έχει σαν στόχο μια υψηλότερη ανάλυση εικόνας ανάλογη του προτύπου CCIR 601 (περίπου 216 Mbit/s) και οδεύει προς μια ακόμα καλύτερη ποιότητα απαραίτητη για τη HDTV.

Σαν ένα γενικό και διεθνές πρότυπο, το MPEG-2 καθορίστηκε έτσι ώστε να παρέχει ελεγκτάσιμα προφίλ κάθε ένα από τα οποία θα υποστηρίζει χαρακτηριστικά που είναι απαραίτητα για ομάδες εφαρμογών. Το πρότυπο MPEG-2 κατασκευάστηκε με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να υποστηρίζει ψηφιακή μετάδοση video έως 80 Mbit/s μέσω καλωδίου, δορυφόρου και άλλων καναλιών μετάδοσης, καθώς και να υποστηρίζει ψηφιακή αποθήκευση και άλλες εφαρμογές επικοινωνίας. Παράμετροι όπως το κυρίως προφίλ και το υψηλό προφίλ είναι κατάλληλες για υποστήριξη HDTV μορφοτύπων[11].

Οι ειδικοί φρόντισαν στο να ελεγκταθούν τα χαρακτηριστικά του κυρίως προφίλ με το να καθορίσουν ένα ιεραρχικό/κλιμακωτό προφίλ. Στόχος αυτού του προφίλ είναι να υποστηρίζει εφαρμογές όπως επίγεια τηλεόραση (τόσο κοινή όσο και HDTV), συστήματα video για δίκτυα μεταγωγής πακέτου, συμβατότητα με παλαιότερες εφαρμογές και πρότυπα όπως το MPEG-1 και H.261 και άλλες εφαρμογές που απαιτούν κωδικοποίηση πολλών επίπεδων. Για παράδειγμα, ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να δώσει στον καταναλωτή την επιλογή να χρησιμοποιήσει ένα φορητό δέκτη για ν' αποκωδικοποιήσει το τηλεοπτικό σήμα συνηθισμένης ευκρίνειας ή έναν μεγαλύτερο, σταθερό δέκτη για ν' αποκωδικοποιήσει το σήμα της τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας (HDTV) από το ίδιο κανάλι μετάδοσης.

Το πρότυπο MPEG-2 χρησιμοποιεί μια δομή παρεμφερή μ' αυτή του ιεραρχικού μοντέλου JPEG. Η ιεραρχία αποτελείται από την κλιμάκωση (scaling) των συμπίεσμένων, κινούμενων εικόνων. Δηλαδή, το video κωδικοποιείται με διαβαθμίσεις ποιότητας. Η αλλαγή των διαστάσεων των εικόνων μπορεί να επιδρά σε διαφορετικές παραμέτρους. Αρχικά, υπήρχαν σχέδια για να καθοριστεί ένα πρότυπο MPEG-3 που να πλησιάζει την ψηφιακή τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας HDTV. Παρ' όλα αυτά, κατά την διάρκεια ανάπτυξης του προτύπου MPEG-2, ανακαλύφθηκε ότι η μεγέθυνση κλίμακας μπορούσε να καλύψει σε επαρκή βαθμό τις απαιτήσεις της HDTV[13]. Κατά συνέπεια, μεταγενέστερες προσπάθειες για την καθιέρωση του προτύπου MPEG-3 απορρίφθηκαν.

Το πρόβλημα της συμπίεσσης του απαιτούμενου φάσματος συχνοτήτων, ώστε τα σήματα της ψηφιακής τηλεόρασης να χωρέσουν στο πρακτικά διαθέσιμο φάσμα, επιλύεται με την καθιέρωση του συστήματος MPEG-2, το οποίο σήμερα είναι διεθνές πρότυπο. Όλες οι προσπάθειες καθιέρωσης συστημάτων ψηφιακής τηλεόρασης σε παγκόσμια κλίμακα στηρίζονται στο σύστημα MPEG-2

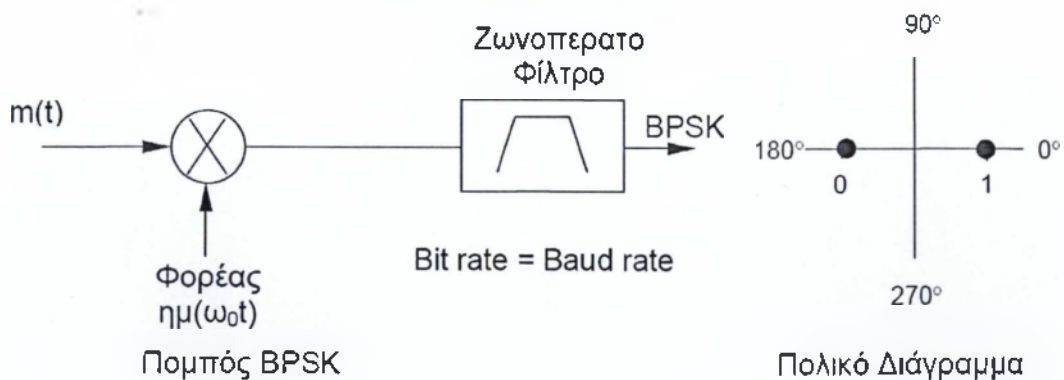
Κεφάλαιο 4 : Ψηφιακά Συστήματα Διαμόρφωσης

4.1 Εισαγωγή στην PSK (Phase Shift Keying)

Μια από τις διαμορφώσεις που χρησιμοποιείται για την εκπομπή του ψηφιακού σήματος με αναλογικό φορέα είναι η ψηφιακή διαμόρφωση φάσης PSK (Phase Shift Keying). Η απλούστερη μορφή της PSK είναι η BPSK (Binary PSK). Σε αυτή τη διαμόρφωση δύο μόνο μεταβολές φάσεις χρησιμοποιούνται για να κωδικοποιήσουν το 0 και το 1. Συνηθέστερα χρησιμοποιούνται οι φάσεις 180° και 0° αντίστοιχα. Ο φορέας μπορεί επίσης να μεταβάλλει τη φάση του 4 φορές, οπότε έχουμε διαμόρφωση QPSK (Quad PSK)[14].

4.1.1 Διαμόρφωση BPSK (Binary Phase Shift Keying)

Ένας άλλος τρόπος παράστασης της διαμορφώσεως BPSK είναι με τη χρησιμοποίηση του πολικού διαγράμματος. Στο πολικό διάγραμμα απεικονίζεται η θέση του κάθε εκπεμπόμενου baud με ένα σημείο. Η γωνία που σχηματίζει το κάθε σημείο με την αρχή των συντεταγμένων είναι η φάση του σήματος, ενώ η απόσταση του κάθε σημείου από την αρχή των αξόνων μας δίνει το πλάτος του αναλογικού σήματος. Ο διαμορφωτής BPSK αποτελείται από ένα ισοσταθμισμένο διαμορφωτή, στον οποίο οδηγούνται τα σήματα του ημιτονικού φορέα και του ψηφιακού σήματος. Η λειτουργία του κωδικοποιητή γίνεται εύκολα αντιληπτή αν θεωρήσουμε ότι τα δυαδικά ψηφία παριστάνονται με τάση $1V$ (το λογικό 1) και $-1V$ (το λογικό 0). Στη μορφή αυτή της PSK ο φορέας που διατηρεί σταθερά πλάτος και συχνότητα, μεταβάλλει τη φάση του μεταξύ δύο τιμών που έχουν διαφορά 180° , όταν το σήμα εισόδου μεταβάλλει την τιμή του μεταξύ του 0 και 1.

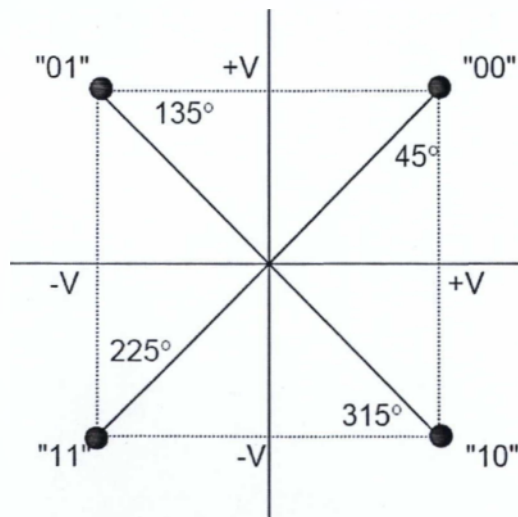
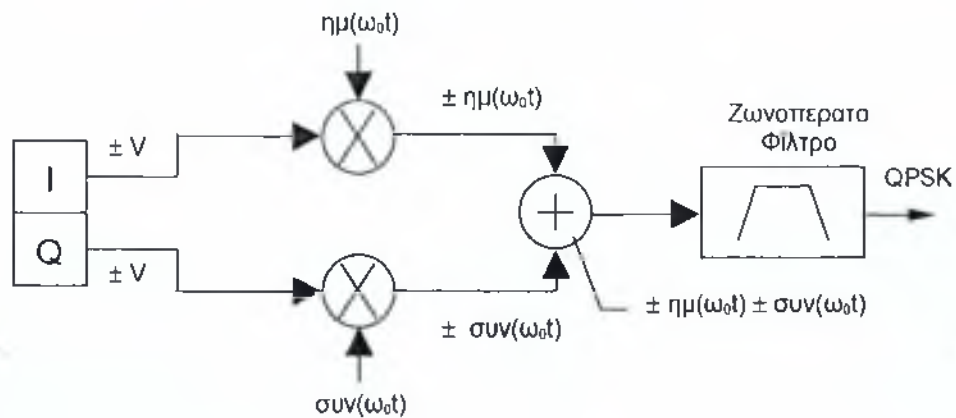


Σχήμα 5. Παλμική διαμόρφωση BPSK

4.1.2 Διαμόρφωση QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)

Ένα ζεύγος bits (από τα δεδομένα) αποθηκεύεται προσωρινά σε ένα καταχωρητή. Καθώς τα δύο bit έχουν τέσσερις συνδυασμούς (00,01,10 και 11) η φάση του φορέα (carrier) στην έξοδο του διαμορφωτή έχει 4 διαφορετικές τιμές που αντιστοιχούν σε αυτούς τους συνδυασμούς.

Ο φορέας του ενός διαμορφωτή είναι μετατοπισμένος κατά 90° σε σχέση με το φορέα του άλλου διαμορφωτή. Το πρώτο από τα δύο bit, αυτό που οδηγούμε στο διαμορφωτή με φορέα που έχει φάση 0° (ημωt) το ονομάζουμε I(In Phase) bit, ενώ το δεύτερο bit που διαμορφώνει το μετατοπισμένο κατά 90° (συνωt) φέρων το ονομάζουμε Q (quadrature). Έτσι η έξοδος του διαμορφωτή I έχει φάση 0° και 180° και η έξοδος του διαμορφωτή Q έχει φάση 90° και 270° . Μετά την πρόσθεση των δύο σημάτων στον αθροιστή, το τελικό σήμα έχει φάση τη συνισταμένη των δύο φάσεων των σημάτων I και Q. Έτσι προκύπτουν οι τέσσερις φάσεις του σήματος εξόδου.



Πολικό Διάγραμμα
τεσσάρων φάσεων

Σχήμα 6. Παλμική διαμόρφωση QPSK

4.2 Διαμόρφωση QAM (Quadrature Amplitude Modulation)

Η διαμόρφωση πλάτους τετραγωνισμού QAM (Quadrature Amplitude Modulation) είναι ο συνδυασμός διαμόρφωσης πλάτους (ASK) και διαμόρφωσης

μετατόπισης φάσης DPSK (τα εκπεμπόμενα baud μπορεί να διαφέρουν μεταξύ τους και ως προς τη φάση και ως προς το πλάτος τους DPSK). Πιο τεχνικά, η διαμόρφωση πλάτους τετραγωνισμού είναι ένα σύστημα διαμόρφωσης στο οποίο το στοιχείο μεταφέρεται με τη διαμόρφωση του πλάτους δύο χωριστών φερόντων, συνήθως ημιτονοειδούς, που έχουν διαφορά φάσης 90° (ημίτονο και συνημίτονο). Λόγω της διαφοράς φάσης τους, καλούνται φέροντα τετραγωνισμού. Τα μη διαμορφωμένα σήματα εκθέτουν μόνο δύο θέσεις επιτρέποντας μια μεταφορά είτε λογικό 0 είτε λογικό 1. Στη διαμόρφωση εύρους τετραγωνισμού, είναι δυνατό να μεταφερθούν περισσότερα κομμάτια ανά θέση δεδομένου ότι υπάρχουν πολλαπλάσια σημεία της μεταφοράς. Ένα σήμα που λαμβάνεται με το άθροισμα της διαμόρφωσης πλάτους και φάσης ενός σήματος φερόντων χρησιμοποιείται για τη μεταφορά στοιχείων. Όπως ο αριθμός σημείων μεταφοράς παραμένει υψηλός, είναι δυνατό να μεταβιβαστούν περισσότερα κομμάτια ανά κάθε αλλαγή θέσης.

Η πιο απλή μορφή διαμόρφωσης QAM είναι στην πραγματικότητα το σύνολο των συμβόλων της QPSK, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως δύο ορθογώνιοι φορείς I και Q (με διαφορά φάσης 90° μεταξύ τους), διαμορφωμένοι κατά πλάτος με στάθμες πλάτους $+A$, $-A$. Αν αυξήσουμε τον αριθμό των σταθμών πλάτους του κάθε φορέα για παράδειγμα σε τέσσερις, με τιμές $+A$, $-A$, $+3A$ και $-3A$, προκύπτουν τότε 16 δυνατοί συνδυασμοί συμβόλων στην έξοδο του πομπού, οι οποίοι απέχουν εξίσου στο πολικό διάγραμμα και αντιπροσωπεύονται από συγκεκριμένο πλάτος και φάση ο καθένας. Αυτό σημαίνει ότι κάθε στάθμη πλάτους μπορεί να κωδικοποιηθούν 2 bit (διότι $2^2=4$ όσες και οι στάθμες πλάτους του φορέα). Επειδή χρησιμοποιούμε δύο φορείς με διαφορά φάσης 90° μεταξύ τους, (τον $I(t)=\eta\mu\omega t$ και τον $Q(t)=\sigma\upsilon\nu\omega t$) και ο καθένας κωδικοποιεί 2 bit, θα έχουμε συνολικά $2^2 \cdot 2^2=16$ στάθμες ή αλλιώς 16 συνδυασμούς πλάτους και φάσης. Άρα σε κάθε συνδυασμό μπορούμε να κωδικοποιήσουμε πληροφορία 4 bits. Η κωδικοποίηση αυτής της μορφής, επειδή περιλαμβάνει 16 συνδυασμούς, ονομάζεται 16-QAM.

Ο κάθε φορέας όμως θα μπορούσε να λάβει 8 διαφορετικές τιμές πλάτους. Σ' αυτή την περίπτωση στο πολικό διάγραμμα θα έχουμε $8 \cdot 8=64$ σημεία και η διαμόρφωση ονομάζεται πλέον 64-QAM καθώς επίσης και ο συνδυασμός των 6 bits ($2^6=64$) που κωδικοποιείται στον κάθε συνδυασμό (στο κάθε baud).

Κεφάλαιο 5: Τεχνικές Πολυπλεξίας

5.1 Πολύπλεξη με διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Multiplexing-FDM)

Στην τεχνική Frequency Division Multiplexing (FDM) το εύρος της συχνότητας του σήματος διαιρείται σε N μη επικαλυπτόμενα «κομμάτια» και το κάθε κομμάτι αντιστοιχεί σε ένα υποκανάλι. Από κάθε υποκανάλι μεταδίδεται ένα ξεχωριστό σύμβολο και έπειτα τα N υποκανάλια πολυπλέκονται. Η επιλογή μη επικαλυπτόμενων πεδίων φάσματος, οφείλεται στο ότι προσπαθούμε να αποφύγουμε φαινόμενα παρεμβολής μεταξύ των υποκαναλιών μετάδοσης. Ωστόσο, η τεχνική αυτή οδηγεί σε μη αποδοτική χρήση του διαθέσιμου[15]. Με την τεχνική του FDM οι φορείς τοποθετούνται στη σειρά με τέτοιο τρόπο ώστε ο δέκτης, με τη χρήση κατάλληλων φίλτρων και αποδιαμορφωτών, να μπορεί να διαχωρίσει τα υποκανάλια μεταξύ τους. Σε τέτοιους δέκτες ωστόσο, χρησιμοποιούνται διαστήματα ασφαλείας (guard intervals) μεταξύ των διαφορετικών φορέων στο πεδίο της συχνότητας, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της αξιοποίησης του διαθέσιμου φάσματος. Τα μεταδιδόμενα σήματα πρέπει να έχουν μεγάλα διαστήματα ασφαλείας μεταξύ των καναλιών μετάδοσης για να αποτρέπεται η παρεμβολή, κάτι που μειώνει τη συνολική φασματική απόδοση.

Ένα απλό παράδειγμα συστήματος FDM είναι η χρήση διαφορετικών συχνοτήτων από τους ραδιοφωνικούς σταθμούς των FM (Frequency Modulation). Όλοι οι σταθμοί εκπέμπουν την ίδια χρονική στιγμή αλλά δεν παρεμβάλουν μεταξύ τους επειδή χρησιμοποιούν για την μετάδοση διαφορετικές φέρουσες συχνότητες. Επιπλέον είναι περιορισμένου εύρους ζώνης και αρκετά απομακρυσμένοι στο πεδίο της συχνότητας έτσι ώστε τα εκπεμπόμενα σήματά τους να μην επικαλύπτονται συχνοτικά. Στο δέκτη, κάθε σήμα λαμβάνεται ανεξάρτητα χρησιμοποιώντας ζωνοπερατά φίλτρα για την απομάκρυνση όλων των άλλων σημάτων εκτός του σταθμού που μας ενδιαφέρει. Το φιλτραρισμένο αυτό σήμα μπορεί στη συνέχεια να αποδιαμορφωθεί και να ανακτήσουμε την αρχική μεταδιδόμενη[16].

5.2 Διασυμβολική Παρεμβολή (InterSymbol Interference)

Η επίτευξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης στις επίγειες ασύρματες επικοινωνίες είναι αρκετά δύσκολη. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην ίδια τη φύση του ασύρματου καναλιού, η οποία θέτει περιορισμούς στην απόδοση των ασύρματων συστημάτων. Το μονοπάτι μετάδοσης ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη μπορεί να ποικίλει από ένα απλό μονοπάτι απευθείας οπτικής επαφής σε ένα μονοπάτι με ποικίλα εμπόδια όπως κτίρια, βουνά και φυλλώματα δένδρων. Σε αντίθεση με τα ενσύρματα κανάλια, τα οποία είναι στατικά και προβλέψιμα, τα ασύρματα είναι τυχαία με αποτέλεσμα η ανάλυσή τους να είναι πολύπλοκη[17][18].

Οι μηχανισμοί που βρίσκονται πίσω από την ηλεκτρομαγνητική διάδοση του σήματος είναι:

- η απορρόφηση (absorption),

- η ανάκλαση (reflection),
- η περίθλαση (diffraction),
- η διάθλαση (refraction) και
- η σκέδαση (scattering)

Κάθε φορά ανάλογα με την απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη, τη μορφολογία του εδάφους και του χώρου μεταξύ του πομπού και του δέκτη, τα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας και την πυκνότητα της δόμησης, επικρατεί κάποιος από τους παραπάνω μηχανισμούς. Οι θεμελιώδεις παράγοντες που επηρεάζουν το λαμβανόμενο σήμα σε ένα ασύρματο σύστημα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- στις απώλειες μεγάλης κλίμακας (large-scale effects) και
- στην εξασθένηση μικρής κλίμακας (small-scale effects)

Στις απώλειες μεγάλης κλίμακας ανήκουν οι απώλειες μονοπατιού (pathloss) και η σκίαση (shadowing). Οι απώλειες μονοπατιού είναι το φαινόμενο της μείωσης της λαμβανόμενης ισχύος σε συνάρτηση με την απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Οι φυσικοί μηχανισμοί που προκαλούν τις απώλειες αυτές είναι η απορρόφηση, η ανάκλαση, η περίθλαση και η διάθλαση. Συνήθως μετριοούνται σε dB και δίνονται από τη σχέση $L = 10n \log_{10} d + C$, όπου L είναι οι απώλειες σε dB, n είναι ο παράγοντας της απώλειας μονοπατιού, d είναι η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη και είναι μία σταθερά που εισάγεται για να δηλώσει τις απώλειες του συστήματος. Το φαινόμενο της σκίασης οφείλεται στις φυσικές διαστάσεις των μεγάλων εμποδίων μεταξύ του πομπού και του δέκτη, όπως κτίρια, λόφους, δέντρα.

Στην εξασθένηση μικρής κλίμακας ανήκει η διάλειαση/εξασθένηση (fading). Η εξασθένηση αυτή οφείλεται στη λήψη σε διαφορετικές χρονικές στιγμές πολλαπλών εκδοχών του σήματος που μεταδόθηκε εξαιτίας της σκέδασης σε αντικείμενα κοντά στο δέκτη που ονομάζονται σκεδαστές. Γι' αυτό το λόγο και η εξασθένηση αυτή καλείται και πολυδιαδρομική εξασθένηση (multipath fading). Τα πολλαπλά αυτά σήματα έχουν διαφορετικά πλάτη και διαφορετικές αρχικές φάσεις με αποτέλεσμα να συμβάλλουν στο σήμα είτε ενισχυτικά είτε καταστρεπτικά. Κατ' αυτόν τον τρόπο μπορεί να προκύψουν εξασθενήσεις στο σήμα μερικών δεκάδων dB ακόμα και κατά μήκος απόστασης ενός κλάσματος του μήκους κύματος.

Στην ουσία, ένα λαμβανόμενο σήμα αποτελείται από έναν αριθμό διασκορπισμένων κυμάτων, τα οποία δημιουργούνται από την ανάκλαση και την περίθλαση του αρχικού μεταδιδόμενου σήματος πάνω σε αντικείμενα που βρίσκονται στην περιβάλλουσα γεωγραφική περιοχή.

Αυτά τα πολυοδικά κύματα συνδυάζονται στον δέκτη με αποτέλεσμα να προκύπτει ένα σήμα το οποίο μπορεί να ποικίλει τόσο στο πλάτος όσο και στην αρχική φάση. Η παρουσία των ανακλώμενων αντικειμένων και των σκεδαστών στο ασύρματο κανάλι προκαλούν μια συνεχή αλλαγή στο περιβάλλον διάδοσης. Αυτό το μεταβαλλόμενο περιβάλλον αλλάζει την ενέργεια του σήματος με αποτέλεσμα την εξασθένησή του. Το μεταδιδόμενο σήμα φτάνει στο δέκτη μέσω πολλαπλών μονοπατιών, καθένα από τα οποία εμφανίζει μία δική του καθυστέρηση στο χρόνο (time delay). Έτσι το λαμβανόμενο σήμα διαδίδεται στο χρόνο με διαφορετικές καθυστερήσεις μέσα από τα διαφορετικά μονοπάτια. Η διαφορά ανάμεσα στη μεγαλύτερη και στη μικρότερη από αυτές τις καθυστερήσεις, καθορίζει τη μέγιστη διασπορά καθυστέρησης (maximum delay spread).

Η επίδραση της πολυδιόδευσης (multipath) είναι γνωστή ως διασυμβολική παρεμβολή (ISI). Κάποια ασύρματα συστήματα χρησιμοποιούν σύμβολα για μετάδοση. Κάθε σύμβολο περιέχει έναν αριθμό bits που καθορίζεται από τη διαμόρφωση που χρησιμοποιείται. Οι ηχώ κάποιου συμβόλου που προκύπτουν λόγω της πολυδιόδευσης, θεωρούνται διασυμβολική παρεμβολή για το αμέσως επόμενο σύμβολο που καταφθάνει.

5.3. Πολύπλεξη με ορθογωνική διαίρεση συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing-OFDM)

Η Ορθογωνική Πολύπλεξη με Διαίρεση Συχνότητας (OFDM) είναι ένας συνδυασμός διαμόρφωσης και πολυπλεξίας. Το πρότυπο OFDM αναπτύχθηκε από κοινού από τους οργανισμούς European Telecommunication Standards Institute Broadband Radio Access Networks (ETSI BRAN) και Multimedia Mobile Access Communications (MMAC). Σήμερα, αποτελεί το παγκόσμιο πρότυπο για τη μπάντα των 5 GHz. Πρόκειται για μια ειδική περίπτωση μετάδοσης πολλών φερόντων (multi-carrier), όπου η συνολική ροή δεδομένων μεταδίδεται μέσω ενός αριθμού υποκαναλιών, όπου το κάθε ένα έχει χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης. Ένας λοιπόν από τους βασικότερους λόγους χρήσης της OFDM διαμόρφωσης είναι ο αποδοτικός τρόπος που διαχειρίζεται την ταυτόχρονη διάδοση μέσω πολλών μονοπατιών. Επιπλέον, αυξάνει την ανθεκτικότητα απέναντι σε φαινόμενα εξασθένησης επιλεκτικής συχνότητας, καθώς και σε φαινόμενα παρεμβολής μεταξύ γειτονικών υποκαναλιών μετάδοσης[15].

Η OFDM, παρουσιάζει μεγάλη ομοιότητα με τη γνωστή τεχνική της Πολύπλεξης με Διαίρεση Συχνότητας, FDM (Frequency Division Multiplexing). Η τεχνική OFDM χρησιμοποιεί τις αρχές FDM για μετάδοση πολλαπλών σημάτων σε ένα κανάλι επικοινωνίας[16].

Η μεταδιδόμενη πληροφορία χωρίζεται σε σύμβολα. Κάθε σύμβολο αποτελεί το άθροισμα των N φερουσών της τεχνικής πολυπλεξίας με διαίρεση συχνότητας. Σε κάθε χρονική στιγμή ο δέκτης παρατηρεί στην είσοδό του τη συνάθροιση του επιθυμητού συμβόλου μαζί με εξασθενημένες εκδοχές των συμβόλων που είχαν αποσταλεί νωρίτερα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διασυμβολική παρεμβολή (Inter Symbol Interference-ISI) και μπορεί να προκαλέσει σημαντική επιδείνωση στο ρυθμό σφαλμάτων που παρατηρείται στον τηλεπικοινωνιακό δέκτη, αν δε ληφθεί μέριμνα για την αποφυγή ή την ακύρωσή του.

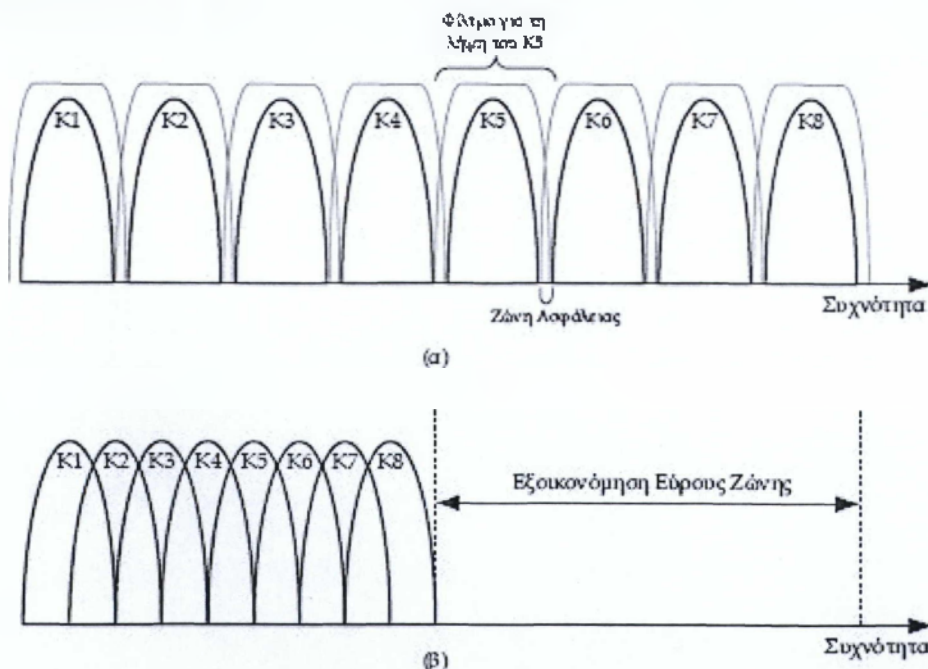
Οι συχνότητες, στις οποίες το κανάλι δεν επιτρέπει καμία πληροφορία να περάσει ονομάζονται συχνότητες έντονης εξασθένησης (deep fade frequencies). Αυτή η μορφή εξασθένησης καλείται εξασθένηση επιλεκτικής συχνότητας (frequency selective fading), γιατί δεν συμβαίνει ομοιόμορφα κατά μήκος του εύρους ζώνης του καναλιού, αλλά σε επιλεγμένες συχνότητες. Η επιλογή των συχνοτήτων γίνεται από το περιβάλλον. Αν το περιβάλλον αλλάζει, όπως ένα κινούμενο αμάξι, τότε αλλάζει η εξασθένηση. Όταν η εξασθένηση που προκαλείται στο κανάλι είναι σχετικά ομοιόμορφη σε όλο το φάσμα συχνοτήτων του μεταδιδόμενου σήματος τότε το σήμα υφίσταται εξασθένηση επίπεδης συχνότητας (frequency flat fading) (Σχ. 1). Ένα OFDM σήμα στην περίπτωση που εμφανίζει εξασθένηση επιλεκτικής συχνότητας, επηρεάζεται ένα τμήμα μόνο των φερουσών και οι υπόλοιπες παραμένουν αναλλοίωτες. Αντί να καταστραφεί όλο το σύμβολο, χάνεται ένα υποσύνολο bits. Όταν ο χρόνος διασποράς είναι λιγότερος από ένα σύμβολο συμβαίνει εξασθένηση

επίπεδης συχνότητας. Όταν ο χρόνος διασποράς είναι μεγαλύτερος από ένα σύμβολο υπάρχει εξασθένιση επιλεκτικής συχνότητας

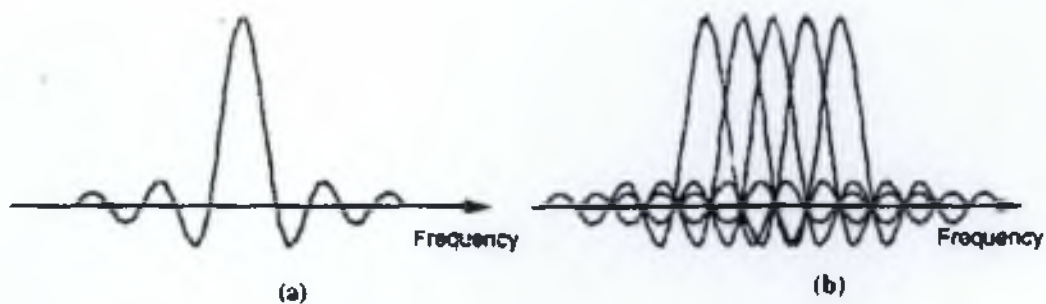
Η κύρια ιδέα της OFDM είναι η ορθογωνικότητα των φερουσών. Η ορθογωνικότητα επιτρέπει την ταυτόχρονη εκπομπή πολλών φερουσών σε μια στενή ζώνη συχνοτήτων χωρίς μεταξύ τους παρεμβολές[19]. Η έλλειψη ορθογωνικότητας έχει ως αποτέλεσμα την επικάλυψη των σημάτων που περιέχουν την πληροφορία και την υποβάθμιση της ποιότητας της επικοινωνίας. Οι φέρουσες σε ένα OFDM σήμα βρίσκονται τόσο κοντά η μια στην άλλη όσο αυτό είναι θεωρητικά εφικτό και διατηρείται η ορθογωνικότητα μεταξύ τους (Σχήμα 7)[16][20]. Χρησιμοποιώντας την τεχνική επικαλυπτόμενων φερουσών, μπορούμε να εξοικονομήσουμε μέχρι και 50 % του διαθέσιμου εύρους ζώνης[15].

Στο OFDM επιτυγχάνεται η ορθογωνικότητα, στο πεδίο της συχνότητας, αντιστοιχίζοντας κάθε ένα σήμα πληροφορίας σε μια διαφορετική φέρουσα. Τα σήματα OFDM αποτελούνται από ένα σύνολο ημίτονων, κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί σε μια φέρουσα. Η συχνότητα κάθε φέρουσας στη βασική ζώνη επιλέγεται να είναι ένα ακέραιο πολλαπλάσιο του αντιστρόφου της διάρκειας συμβόλου, έχοντας έτσι ως αποτέλεσμα όλες οι φέρουσες να έχουν ένα ακέραιο αριθμό κύκλων ανά σύμβολο. Οι συχνότητες των φερουσών καλούνται αρμονικές[16]. Η απόσταση των διαδοχικών φερουσών στο σύστημα $2k$, είναι 4464 Hz ενώ στο $8k$, είναι 1116 Hz. Επειδή όμως στο $2k$, υπάρχουν 1705 φέρουσες, το συνολικό εύρος ζώνης, φθάνει τα 7,61 MHz, κάτι που συμβαδίζει απόλυτα με ένα εύρος καναλιού 8 MHz, όπως στα UHF. Από την άλλη πλευρά, στο σύστημα $8k$, υπάρχουν 6817 φέρουσες, που σημαίνει ότι το συνολικό εύρος ζώνης, είναι και πάλι 7,61 MHz[17].

Κάθε υποφέρουσα έχει στο πεδίο της συχνότητας μια περιβάλλουσα της μορφής sinc (Σχήμα 8)[16]. Η κεντρική συχνότητα του κάθε υποκαναλιού δεν επηρεάζεται από άλλα υποκανάλια[15]. Το σημείο όπου μια φέρουσα έχει μέγιστη τιμή, η συνεισφορά όλων των άλλων είναι μηδενική.



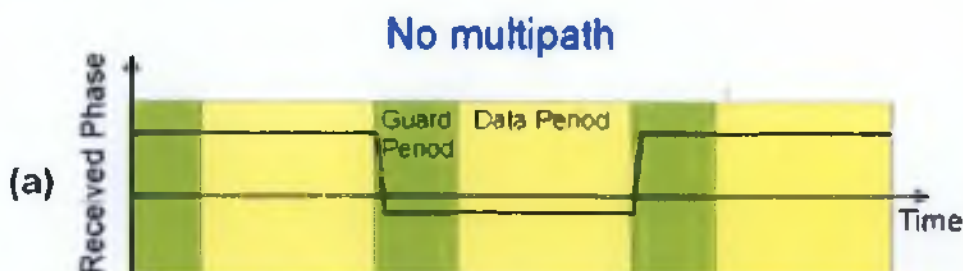
Σχήμα 7. α) Μη επικαλυπτόμενες φέρουσες (FDM) β) επικαλυπτόμενες φέρουσες (OFDM)

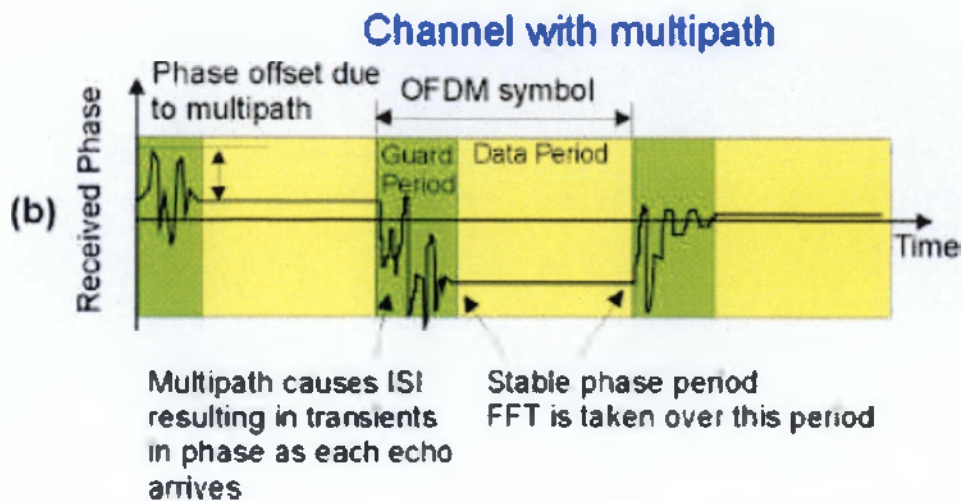


Σχήμα 8. a) Φάσμα OFDM υποκαναλιού, b) Φάσμα OFDM σήματος

Σε ένα σύστημα OFDM το πλάτος και η φάση των φερουσών πρέπει να παραμένουν σταθερές στη διάρκεια μιας περιόδου του συμβόλου έτσι ώστε να διατηρείται η ορθογωνικότητα μεταξύ των φερουσών. Στην περίπτωση που δεν διατηρείται η ορθογωνικότητα η μορφή του φάσματος των φερουσών δεν έχει τη σωστή μορφή sinc και οι μηδενισμοί δεν παρουσιάζονται στις κατάλληλες συχνότητες, με αποτέλεσμα να δημιουργείται δια-συμβολική παρεμβολή (InterSymbol Interference). Στα πολύοδα περιβάλλοντα επικοινωνίας, η δια-συμβολική παρεμβολή απλώνει την ενέργεια μεταξύ των συμβόλων και παρουσιάζονται απότομες αλλαγές στο πλάτος και τη φάση των φερουσών στην αρχή του συμβόλου. Το μήκος αυτών των αλλαγών αντιστοιχεί στην καθυστέρηση του καναλιού. Έτσι το σήμα που μεταβιβάζεται είναι αποτέλεσμα της άφιξης στο δέκτη διαφορετικών στοιχείων[16].

Αυτή η καθυστέρηση (delay spread) αντιμετωπίζεται αποδοτικά από την OFDM ως εξής:[15] Αν τα δεδομένα εισόδου μεταδοθούν από N υποκανάλια (/φέρουσες), τότε η διάρκεια του συμβόλου γίνεται N φορές μικρότερη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ταυτόχρονη μείωση του delay spread του υποκαναλιού κατά τον ίδιο παράγοντα, αφού είναι ανάλογο με τη διάρκεια του συμβόλου. Ωστόσο, για την πλήρη ακύρωση του φαινομένου της διασυμβολικής παρεμβολής (ISI) χρησιμοποιείται ένα χρονικό διάστημα για κάθε σύμβολο OFDM, το οποίο είναι γνωστό σα διάστημα ασφαλείας (guard interval). Το διάστημα αυτό επιλέγεται να είναι μεγαλύτερο του αναμενόμενου delay spread, έτσι ώστε κάποια συνιστώσα ενός συμβόλου που μεταδίδεται από κάποια φέρουσα να μην μπορεί να παρεμβληθεί με το επόμενο σύμβολο (Σχήμα 9).





Σχήμα 9. Λειτουργία του διαστήματος ασφαλείας για προστασία από ISI

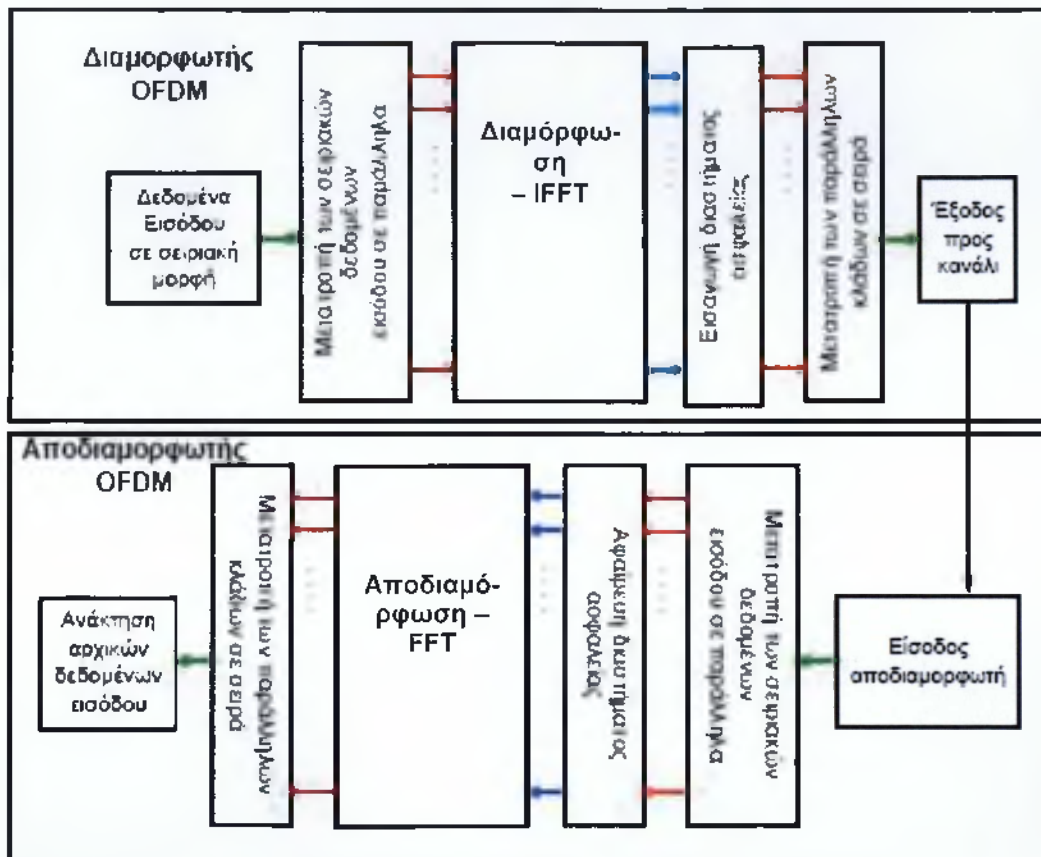
Κατά το χρόνο ελέγχου δεν είναι αναγκαίο να μεταδίδεται σήμα. Στην περίπτωση όμως αυτή, θα εμφανίζονταν φαινόμενα παρεμβολής μεταξύ των φερουσών (ICI). Η παρεμβολή αυτή είναι γνωστή ως crosstalk, ενώ η παρουσία της σημαίνει ότι οι φέρουσες δεν είναι πλέον ορθογώνιες μεταξύ τους.

Για την αποφυγή της παρεμβολής ICI, το OFDM σύμβολο επεκτείνεται κυκλικά Στο διάστημα ασφαλείας τοποθετείται ένα αντίγραφο των τελευταίων δειγμάτων του συμβόλου οπότε επιμηκύνεται το συνολικό μήκος του. Η τοποθέτηση αντιγράφων του συμβόλου από το τέλος στην αρχή του, έχει ως αποτέλεσμα ένα συνεχές σήμα απαλλαγμένο από ασυνέχειες[16]. Αυτή η τεχνική καλείται προσθήκη κυκλικού προθέματος. Το πρόθεμα αποτελεί το 10%-25% του χρόνου του συμβόλου[19]. Η τεχνική αυτή εξασφαλίζει ότι τα καθυστερημένα αντίγραφα του OFDM συμβόλου θα έχουν πάντοτε έναν ακέραιο αριθμό κύκλων, όσο η καθυστέρηση αυτή είναι μικρότερη του διαστήματος ασφαλείας (guard time). Σαν αποτέλεσμα, σήματα που μεταδίδονται από πολλές φέρουσες (/μονοπάτια) με καθυστερήσεις μικρότερες του guard time δεν μπορούν να προκαλέσουν φαινόμενα παρεμβολής ICI[15].

Στην τεχνική OFDM, κάθε ένα σύμβολο μεταφέρει 40 - 4000 bit, συνεπώς είναι απαραίτητος ένας μετατροπέας από σειριακά σε παράλληλα για να μετατρέψει τη σειριακή ακολουθία δεδομένων σε παράλληλα δεδομένα. Ο αριθμός των δεδομένων που μεταφέρει κάθε σύμβολο εξαρτάται από το είδος της διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται καθώς επίσης και από τον αριθμό των φερουσών. Από τη στιγμή που κάθε φέρουσα τροφοδοτείται με τα bit πληροφορίας που θα μεταδώσει, αυτά χαρτογραφούνται (mapped) χρησιμοποιώντας κάποιο τύπο διαμόρφωσης σε πλάτος και φάση φέρουσας. Το σύνολο των διαμορφωμένων φερουσών αποτελεί το σήμα OFDM στο πεδίο της συχνότητας. Για τη παραγωγή των φερουσών χρησιμοποιείται ο αντίστροφος γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (IFFT, Inverse Fast Fourier Transformation). Οι λειτουργίες του πομπού ολοκληρώνονται με την κατασκευή και εισαγωγή του διαστήματος προστασίας, τη μεταφορά του σήματος βασικής ζώνης στην επιθυμητή ραδιοσυχνότητα και την αποστολή μέσω του τηλεπικοινωνιακού διαύλου (Σχήμα 10).

Η λήψη των δεδομένων γίνεται εκτελώντας τις αντίστροφες διαδικασίες. Το ζωνοπερατό σήμα που λαμβάνεται μεταφέρεται στη βασική ζώνη, πιθανότατα

περνώντας πρώτα από κάποια ενδιάμεση συχνότητα. Στη συνέχεια γίνεται η επεξεργασία και αφαίρεση του διαστήματος προστασίας και το ωφέλιμο τμήμα του συμβόλου OFDM αποδιαμορφώνεται μέσω της μονάδας FFT (Σχήμα 10)[16][20].



Σχήμα 10. Μπλοκ διάγραμμα ενός τυπικού πομποδέκτη OFDM

Η τεχνική OFDM παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα συγκρινόμενη με την περίπτωση της μετάδοσης με μονή φέρουσα[20]:

- Υπάρχει αυξημένη ευαισθησία σε σφάλματα συγχρονισμού στο δέκτη, καθώς αυτά τείνουν να καταστρέφουν την ιδιότητα της ορθογωνικότητας των φερουσών και κατά συνέπεια τη δυνατότητα για λήψη με μηδενική διακαναλική παρεμβολή
- Ένα σήμα OFDM παρουσιάζει σχετικά υψηλό λόγο της μέγιστης προς τη μέση ισχύ, γεγονός που επιδρά αρνητικά στην απόδοση του ενισχυτή ραδιοσυχνοτήτων που χρησιμοποιείται κατά τη μετάδοση

5.4 COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

Η χρήση OFDM σε συνδυασμό με τεχνικές αυτόματης διόρθωσης (FEC, Forward Error Correction) ονομάζεται COFDM (Coded-OFDM). Με τη μέθοδο αυτή εξασφαλίζεται η ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων στο δέκτη, με την μετάδοση bits διόρθωσης σφαλμάτων παράλληλα με τα bits δεδομένων. Η τεχνική COFDM

προτείνεται ως η καταλληλότερη για ευρυζωνικές ασύρματες εφαρμογές. Αντιμετωπίζει αποτελεσματικά φαινόμενα έντονης πολυδιόδευσης (multipath) με μεγάλη απόκλιση στους χρόνους καθυστέρησης (delays) που εμφανίζουν τα ληφθέντα σήματα.

Στο DVB-T σύστημα χρησιμοποιούνται διάφορα είδη αλγορίθμων για κωδικοποίηση της πληροφορίας. Πρωτίστως προστίθενται blocks Reed-Solomon που αποτελούνται από bit ισοτιμίας. Ακολουθεί αναδιάταξη συχνοτήτων και το αποτέλεσμα κωδικοποιείται με έναν συνελκτικό (convolutional) κώδικα. Στο δέκτη το σήμα περνάει από έναν αποκωδικοποιητή Viterbi αδύναμης απόφασης (soft decision) και μετά από έναν Reed-Solomon αποκωδικοποιητή για έλεγχο της ισοτιμίας[21].

5.4.1 Forward Error-correction coding (FEC)

Ο σκοπός της τεχνικής FEC είναι η βελτίωση του ρυθμού εμφάνισης σφάλματος (bit error rate-BER) και η αύξηση του κατωφλίου ισχύος στο δέκτη με αποτέλεσμα τη βελτίωση της ανάκτησης της ροής των εκπεμπόμενων δεδομένων στον αποδιαμορφωτή[21].

Η συγκεκριμένη μέθοδος προσθέτει στο κανάλι προσεκτικά σχεδιασμένη επιπλέον κωδικοποιημένη πληροφορία κατά τη διαδικασία μετάδοσης. Με αυτόν τον τρόπο παρέχεται στο δέκτη επιπλέον πληροφορία, η οποία θα χρησιμεύσει στη διαδικασία λήψης απόφασης. Όσο μεγαλύτερη είναι η πλεονάζουσα πληροφορία τόσο μεγαλύτερη θα είναι η προσαρμοστικότητα του συστήματος. Συνήθως η πλεονάζουσα πληροφορία είναι ένα κλάσμα π.χ. 1/2, δηλαδή ένα bit πληροφορίας για διόρθωση προστίθεται για κάθε bit σήματος, που σημαίνει 2bits τελικού σήματος εξόδου. Σε αυτήν την περίπτωση το ποσό της διόρθωσης σφάλματος που προστίθεται μειώνει τη συνολική χωρητικότητα του συστήματος κατά 50%.

Σύμφωνα με το προηγούμενο παράδειγμα ο κωδικοποιητής θα στείλει κάθε σύμβολο δύο φορές ώστε ο αποκωδικοποιητής να έχει δυο ευκαιρίες ανάκτησης της πληροφορίας. Στην πράξη τα συστήματα κωδικοποίησης εκτελούν πολύπλοκους μαθηματικούς υπολογισμούς για τη διόρθωση σφαλμάτων. Παρακάτω αναλύονται τα διάφορα στάδια της διαδικασίας FEC:

Reed Solomon και Συνελκτική (Convolutional) κωδικοποίηση

Στα περισσότερα ψηφιακά συστήματα στα προς μετάδοση δεδομένα εφαρμόζονται δυο είδη αλγορίθμων FEC κωδικοποίησης. Πρώτα χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος Reed Solomon, ο οποίος είναι block κώδικας και στέλνει κάθε φορά block από bytes προσθέτοντας επιπλέον bytes στο τέλος του block για διόρθωση σφαλμάτων. Στην συνέχεια εφαρμόζεται ένας συνελκτικός κώδικας, ο οποίος πολλαπλασιάζει το σήμα με μια ψευδοτυχαία ακολουθία μεγαλύτερου ρυθμού από τα δεδομένα, με αποτέλεσμα την πρόσθεση bits στη ροή δεδομένων για διόρθωση σφαλμάτων[17][21].

Αναδιάταξη Συχνότητας (Frequency Interleaving)

Η αναδιάταξη συχνότητας εφαρμόζεται μετά τη διαδικασία Reed-Solomon και πριν την εφαρμογή του συνελκτικού κώδικα.

Αν στο δέκτη αφιχθεί ηχώ με μικρότερη διάρκεια από αυτή που αναμενόταν θα δημιουργηθούν απότομες μεγάλες διακυμάνσεις στη συχνοτική απόκριση του καναλιού με αποτέλεσμα να επηρεαστούν ένας αριθμός γειτονικών υποφερόντων. Αυτό θα δημιουργήσει πρόβλημα αν τα δεδομένα μεταφέρονται σειριακά σε γειτονικά κανάλια. Ο αποκωδικοποιητής Viterbi θα λάβει ομάδες αναξιόπιστων bits και θα μειωθεί κατά πολύ η απόδοσή του. Όμως αν τα δεδομένα διασκορπιστούν ή γίνει αναδιάταξη (interleaving) τότε η διαδικασία FEC μπορεί να ανακτήσει τα δεδομένα. Στο δέκτη οι αναδιαταγμένες ακολουθίες δεδομένων περνούν από αναδιάταξη ώστε να επανέλθουν τα δεδομένα στην πρότερη κατάσταση (de-interleaving) και μετά αποκωδικοποιούνται. Επομένως η ακολουθία λαθών που συμβαίνει, όταν γειτονικά φέροντα αποτυγχάνουν να μεταδώσουν τα δεδομένα, διακόπτεται επιτρέποντας στον αποκωδικοποιητή Viterbi να αποδώσει καλύτερα[21].

Αποκωδικοποίηση Viterbi

Πρόκειται για μέθοδο αναγνώρισης στον δέκτη της ψευδοτυχαίας ακολουθίας που χρησιμοποιήθηκε στον συνελκτικό κωδικοποιητή. Ο αποκωδικοποιητής Viterbi είναι σε θέση να αναγνωρίσει τη διακριτική πατέντα που επιβλήθηκε στα δεδομένα από την ψευδοτυχαία ακολουθία ακόμα και στη περίπτωση παρουσίας σφαλμάτων. Ο αποκωδικοποιητής Viterbi περνάει τα δεδομένα από έναν καταχωρητή σχηματισμένο από πρότυπα καθοριζόμενα από την ψευδοτυχαία ακολουθία και προσπαθεί να βρει το βέλτιστο ταίριασμα μεταξύ των δεδομένων εισόδου και των προτύπων. Το αποτέλεσμα του αποκωδικοποιητή είναι μια απόφαση βασισμένη στο βέλτιστο ταίριασμα που βρέθηκε[21].

Υπάρχουν 2 επίπεδα διαμόρφωσης. Όταν το διαμορφωμένο σήμα έχει τιμή $-1V$, μεταδίδεται ένα bit/σύμβολο με '0' και '1' όταν το σήμα έχει τιμή $+1V$. Στο δέκτη το σήμα που αποδιαμορφώνεται έχει τιμή κοντά στο $-1V$ ή στο $+1V$ η οποία εξαρτάται από το '0' ή το '1' το οποίο μεταδόθηκε. Οποιαδήποτε απόκλιση από τις τιμές $\pm 1V$ οφείλεται στον αναπόφευκτο θόρυβο που προστίθεται κατά τη μετάδοση. Η ισχυρή απόφαση (Hard Decision) ακολουθεί τον κανόνα ότι τα αρνητικά σήματα αποκωδικοποιούνται με '0' και τα θετικά με '1'. Το όριο απόφασης (decision boundary) είναι η τιμή $0V$. Αν το πλάτος του θορύβου δεν ξεπερνά το $\pm 1V$, τότε ο δέκτης δεν κάνει λάθη κατά την αποδιαμόρφωση. Όμως ο θόρυβος περιστασιακά μπορεί να έχει μεγάλο πλάτος. Έστω ότι το σήμα λαμβάνεται με τιμή $+0.5V$. Αυτό πιθανότατα σημαίνει ότι μεταδόθηκε '1', αλλά υπάρχει μια μικρότερη πιθανότητα να στάλθηκε '0'. Έτσι όταν λαμβάνεται σήμα με μεγάλο πλάτος είναι πιο αξιόπιστο το αποτέλεσμα που προκύπτει από την ισχυρή απόφαση, παρά όταν το πλάτος είναι μικρό[22].

Ο βαθμός της αξιοπιστίας (confidence degree) λαμβάνεται υπ' όψιν στην αδύναμη απόφαση (Soft Decision) των αποκωδικοποιητών Viterbi. Οι αποκωδικοποιητές διατηρούν ιστορικό πιθανά μεταδιδόμενων ακολουθιών για να σχηματίσουν μια εικόνα της πιθανοφάνειας (likelihood) κάθε ακολουθίας. Τελικά επιλέγουν την τιμή '0' ή '1' για κάθε bit ανάλογα με το ποια ακολουθία έχει τη μέγιστη πιθανοφάνεια. Για ευκολία ένας αποκωδικοποιητής Viterbi προσθέτει πιθανολογαριθμούς για να αυξήσει την πιθανοφάνεια κάθε πιθανής ακολουθίας. Συμπερασματικά ο Viterbi αποκωδικοποιητής τροφοδοτείται με μια αδύναμη απόφαση (Soft Decision) η οποία περικλείει μια ισχυρή απόφαση (Hard Decision) και το πλάτος του λαμβανόμενου σήματος[22].

Hard Decision Decoding: Η είσοδος του αποκωδικοποιητή Viterbi είναι 0 ή 1 και αναπαριστά σε πιο από τα δυο επίπεδα τάσης ανήκουν τα δεδομένα. Όμως δεν

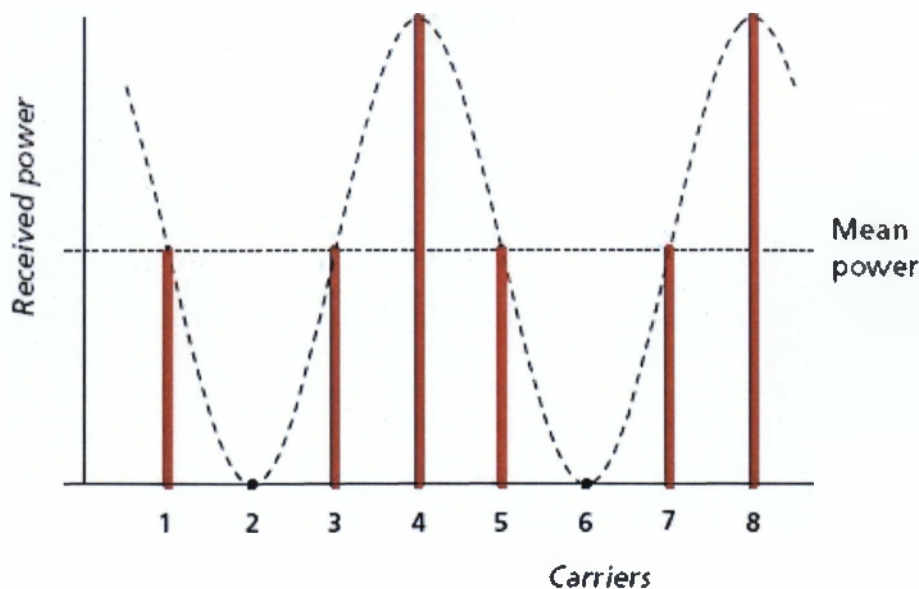
λαμβάνει υπ' όψιν του το αποτέλεσμα παρεμβολών ή εισαγωγής θορύβου στο πλάτος του σήματος τη στιγμή της λήψης απόφασης. Η διαδικασία της αποκωδικοποίησης Viterbi στη συνέχεια απλά βρίσκει το βέλτιστο ταίριασμα με βάση τα δεδομένα εισόδου.

Soft Decision Decoding: Προσθέτει μια διαδικασία ανάλυσης του βαθμού εμπιστοσύνης της διαδικασίας ταυρίσματος στον αποκωδικοποιητή Viterbi.. Τα δεδομένα εισόδου δεν είναι 0 ή 1 αλλά μετατρέπονται σε έναν 3 bit αριθμό. Οπότε ο αριθμός 111 αναπαριστά μεγαλύτερο βαθμό εμπιστοσύνης απ' ότι το λογικό 1 και από τον αριθμό 110. Αυτός ο 3 bit αριθμός χρησιμοποιείται στον αποκωδικοποιητή Viterbi κατά τη διαδικασία ταυρίσματος σαν συνάρτηση βάρους. Ένα bit δεδομένων, όπου το επίπεδο τάσης που αντιστοιχεί έχει αλλάξει λόγω θορύβου, θα του αποδοθεί χαμηλότερος βαθμός εμπιστοσύνης με συνέπεια χαμηλότερο βάρος στη διαδικασία αποκωδικοποίησης Viterbi.

Πληροφορία κατάστασης καναλιού (Channel State Information-CSI)

Αποδίδει ένα βαθμό εμπιστοσύνης σε κάθε COFDM υποφέρων καθώς τα διάφορα υποφέροντα έχουν διαφορετικούς ρυθμούς SNR. Ένα φέρον που πέφτει σε απότομη διακύμανση στο πεδίο της συχνότητας περιλαμβάνει ως επί το πλείστον θόρυβο, ενώ ένα φέρον στην κορυφή υποφέρει λιγότερο από θόρυβο (Σχήμα 7). Ένας παράγοντας που λαμβάνεται υπ' όψιν στις αδύναμες αποφάσεις είναι ότι τα δεδομένα που μεταφέρονται από φέροντα με υψηλό SNR είναι εκ των πρότερων πιο αξιόπιστα από τα δεδομένα που μεταφέρονται από φέροντα με χαμηλό SNR. Αυτή η εκ των προτέρων πληροφορία είναι γνωστή ως πληροφορία κατάστασης καναλιού (CSI). Η πληροφορία CSI επεκτείνεται για να συμπεριλάβει την παρεμβολή η οποία επηρεάζει μόνο επιλεγμένα φέροντα. Ο συνυπολογισμός της πληροφορίας καναλιού, προκειμένου να παρθούν αδύναμες αποφάσεις (soft decisions), είναι το κλειδί της εξαιρετικής απόκρισης της COFDM όταν παρουσιάζεται εξασθένιση επιλεκτικής συχνότητας (frequency selective fading) και παρεμβολή (interference).

Για παράδειγμα έστω η περίπτωση της ηχούς των 0dB που εξουδετερώνει τελείως 1 στα 4 υποφέροντα. Τα δυο γειτονικά υποφέροντα δεν επηρεάζονται ενώ το τέταρτο θα ενισχυθεί. (Σχήμα 11) Η πληροφορία από το μηδενικό υποφέρων είναι μη αληθής και πρέπει να αγνοηθεί αλλά η πληροφορία από το τέταρτο υποφέρων είναι ενισχυμένη άρα θα έχει υψηλό SNR και κατά συνέπεια βελτιωμένο BER. Με την κατάλληλη χρήση του FEC στην επιλογή της πληροφορίας των τριών υποφερώντων η απόδοση ενισχύεται. Ο αποκωδικοποιητής Viterbi χρησιμοποιεί την πληροφορία CSI για να χαμηλώσει το βαθμό εμπιστοσύνης των υποφερώντων με θόρυβο[21][22].



Σχήμα 11. Το αποτέλεσμα ενός καναλιού με μια μοναδική ηχώ των 0dB αρκετά καθυστερημένη ώστε ένα φέρων ανά 4 να μηδενίζεται.

5.5 Δίκτυα μιας συχνότητας (Single Frequency Networks-SFNs)

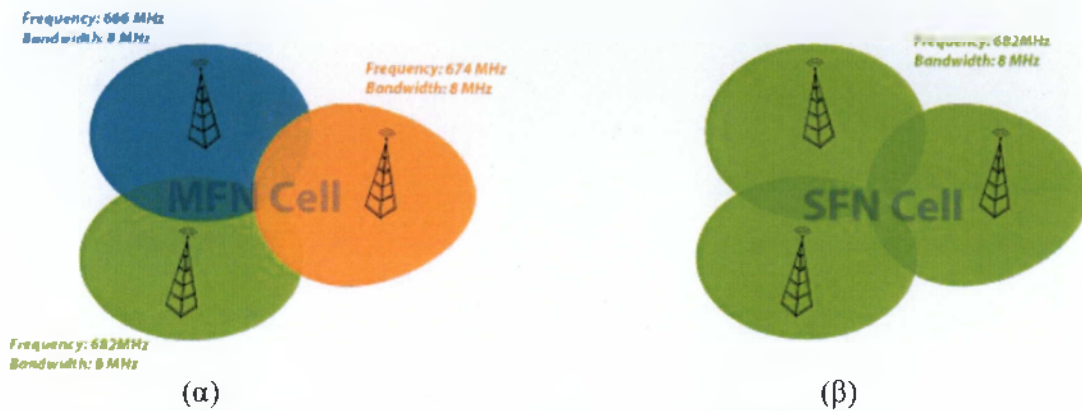
Η αναλογική επίγεια εκπομπή χρησιμοποιεί δίκτυα πολλαπλών συχνοτήτων (Multi-frequency Networks-MFNs). Πρόκειται για ένα σχήμα μετάδοσης που χρησιμοποιεί διαφορετική συχνότητα εκπομπής σε κάθε περιοχή που εξυπηρετεί ο πομπός. Ανά τον κόσμο εγκαταστάθηκαν σε διάφορα κράτη εκατοντάδες σταθμοί, για να εκπέμπουν σε εθνικό επίπεδο, με συνέπεια να χρησιμοποιούνται πολλές συχνότητες (Σχήμα 12α)[23].

Από τα τέλη της δεκαετίας του 1980, άρχισε η μελέτη στην Ευρώπη και την Ιαπωνία τεχνολογίας μετάδοσης η οποία εκμεταλλεύεται την ίδια συχνότητα σε γειτονικές περιοχές με χρήση της τεχνικής OFDM, δηλαδή των δικτύων μιας συχνότητας (SFNs) (Σχήμα 12β). Τα SFNs έχουν να κάνουν με δυο ή περισσότερες μεταδόσεις που εκπέμπονται στην ίδια συχνότητα, εκπέμπουν το ίδιο πρόγραμμα ώστε να καλύψουν κενά εντός των περιοχών μετάδοσης ή να επεκτείνουν την υπηρεσία που παρέχει ένας πομπός. Όλοι οι πομποί σε ένα SFN πρέπει να είναι συγχρονισμένοι έτσι ώστε οι εκπομπές τους να είναι ως προς το περιεχόμενο και τη συχνότητα ίδιες, έτσι ώστε να στέλνουν ταυτόχρονα το ίδιο σήμα στην ίδια συχνότητα. Η εγκατάσταση ενός SFN απαιτεί ειδικό εξοπλισμό που θα ενσωματωθεί στο ήδη υπάρχον δίκτυο, ο οποίος θα διασφαλίζει τον απαραίτητο συγχρονισμό χρησιμοποιώντας ως αναφορά έναν καθολικό χρόνο και μια καθολική συχνότητα όπως αυτά διατίθενται από ένα δορυφορικό σύστημα GPS[23][24].

Σε απλουστευμένη μορφή ένα δίκτυο SFN μπορεί να δημιουργηθεί από έναν μικρής ισχύος συγκάναλο επαναλήπτη (co-channel repeater), ενισχυτή ή διερχόμενη μετάδοσης (broadcast translator), ο οποίος χρησιμοποιείται σαν αναμεταδότης που γεμίζει κενά. Σκοπός του SFN είναι η αποδοτική χρησιμοποίηση του φάσματος των ραδιοσυχνοτήτων και επιτρέπει μεγαλύτερο αριθμό ραδιοφωνικών και τηλεοπτικών προγραμμάτων σε σύγκριση με τα παραδοσιακά MFNs. Επίσης ένα SFN μπορεί να αυξήσει την περιοχή κάλυψης και να μειώσει την πιθανότητα σφάλματος κατά τη

μετάδοση σε σχέση με ένα MFN, αφού η ισχύς του συνολικά λαμβανόμενου σήματος μπορεί να αυξηθεί στο μέσο της απόστασης των πομπών.

Η εκπομπές μέσω SFN μπορεί να θεωρηθούν σαν σφοδρή μορφή διάδοσης πολυδιάδοσης. Ο δέκτης λαμβάνει πολλές ηχούς του ίδιου σήματος και η ενισχυτική ή καταστρεπτική συμβολή μεταξύ τους μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα σκίαση (fading). Αυτό αποφεύγεται χρησιμοποιώντας OFDM ή COFDM



Σχήμα 12. Τοπολογία α) MFN και β) SFN

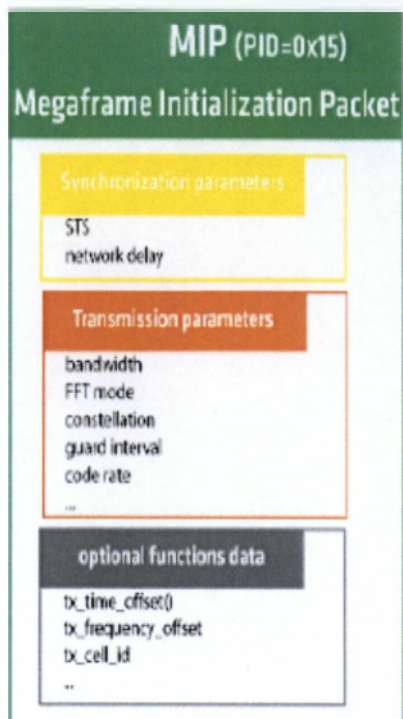
Σε ένα SFN ο πομπός και ο δέκτης είναι συνήθως συγχρονισμένοι μεταξύ τους χρησιμοποιώντας GPS (1PPS (1 pulse per second signal), 10MHz) ή ένα σήμα από τον κεντρικό σταθμό, το οποίο χρησιμοποιείται σαν ρολόι αναφοράς. Για παράδειγμα το DVB χρησιμοποιεί ένα ειδικό σημάδι, το λεγόμενο Mega-frame Initialization Packet (MIP), το οποίο εισάγεται στη ροή δεδομένων σε κεντρικό σημείο της διανομής και ενημερώνει τους SFN πομπούς για τον απόλυτο χρόνο στον οποίο το συγκεκριμένο σημείο της ροής των δεδομένων πρέπει να εκπεμφθεί[24].

Συγκεκριμένα η εισαγωγή του MIP καθορίζει μια νέα ομάδα πακέτων τη λεγόμενη megafame, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από το ρυθμό του κώδικα (code rate) και την τοπολογία που χρησιμοποιείται. Ο SFN προσαρμογέας σχηματίζει ένα megafame που αποτελείται από: 8 πλαίσια (frames) σε λειτουργία 8k, 16 πλαίσια σε λειτουργία 4k και 32 πλαίσια σε λειτουργία 2k. Το μέγεθος του megafame είναι ανεξάρτητο από τη χρήση του FFT. Η διάρκειά του καθορίζεται από το εύρος ζώνης του καναλιού και το διάστημα φύλαξης. Ο SFN προσαρμογέας θα εισάγει ένα MIP για κάθε megafame. Η θέση του MIP στο megafame καθορίζεται από το πεδίο "pointer" (Σχήμα 13)[25].

Η πληροφορία συγχρονισμού και οι παράμετροι μετάδοσης που στέλνονται στους μεταδότες αποθηκεύονται στο MIP. Το MIP περιλαμβάνει:

1. Παράμετρος Μετάδοσης: Αναφέρονται σαν TPS bits (Transmission Parameter signalling). Αυτά περιέχουν τα στοιχεία διαμόρφωσης (διάστημα φύλαξης, εύρος ζώνης, πληροφορία για τη λειτουργία του FFT κ.ά) Π.χ λειτουργία 4k, 5MHz, in-depth αναδιάταξη, MPE-FEC.
2. Πληροφορία συγχρονισμού: Περιέχει τη χρονοσφραγίδα (STS: Synchronization Time Stamp) και τη μέγιστη καθυστέρηση του δικτύου
3. Προαιρετικές συναρτήσεις: Στοχεύουν ατομικά τους πομπούς και επιτρέπουν καλύτερη κάλυψη των περιοχών

Στο Σχήμα 13 παρουσιάζεται η δομή ενός MIP πακέτου.



Syntax	No. of Bits
megaframe_initialization_packet() {	
transport_packet_header	32
Synchronization_id	1
section_length	8
pointer	16
periodic_flag	1
future_use	15
synchronization_time_stamp	24
maximum_delay	24
tpe_mip	32
individual_addressing_length	8
for(i=0; i<N; i++){	
tx_identifier	16
function_loop_length	8
for(j=0; j<N; j++){	
function()	
}	
}	4
CRC32	32
for(i=0; i<N; i++){	
stalling_byte	1
}	

Σχήμα 13. Δομή του MIP πακέτου

Συμπεράσματα

Η τηλεοπτική τεχνολογία έχει διατηρήσει την αναλογική μέθοδο εκπομπής σε μια εποχή που έχει επικρατήσει για τις περισσότερες μορφές πληροφορίας η ψηφιοποιημένη αποθήκευση και μεταφορά. Μόνο την τελευταία δεκαετία και χάρη στα πρότυπα συμπίεσης και πολυπλεξίας εικόνας της οικογένειας MPEG και το ευρωπαϊκό σύνολο προδιαγραφών DVB για διαμόρφωση και μετάδοση έχει αποκτήσει η ψηφιακή τηλεόραση μια συγκεκριμένη προοπτική[6].

Είναι αρκετά τα πλεονεκτήματα τα οποία εισάγει η ψηφιακή τεχνολογία στην διαμόρφωση και διανομή του τηλεοπτικού σήματος. Μερικά από αυτά είναι:

- Σταθερή ποιότητα εικόνας με μεγαλύτερη ανοχή στις ατέλειες του ασύρματου ή ενσύρματου διαύλου. Εξάλειψη φαινομένων όπως αυτά της θόλωσης, των πολλαπλών ειδώλων ή του θορύβου.
- Μειωμένος λόγος σήματος προς θόρυβο που απαιτείται σε σύγκριση με την αναλογική μετάδοση. Αυτό επιτρέπει τη μείωση της εκπεμπόμενης ισχύος μέχρι και κατά 30 db χωρίς να διαταράσσεται η ποιότητα της εικόνας.
- Καλύτερη εκμετάλλευση του φάσματος λόγω της συμπίεσης του σήματος βασικής ζώνης. Για παράδειγμα, ένα επίγειο κανάλι UHF αντιστοιχεί σε ένα και μόνο αναλογικό τηλεοπτικό πρόγραμμα, ενώ το ίδιο εύρος μπορεί να φιλοξενήσει μέχρι και 4 ψηφιακά προγράμματα υψηλής ποιότητας.
- Ευέλικτες τεχνικές πολυπλεξίας των ψηφιακών συστημάτων, που επιτρέπουν την συνύπαρξη πολλών προγραμμάτων και υπηρεσιών επιλεγόμενης ποιότητας και ευκρίνειας.
- Μεταβλητή ταχύτητα (bit rate) εκπομπής, ανάλογα με τις απαιτήσεις ποιότητας του προγράμματος κάτι που μεταξύ άλλων αυξάνει το κέρδος πολυπλεξίας (multiplexing gain) στην περίπτωση της ταυτόχρονης μετάδοσης πολλών προγραμμάτων μεταβλητού ρυθμού.
- Δυνατότητα επεξεργασίας της εικόνας στο δέκτη μετά τη λήψη μέσω αλγορίθμων ψηφιακής επεξεργασίας (digital image post-processing), όπως χρωματική διόρθωση, αποκοπή ορίων, αυξομείωση του μεγέθους ή αφαίρεση θορύβου.
- Εύκολος εμπλουτισμός των τηλεοπτικών προγραμμάτων μέσω τυποποιημένων αρχιτεκτονικών (MHP, Open tv) με τοπικές εφαρμογές που εκμεταλλεύονται τις δυνατότητες των σύγχρονων «έξυπνων δεκτών».
- Ενσωμάτωση διάφορων πολυμεσικών εφαρμογών και υπηρεσιών δεδομένων, όπως αμφίδρομων υπηρεσιών και διαδικτυακής πρόσβασης σε μια κοινή ψηφιακή πλατφόρμα, με προϋπόθεση ότι υπάρχει διαθέσιμο κανάλι επιστροφής (reverse path)

Με την εισαγωγή της ψηφιακής τεχνολογίας στην επίγεια τηλεοπτική μετάδοση και με δεδομένα τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα, αποτελεί θέμα χρόνου η μετάβαση από τα αναλογικά στα ψηφιακά συστήματα. Αυτή η διαδικασία ("Digital switchover") αναμένεται να είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα, όχι τόσο λόγω τεχνικών δυσκολιών, όσο εξαιτίας της υπάρχουσας αναλογικής υποδομής τόσο στους παροχείς όσο και στους τηλεθεατές. Μιας υποδομής που θα απαιτήσει πολύ χρόνο και ισχυρά κίνητρα για να αντικατασταθεί. Υπάρχουν όμως και τεχνικά ζητήματα, όπως για παράδειγμα η συνύπαρξη αναλογικών και ψηφιακών καναλιών σε γειτονικές ή και στην ίδια περιοχή μπάντας των UHF[6]. Όσον αφορά την ευαισθησία του αναλογικού σήματος στην ψηφιακή παρεμβολή, έχει μετρηθεί ότι, για παραδεκτή ποιότητα εικόνας, το αναλογικό σήμα (PAL) πρέπει να υπερβαίνει την ισχύ του ψηφιακού κατά 40 db περίπου για την περίπτωση της ομοδιαυλικής παρεμβολής (CCI – co-channel interference).

Όπως ορίζει το κείμενο της ευρωπαϊκής επιτροπής που παρουσιάστηκε το 2002 στο Ευρωπαϊκό συμβούλιο της Σεβίλλης για την επιτάχυνση της μετάβασης στην ψηφιακή τηλεόραση, θα πρέπει τα κράτη μέλη να δημιουργήσουν συνθήκες διαφάνειας όσον αφορά τους όρους της μετάβασης. Τα κράτη μέλη είχαν υποχρέωση, έως τα τέλη του 2003 να δημοσιεύσουν τις προθέσεις τους σχετικά με την επικείμενη μετάβαση: θα πρέπει να περιλαμβάνεται χρονοδιάγραμμα και αξιολόγηση των συνθηκών της αγοράς, καθώς και ενδεχομένως ημερομηνία τερματισμού των αναλογικών επίγειων τηλεοπτικών εκπομπών (analog closure), που θα επέτρεπε την ανάκτηση και την αναδιανομή των συχνοτήτων. Τα εθνικά σχέδια μετάβασης θα πρέπει επίσης να λαμβάνουν υπόψη ανταγωνιστικούς μηχανισμούς μετάδοσης (κυρίως δορυφορικούς, καλωδιακούς και επίγειους). Με βάση τις οδηγίες αυτές, αναμένεται στα επόμενα χρόνια το 50% των καναλιών εκπομπής να είναι ψηφιακά και να χρησιμοποιούν το MPEG-2 Transport stream ως στρώμα μεταφοράς.

DVB-T2

Στην επίγεια ψηφιακή μετάδοση το πρότυπο DVB-T πάει να αντικατασταθεί από το δεύτερης γενιάς DVB-T2. Σκοπός του είναι η καλύτερη διαχείριση του bandwidth έτσι ώστε να υπάρχουν περισσότερα κανάλια κατά την κωδικοποίηση H.264/MPEG-4 για High Definition εικόνα φυσικά

Το DVB-T2 είναι η σύντηξη για Digital Video Broadcasting - Terrestrial δεύτερης γενιάς. Είναι η επέκταση του τηλεοπτικού προτύπου DVB-T. Αυτό το σύστημα μεταδίδει συμπιεσμένο ψηφιακό ήχο, βίντεο και άλλα δεδομένα με διαμόρφωση OFDM με συνεχόμενα κανάλια κωδικοποίησης και interleaving. Έρχεται με βελτιωμένη τεχνολογία διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, θα έχει περισσότερα κανάλια ανά συχνότητα, ενώ, μεταξύ άλλων, θα υποστηρίζει καλύτερα το HDTV. Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος multiplex φροντίζει ώστε οι προς διάθεση υπάρχουσες συχνότητες να μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά 30-50% καλύτερα. Έτσι, αντί των τεσσάρων καναλιών στην ίδια συχνότητα UHF, όπως γινόταν μέχρι σήμερα, θα υποστηρίζονται πλέον επτά κανάλια. Επιπρόσθετα, το video θα κωδικοποιείται μέσω του MPEG-4 AVC [H.264]. Τέλος παρά τις πολλές βελτιώσεις, το DVB-T2 θα διατηρήσει τη συμβατότητα με το τωρινό DVB-T.

Βιβλιογραφία

- [1]. Κωνσταντίνος Τσαμουτάλος & Παναγιώτης Σαράντης, «Αναλογική και Ψηφιακή Τηλεόραση»
- [2]. Μουσίτσας Χρήστος, «Η μετάβαση στην ψηφιακή Τηλεόραση»
- [3]. Digital Video Broadcasting (DVB): Framing structure, channel coding and modulation for Digital Terrestrial Television (DVB-T) (Έκδοση 1997).
- [4]. Wikipedia, “DVB-H”, <http://www.wikipedia.com>
- [5]. Nokia Corporation, “DVB-H: Live Broadcast Mobile TV”, technical paper, 2006
- [6]. P.Bretillon, J.Baina & G.Goudezeune “Video Quality monitoring in Digital TV networks ”
- [7]. <http://www.etsi.org>
- [8]. http://el.wikipedia.org/wiki/Επίγεια_ψηφιακή_τηλεόραση/
- [9]. <http://www.tvsat.gr/>
- [10]. Παντελής Χρ. Βαφειάδης, “Αναλογική Τηλεόραση και Βίντεο”
- [11]. M.Buttin, “Results for MPEG2 Coded and Transcoded Video Sequences”
- [12]. <http://www.mpeg.org/>
- [13]. Detection and Concealment of Transition Errors in MPEG-2 Images, Σεπτέμβριος 1999.
- [14]. <http://www.paraki.panteion.gr/>
- [15]. Κ. Λατίφης, «Παραμετρικές Τεχνικές Εκτίμησης Καναλιού Σε Συστήματα Μετάδοσης OFDM», Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2005
- [16]. Χ. Παπακώστας, «Ορθογωνική Πολύπλεξη με Διαίρεση Συχνότητας (OFDM)-Μέθοδοι εκτίμησης του καναλιού μετάδοσης», Μεταπτυχιακή Διατριβή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 2004
- [17]. Αγγελόπουλος, «COFDM-Επίγεια ψηφιακή TV», Πηγή TVSat, 2008
- [18]. Χ. Σπανού, «Σχεδιασμός ασύρματου συστήματος ευρείας ζώνης σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.16», Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2008
- [19]. C. Langton, “Intuitive Guide to Principles of Communications, 2004
- [20]. Π. Καλογεράκης, «Αλγόριθμοι και αρχιτεκτονικές VLSI για το συγχρονισμό σε ασύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα βασισμένα σε διαμόρφωση OFDM», μεταπτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2006
- [21]. The Gigawave Guide to Digital Microwave Technology: COFDM Compression, <http://www.gigawave.co.uk/cofdm.html>
- [22]. J.H. Stott, “The how and why of COFDM”, BBC Research and Development
- [23]. Sung-Woong Choi and Heon-Jin Hong, “A Study on the Interference in Single Frequency Network and On-Channel Repeater”, Progress In Electromagnetics Research Symposium, Cambridge, USA, July 2-6, 2008
- [24]. Wikipedia: “Single-frequency Networks”, <http://www.wikipedia.com>
- [25]. Olivier Milet, “Technical Overview of Single Frequency Network”, white paper, <http://www.enensys.com>