



Αρχές Ψηφιακής Τηλεόρασης ***Ενότητα 7 – Μετάδοση***

Καθηγητής Δρ. Ευάγγελος Πάλλης
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Περιεχόμενα

- Σύνοψη και μαθησιακά αποτελέσματα/στόχοι
- Εισαγωγή στην Ενότητα 7
- Αναλογική μετάδοση
 - Ασπρόμαυρη τηλεόραση
 - Διαμόρφωση Σήματος Φωτεινότητας
 - Διαμόρφωση Σήματος Ήχου
 - Φάσμα Σήματος Ασπρόμαυρης Τηλεόρασης
 - Διαμόρφωση Έγχρωμου Τηλεοπτικού Σήματος
 - Σήμα Χρωμικότητας
 - Διαμόρφωση Σήματος Χρώματος
 - Σήμα Burst και Αντιμετώπιση Διαφοράς Φάσης
 - Φονέας Χρώματος
- Ψηφιακή Διαμόρφωση
 - Αντιστοίχιση Ροής σε Σύμβολα
 - Ορθογώνια Πολυπλεξία με Διάρθρωση Συχνότητας (OFDM)
 - Τρόποι Λειτουργίας – Πλήθος Φερόντων
 - Διάστημα Προστασίας
 - Σηματοδοσία και Σήματα Αναφοράς
 - Σηματοδοσία
 - Σήματα Αναφοράς
 - Μονοσυχνοτικά Δίκτυα

Περιγραφή Ενότητας 7

Σύνοψη

Στην Ενότητα 7 εξετάζουμε τα θέματα που αφορούν στη μετάδοση του τηλεοπτικού σήματος τόσο σε αναλογική όσο και στην ψηφιακή μορφή. Και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιείται το φάσμα των VHF/UHF με τις ίδιες χωρητικότητες καναλιών, αλλά επιτυγχάνοντας οικονομία του φάσματος στην περίπτωση του ψηφιακού σήματος. Ξεκινώντας με τη μετάδοση του αναλογικού σήματος, περιγράφεται η διαμόρφωση του σήματος φωτεινότητας και στη συνέχεια των σημάτων του χρώματος (των χρωμοδιαφορών) και του ήχου. Επίσης, εξετάζουμε τη χρήση του φάσματος και τον διαμοιρασμό αυτού για τα περιεχόμενα σήματα. Στο δεύτερο μισό του κεφαλαίου εξετάζουμε την ψηφιακή μετάδοση και τις σχετικές τεχνικές διαμόρφωσης. Περιγράφονται οι αντιστοιχίσεις των bits στα διαμορφωμένα σύμβολα, ανάλογα και με τα σενάρια διαμόρφωσης που επιλέγονται καθώς και η χρήση των μηχανισμών του OFDM για αυτή καθαυτή τη μετάδοση. Όπως και στην περίπτωση της αναλογικής μετάδοσης, εξετάζεται η χρήση του φάσματος των τηλεοπτικών καναλιών.

Προαπαιτούμενη γνώση

Η κατανόηση της Ενότητας 7 προϋποθέτει κάποιες βασικές γνώσεις στα θέματα της μετάδοσης τόσο της αναλογικής όσο και της ψηφιακής. Επίσης, είναι σημαντική η κατανόηση της μορφής και της δομής των τηλεοπτικών σημάτων τόσο στην αναλογική όσο και την ψηφιακή μορφή. Ενδείκνυται ακόμη γνώση της γενικής εικόνας του συστήματος και των επιμέρους βαθμίδων που το αποτελούν τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη, ώστε να γίνει αντιληπτή η σημασία της λειτουργικότητας που περιγράφουμε σε αυτή την Ενότητα.

Μαθησιακά αποτελέσματα

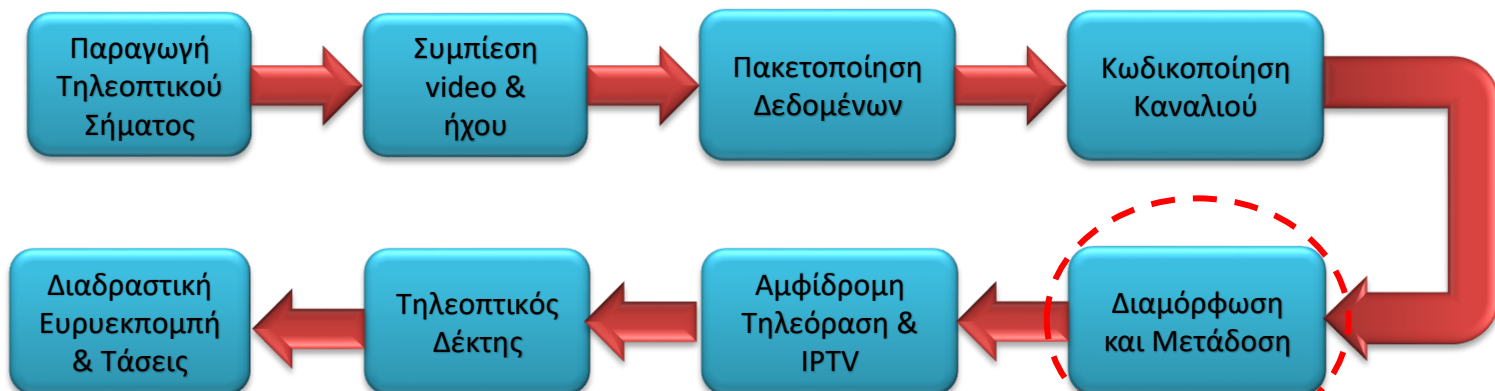
Με την επιτυχή ολοκλήρωση της Ενότητας 7 ο φοιτητής / τρια θα είναι σε θέση να:

- Κατανοεί τον τρόπο λειτουργίας και οργάνωσης των μονάδων μετάδοσης της αναλογικής και της ψηφιακής τηλεοπτικής πληροφορίας, και τη χρήση τους για βέλτιστη εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης του καναλιού.
- Γνωρίζει τις βασικές αρχές εκπομπής του τηλεοπτικού σήματος τόσο σε αναλογική όσο και σε ψηφιακή μορφή, καθώς και τους μηχανισμούς μετάδοσης της ψηφιακής πληροφορίας με την χρήση Ορθογώνιας Πολυπλεξίας Διαίρεσης Συχνότητας.
- Εφαρμόζει μεθόδους και εργαλεία ανάλυσης των παραμέτρων εκπομπής/λήψης ψηφιακών τηλεοπτικών προγραμμάτων, καθώς της δομής των εκπεμπόμενων πληροφοριών σύμφωνα με το πρότυπο DVB-T.
- Αναλύει και υπολογίζει τα βασικά χαρακτηριστικά των μηχανισμών εκπομπής και λήψης του τηλεοπτικού σήματος με την τεχνική COFDM τόσο σε πολυσυχνотικά όσο και σε μονοσυχνотικά δίκτυα.
- Προτείνει λύσεις σε θέματα λειτουργίας και συντήρησης των μονάδων εκπομπής/λήψης ψηφιακών τηλεοπτικών προγραμμάτων, καθώς και τρόπους αξιολόγησης των επιδόσεών τους.

Εισαγωγή

Εισαγωγή στην Ενότητα 7

Το τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας του τηλεοπτικού σήματος στον πομπό (και το πρώτο στον δέκτη) αφορά τη μετάδοση. Η μετάδοση εξαρτάται από το είδος του διαύλου που χρησιμοποιείται, αν είναι, δηλαδή, επίγειος, δορυφορικός ή καλωδιακός. Όπως είναι ευνόητο, στα συστήματα αυτά υπάρχουν διαφοροποιήσεις λόγω των ετερόκλητων συνθηκών που καλούνται να αντιμετωπίσουν τα σήματα, με βασικές την απόσταση που καλείται να διανύσει το σήμα αλλά και το περιβάλλον της διάδοσης.



Εισαγωγή στην Ενότητα 7

Στην Ενότητα αυτή θα εξετάσουμε τα θέματα της διαμόρφωσης και της μετάδοσης για την επίγεια τηλεόραση.

- Στο πρώτο μέρος της Ενότητας 7 εξετάζονται τα θέματα που αφορούν στην αναλογική μετάδοση, ξεκινώντας από την ασπρόμαυρη τηλεόραση, όπου το σήμα αποτελείται από τη φωτεινότητα και τον ήχο, και στην συνέχεια εξετάζουμε το έγχρωμο σήμα το οποίο προκύπτει από την προσθήκη του χρώματος (των χρωμοδιαφορών).
- Στο δεύτερο τμήμα της Ενότητας 7 εξετάζονται τα θέματα της ψηφιακής διαμόρφωσης, τα οποία ξεκινούν με την αντιστοίχιση των bits σε σύμβολα. Το σύστημα διαμόρφωσης συνδυάζει την ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM), με τις ψηφιακές διαμορφώσεις. Η ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας χρησιμοποιεί έναν μεγάλο αριθμό φερουσών, στις οποίες διαχωρίζεται η πληροφορία και κάθε φέρουσα διαμορφώνεται χωριστά.

Αναλογική μετάδοση

Γενικά για την αναλογική μετάδοση

Στην αναλογική τηλεόραση το σήμα αποτελείται από τρία διακριτά σήματα:

- **το σήμα φωτεινότητας (Y)** το οποίο είχε χρησιμοποιηθεί στην ασπρόμαυρη τηλεόραση και συνεχίστηκε να χρησιμοποιείται και στην έγχρωμη αναλογική, αρχικά για λόγους συμβατότητας, αλλά και για να μπορεί να υφίσταται διαφορετική διαχείριση (π.χ. αναφορικά με τη δειγματοληψία) λόγω της μεγαλύτερης σπουδαιότητάς του σε σχέση με αυτό του χρώματος για την ποιότητα της εικόνας.
- **το σήμα του χρώματος**, το οποίο αποτελείται από δύο συνιστώσες και συγκεκριμένα τις **χρωμοδιαφορές**. Ανάλογα με το σύστημα χρώματος που χρησιμοποιείται, τα σήματα που αφορούν το χρώμα προκύπτουν με άλλο τρόπο. Στην περίπτωση του NTSC έχουμε τα I και Q, στο PAL χρησιμοποιούνται τα U και V, ενώ στην περίπτωση του SECAM χρησιμοποιούνται τα D_R και D_B .
- **το σήμα του ήχου**, το οποίο διαμορφώνεται και μεταδίδεται ξεχωριστά, εντός του συγκεκριμένου καναλιού.

Τα σήματα αυτά αθροίζονται και διαμορφώνονται και το συνολικά διαμορφωμένο σήμα εντάσσεται στο εύρος ζώνης του εκάστου καναλιού, είτε των 7 MHz (εάν πρόκειται για κανάλι των VHF) είτε των 8 MHz (εάν πρόκειται για κανάλι των UHF). Όσον αφορά τη μετάδοση του σήματος χρώματος, η Ελλάδα είχε υιοθετήσει (από τις αρχές της δεκαετίας του 1990) το σύστημα PAL B/G. Το **PAL B αντιστοιχεί στο κανάλι VHF** (δηλαδή με εύρος ζώνης 7 MHz) και το **PAL G σε κανάλι UHF** (δηλαδή με εύρος ζώνης 8 MHz).

Ασπρόμαυρη τηλεόραση – διαμόρφωση σήματος φωτεινότητας

Το σήμα της φωτεινότητας (Υ) έχει εύρος ζώνης περίπου 5 MHz. Το σήμα της φωτεινότητας διαμορφώνεται κατά πλάτος (**Amplitude Modulation, AM**) προκειμένου να μεταδοθεί.

- Στο φάσμα των 7 (VHF) ή 8 (UHF) MHz **δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί διαμόρφωση διπλευρικής ζώνης (Double Side Band, DSB)** αφού θα χρειαζόταν φάσμα κατ' ελάχιστον 10 MHz μόνο για τη φωτεινότητα. Επίσης, δεν απαιτείται η μετάδοση και των δύο πλευρικών, αφού φέρουν την ίδια πληροφορία.
- Εναλλακτικά της DSB **θα μπορούσε να εφαρμοστεί η μονόπλευρη διαμόρφωση (Single Side Band, SSB)** στην οποία μεταδίδεται μόνο η μία πλευρική, αλλά σε αυτή την περίπτωση απαιτούνται ιδιαίτερα περίπλοκα φίλτρα για την αποκοπή της μίας πλευρικής.
- Για τη διαμόρφωση του σήματος φωτεινότητας **χρησιμοποιείται η τεχνική υπολειπόμενης πλευρικής ζώνης (Vestigial Side Band Modulation, VSB)** η οποία συμβιβάζει τις απαιτήσεις μεταξύ των SSB και DSB.

Ασπρόμαυρη τηλεόραση – διαμόρφωση σήματος φωτεινότητας

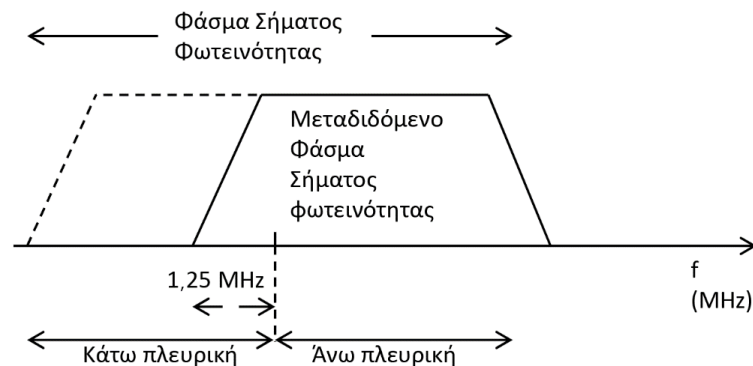
Η VSB προβλέπει τη μετάδοση ολόκληρης της μίας εκ των πλευρικών και ενός τμήματος από την άλλη πλευρική.

- Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται οι απαιτήσεις για το ζωνοπερατό φίλτρο, καθώς και οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης από το κανάλι (μπορεί δηλαδή να τοποθετηθεί τόσο σε ένα κανάλι VHF ή σε UHF).
- Επίσης, **επιτρέπεται** η διέλευση σημάτων με μηδενική συχνότητα (που έχουν δηλαδή DC συνιστώσα).

Ασπρόμαυρη τηλεόραση – διαμόρφωση σήματος φωτεινότητας

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το συνολικό φάσμα του σήματος της φωτεινότητας, στο οποίο παρατηρούμε ότι μεταδίδεται ολόκληρη η άνω πλευρική, ενώ από την κάτω πλευρική μεταδίδεται μόνο ένα ποσοστό το οποίο αντιστοιχεί σε 0,75 MHz του εύρους της.

- Υπάρχει βέβαια και μία απώλεια στο φάσμα λόγω του γεγονότος ότι αναπόφευκτα τα χρησιμοποιούμενα φίλτρα έχουν κάποια κλίση, διαφέρουν, δηλαδή, από το ιδανικό του οποίου η καμπύλη αποκοπής είναι κατακόρυφη. Η απώλεια αυτή, η απόκλιση, δηλαδή, από την ιδανική περίπτωση, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη σχεδίαση του εξοπλισμού.



Συνολικό και μεταδιδόμενο φάσμα σήματος φωτεινότητας

Ασπρόμαυρη τηλεόραση – διαμόρφωση σήματος ήχου

Το σήμα του ήχου μεταδίδεται με διαμόρφωση κατά συχνότητα (Frequency Modulation, FM), αφού αυτή είναι πιο αποδοτική αναφορικά με την αντιμετώπιση του θορύβου.

- Η φέρουσα του ήχου τοποθετείται σε συγκεκριμένη απόσταση από τη φέρουσα της φωτεινότητας, και πιο συγκεκριμένα για τα PAL B/G σε απόσταση 5,5 MHz. Έτσι, εάν η φέρουσα της φωτεινότητας απέχει 1,25 MHz (εκ των οποίων τα 0,75 MHz αντιστοιχούν στην κάτω πλευρική) από την αρχή του εύρους ζώνης του καναλιού, η φέρουσα του ήχου θα βρίσκεται σε απόσταση 6,75 MHz από την αρχή του καναλιού. Ισχύει ότι:

$$\left. \begin{aligned} f_{\Phi\Phi} &= f_{\kappa\alpha\nu} + 1,25 \text{ MHz} \\ f_{\Phi\text{H}} &= f_{\Phi\Phi} + 5,5 \text{ MHz} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Όπου

- $f_{\kappa\alpha\nu}$ η συχνότητα στην οποία ξεκινάει το φάσμα του καναλιού,
- $f_{\Phi\Phi}$ η φέρουσα του σήματος φωτεινότητας, και
- $f_{\Phi\text{H}}$ η φέρουσα του σήματος του ήχου.

Ασπρόμαυρη τηλεόραση – διαμόρφωση σήματος ήχου

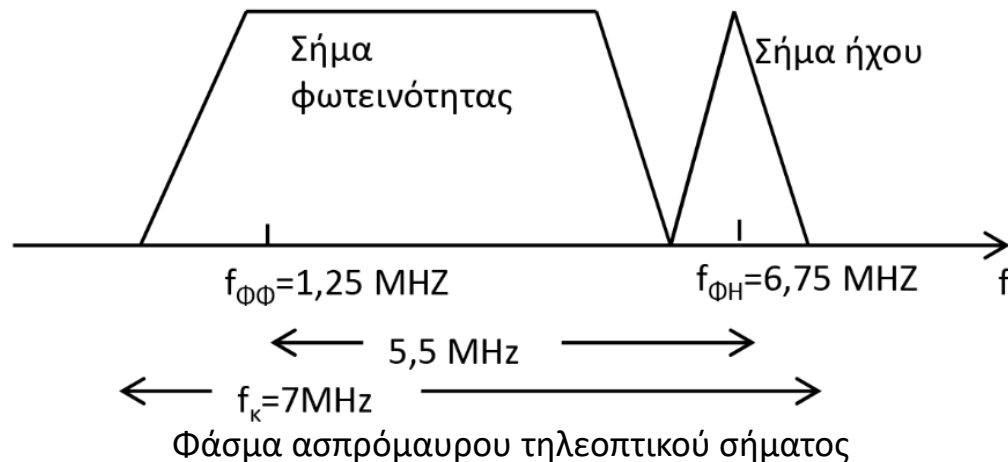
Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά που αφορούν τις διάφορες εκδόσεις του συστήματος PAL, που όπως παρατηρούμε η απόσταση μεταξύ των δύο φερουσών (φωτεινότητας και ήχου) διαφοροποιείται π.χ. στο PAL D/K είναι 6 MHz.

	PAL B	PAL G, H	PAL I	PAL D, K	PAL M	PAL N
Μπάντα μετάδοσης	VHF	UHF	VHF/UHF	VHF/UHF	VHF/UHF	VHF/UHF
Πεδία (ffields) ανά δευτερόλεπτο	50	50	50	50	60	60
Γραμμές	625	625	625	625	525	525
Ενεργές γραμμές	576	576	576	576	480	480
Εύρος ζώνης καναλιού	7 MHz	8MHz	8MHz	8MHz	6MHz	6MHz
Εύρος ζώνης σήματος βίντεο	5,0 MHz	5,0 MHz	5,5MHz	6,0 MHz	4,2MHz	4,2MHz
Συχνότητα φέροντος χρώματος	4,43MHz	4,43 MHz	4,43 MHz	4,43 MHz	3,58 MHz	3,58 MHz
Απόσταση μεταξύ των συχνοτήτων των φερουσών (φωτεινότητας και ήχου)	5,5 MHz	5,5 MHz	6,0 MHz	6,5 MHz	4,5 MHz	4,5 MHz

Χαρακτηριστικά των εκδόσεων του προτύπου PAL

Ασπρόμαυρη τηλεόραση – φάσμα συνολικού σήματος

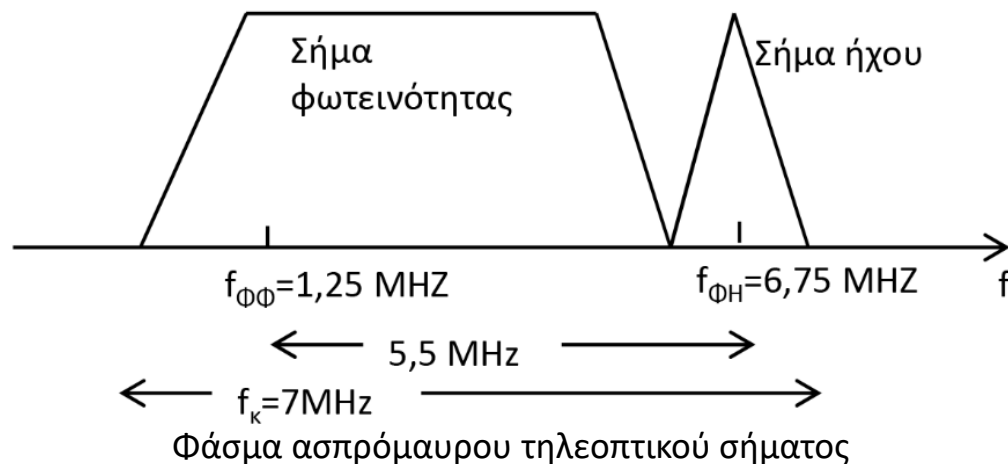
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το φάσμα του ασπρόμαυρου τηλεοπτικού σήματος (δηλαδή το σήμα φωτεινότητας και το σήμα του ήχου) σε ένα κανάλι VHF, εύρους ζώνης 7 MHz. Αντίστοιχη μορφή έχει και το φάσμα στην περίπτωση καναλιού UHF (8 MHz), αφού τόσο η απόσταση των συχνοτήτων των φερουσών (φωτεινότητας και ήχου) όσο και το εύρος ζώνης του σήματος φωτεινότητας παραμένουν ως έχουν.



Ασπρόμαυρη τηλεόραση – φάσμα συνολικού σήματος

Παρατηρούμε ότι:

- Το σήμα της φωτεινότητας καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό του εύρους ζώνης (από την αρχή του καναλιού μέχρι και τα 6.5 MHz).
- Το σήμα του ήχου μετά τη διαμόρφωση καταλαμβάνει περίπου 0.5 MHz.
- Οι συχνότητες των φερουσών φωτεινότητας και ήχου απέχουν 5.5 MHz μεταξύ τους.
- Λόγω της Vestigial Side Band (VSB) το φέρον της φωτεινότητας περιλαμβάνει ένα ποσοστό της κάτω πλευρικής, περί τα 0.75 MHz.



Ασπρόμαυρη τηλεόραση – φάσμα συνολικού σήματος

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι συχνότητες για τις φέρουσες του σήματος φωτεινότητας και του σήματος ήχου στα κανάλια 21 έως και 24 των UHF, για το σύστημα PAL B/G (625 γραμμές, κανάλι στα 8 MHz).

Αριθμός καναλιού	Συχνότητα φέροντος φωτεινότητας (MHz)	Συχνότητα φέροντος ήχου (MHz)
21	471,25	476,75
22	479,25	484,75
23	487,25	492,75
24	495,25	500,75

Συχνότητες για τα φέροντα για τα κανάλια από 21 έως και 24 των UHF, για το σύστημα PAL G

Τα κανάλια τα οποία χρησιμοποιούνται ανήκουν στις επόμενες περιοχές:

- I (VHF) κανάλια 2 έως και 4, περιοχή συχνοτήτων 47 έως 68 MHz.
- III (VHF) κανάλια 2 έως και 4, περιοχή συχνοτήτων 174 έως 230 MHz.
- IV (UHF) κανάλια 21 έως και 37, περιοχή συχνοτήτων 470 έως 606 MHz.
- V (UHF) κανάλια 38 έως και 69, περιοχή συχνοτήτων 606 έως 862 MHz.

Διαμόρφωση έγχρωμου τηλεοπτικού σήματος – σήμα χρωμικότητας

Όπως έχουμε δει στην Ενότητα 2 (βλ. Συστήματα διαχείρισης χρώματος), η πληροφορία του χρώματος αποτελείται από δύο ανεξάρτητα σήματα, τις **χρωμοδιαφορές**, οι οποίες συμβολίζονται με C_b (B-Y) και C_r (R-Y). Ανάλογα με το σύστημα κωδικοποίησης χρωμάτων που χρησιμοποιείται, οι χρωμοδιαφορές υφίστανται κάποιες διαφοροποιήσεις στις τιμές και προκύπτουν ισοδύναμα μεγέθη.

- Στην περίπτωση του NTSC τα σήματα χρώματος ονομάζονται I και Q και υπολογίζονται με βάση τις επόμενες σχέσεις.

$$\left. \begin{aligned} I &= -0,27 (B-Y) + 0,74 (R-Y) \\ Q &= 0,41 (B-Y) + 0,48 (R-Y) \end{aligned} \right\} \quad (2) \text{ σχέση 9 στην Εν. 2}$$

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

$$\left. \begin{aligned} U &= 0,49 (B-Y) \\ V &= 0,88 (R-Y) \end{aligned} \right\} \quad (3) \text{ σχέση 10 στην Εν. 2}$$

- Στην περίπτωση του SECAM τα σήματα χρώματος ονομάζονται DR και DB και υπολογίζονται με βάση τις επόμενες σχέσεις.

$$\left. \begin{aligned} D_R &= -1,9 (R-Y) \\ D_B &= 1,5 (B-Y) \end{aligned} \right\} \quad (4) \text{ σχέση 11 στην Εν. 2}$$

Διαμόρφωση έγχρωμου τηλεοπτικού σήματος – διαμόρφωση χρώματος

Τα σήματα του χρώματος έχουν λιγότερη πληροφορία (άρα και εύρος ζώνης) σε σχέση με το σήμα της φωτεινότητας. Για τη μετάδοση χρησιμοποιείται η διαμόρφωση πλάτους (**Amplitude Modulation, AM**) και αποστέλλονται και οι δύο μπάντες του σήματος, με καταπιεσμένο το φέρον (**Double Side Band Suppressed Carrier, DSB-SC**). Για να πραγματοποιηθεί η AM DSB-SC διαμόρφωση απαιτείται ο πολλαπλασιασμός του φέροντος με το σήμα πληροφορίας.

Έστω $c(t)$ το σήμα της πληροφορίας του χρώματος και ότι το φέρον είναι ένα ημιτονικό σήμα στη συχνότητα $f_{\phi\chi}$ (συχνότητα φέροντος χρώματος). Η διαμόρφωση AM DSB SC δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$c(t)\cos(2\pi f_{\phi\chi}t + \varphi) \quad (5)$$

Εδώ τίθεται το εξής ζήτημα: Το σήμα της χρωμικότητας αποτελείται από δύο σήματα (χρωμοδιαφορές C_b και C_r), τα οποία είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, **οπότε απαιτείται ένας μηχανισμός για την ταυτόχρονη διαμόρφωση των δύο αυτών σημάτων με ένα φέρον**, πράγμα που θα επιτρέψει την πιο αποτελεσματική εκμετάλλευση του εύρους ζώνης.

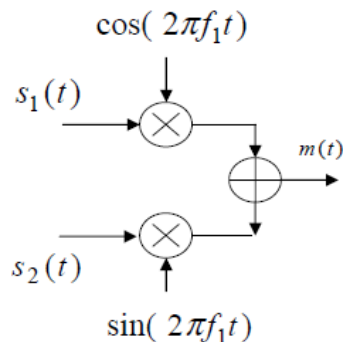
Διαμόρφωση έγχρωμου τηλεοπτικού σήματος – διαμόρφωση χρώματος

Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η **ορθογωνική διαμόρφωση πλάτους QAM (Quadrature Amplitude Modulation)**, η οποία επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση των δύο σημάτων με χρήση του ίδιου φέροντος.

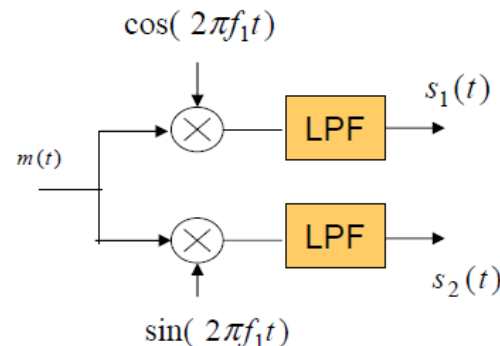
Τα βασικά χαρακτηριστικά της διαμόρφωσης QAM στην περίπτωση της έγχρωμης τηλεόρασης, είναι:

- Τα σήματα χρωματικής πληροφορίας προκύπτουν με βάση το χρησιμοποιούμενο σύστημα, π.χ. για την περίπτωση του PAL είναι τα U και V και το σήμα που προκύπτει ονομάζεται **χρωματοφόρο**.
- Χρησιμοποιούνται δύο υποφέροντα με ίδια συχνότητα αλλά με διαφορά φάσης $\pi/2$.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα διαμορφωτής και ένας αδιαμορφωτής QAM.



QAM modulator



QAM demodulator

Διαμόρφωση έγχρωμου τηλεοπτικού σήματος – διαμόρφωση χρώματος

Στο πρότυπο PAL, η έγχρωμη συχνότητα υπο-φέροντος βασίζεται σε ένα πολλαπλάσιο του τέταρτου της γραμμής, χρησιμοποιώντας τον παράγοντα 1135/4. Το πολλαπλάσιο του ενός τέταρτου, σε συνδυασμό με την εναλλαγή γραμμής σε γραμμή της φάσης του στοιχείου διαφοράς χρώματος V, αναγκάζει τα συστατικά χρώματος U και V να καταλαμβάνουν ξεχωριστά μέρη του φάσματος σύνθετου σήματος. Αυτό καθιστά το σήμα PAL άνοσο στα σφάλματα απόχρωσης που προκύπτουν κατά την διαφορική παραμόρφωση φάσης.

Η συχνότητα της φέρουσας του χρώματος (χρωμοφέρουσα, $f_{\Phi X}$) για το πρότυπο PAL είναι:

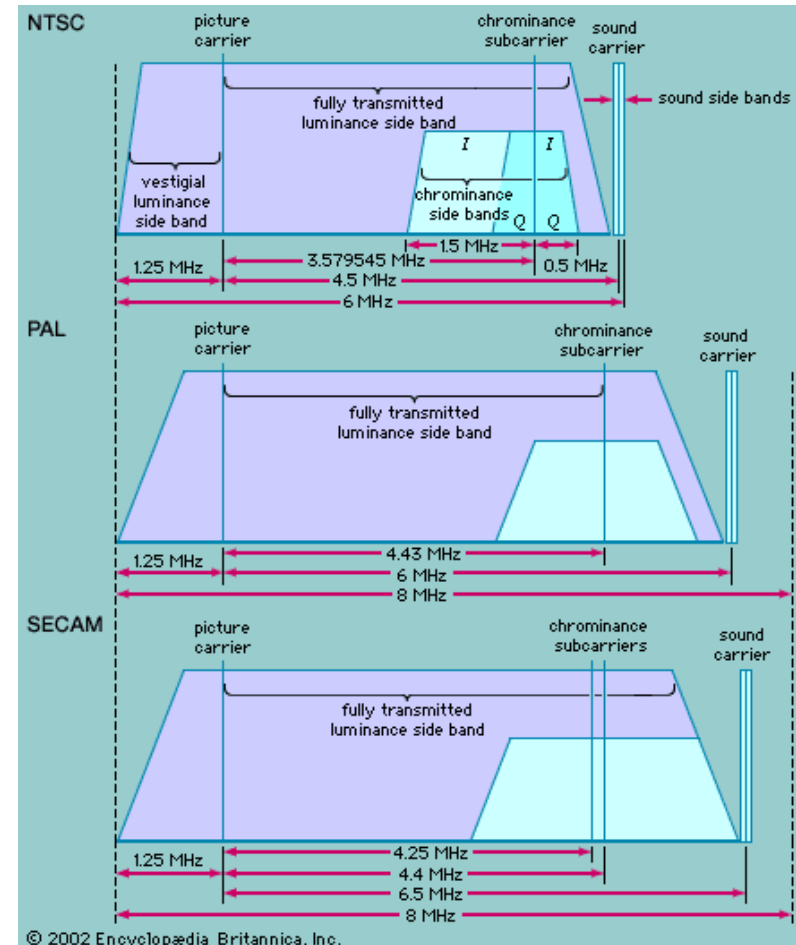
$$625 \times \left(\frac{50}{2} \text{ Hz} \right) \times \left(\frac{1135}{4} + \frac{1}{625} \right) = 4.433618750 \text{ MHz}$$

- Η συχνότητα 4,43361875 MHz της φέρουσας του χρώματος είναι αποτέλεσμα των 283.75 κύκλων του ρολογιού χρώματος ανά γραμμή (colour clock cycles per line) συν μια μετατόπιση των 25 Hz για αποφυγή παρεμβολών. Δεδομένου ότι η συχνότητα γραμμής (number of lines per second) είναι 15625 Hz (625 γραμμές \times 50 Hz \div 2), η συχνότητα της φέρουσας του χρώματος μπορεί να υπολογιστεί και ως εξής:

$$4,43361875 \text{ MHz} = 283,75 \times 15625 \text{ Hz} + 25 \text{ Hz}$$

Για το σύστημα PAL ισχύει (βλ. διπλανό σχήμα):

$$\begin{aligned} f_{\Phi\Phi} &= f_{\kappa\alpha\nu} + 1,25 \text{ MHz} \\ f_{\Phi X} &= f_{\Phi\Phi} + 4,43 \text{ MHz} \\ f_{\Phi H} &= f_{\Phi\Phi} + 6,0 \text{ MHz} \end{aligned}$$



Φάσμα έγχρωμου τηλεοπτικού σήματος NTSC, PAL και SECAM

Διαμόρφωση έγχρωμου τηλεοπτικού σήματος – διαμόρφωση χρώματος

Ας δούμε λίγο πιο προσεκτικά την περίπτωση του PAL, όπου διαμορφώνονται τα δύο σήματα που αποτελούν το χρώμα, τα οποία ας συμβολίσουμε $u(t)$ και $v(t)$, όπου t ο χρόνος (ως ανεξάρτητη μεταβλητή). Η διαμόρφωση των δύο αυτών σημάτων $u(t)$ και $v(t)$ κατά QAM στη συχνότητα της φέρουσας του χρώματος ($f_{\Phi X}$) γίνεται με χρήση της επόμενης σχέσης:

$$u(t) \cos(2\pi f_{\Phi X} t) + v(t) \cos(2\pi f_{\Phi X} t + \pi / 2) \quad (6)$$

- Παρατηρούμε ότι στη διαμόρφωση του $v(t)$ εισάγεται η διαφορά φάσης $\pi/2$. Κατά την αποκωδικοποίηση, το λαμβανόμενο σήμα πολλαπλασιάζεται με το φέρον με τις δύο τιμές της φάσης (0 και $\pi/2$) ώστε σε κάθε μια από τις περιπτώσεις να προκύψει το ένα από τα αρχικά σήματα.
 - Συγκεκριμένα:

$$(u(t) \cos(2\pi f_{\Phi X} t) + v(t) \cos(2\pi f_{\Phi X} t + \pi / 2)) \cos(2\pi f_{\Phi X} t) \quad (7)$$

$$u(t) \cos(2\pi f_{\Phi X} t) + v(t) \cos\left(2\pi f_{\Phi X} t + \frac{\pi}{2}\right) \left(\cos\left(2\pi f_{\Phi X} t + \frac{\pi}{2}\right)\right) \quad (8)$$

Διαμόρφωση έγχρωμου τηλεοπτικού σήματος – διαμόρφωση χρώματος

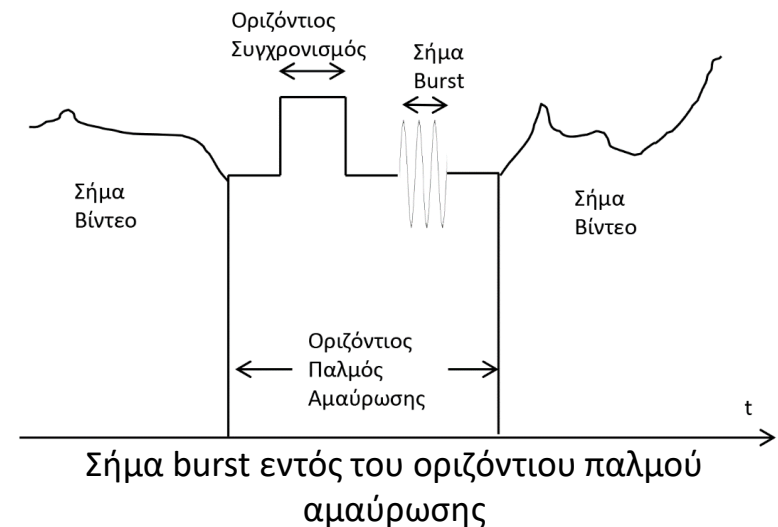
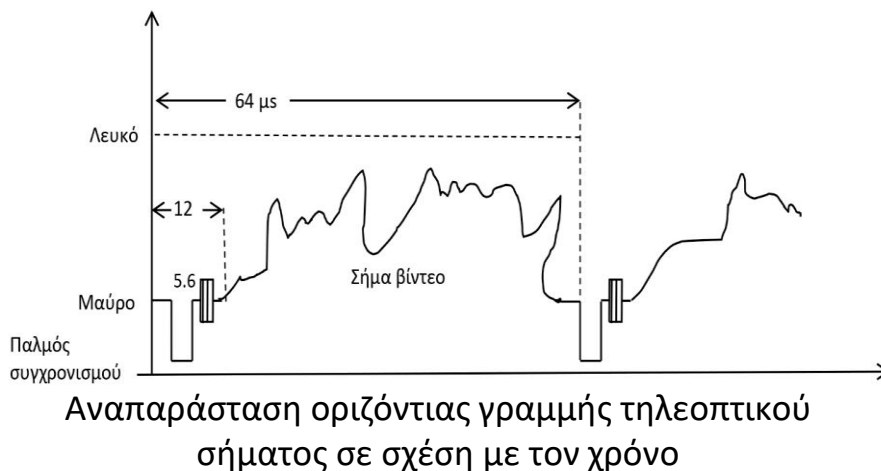
Κάνοντας τις απαραίτητες πράξεις από την πρώτη εξίσωση προκύπτει το σήμα $u(t)$, με το πλάτος υποβαθμισμένο κατά το ήμισυ και από τη δεύτερη εξίσωση προκύπτει το $v(t)$ με αντίστοιχο υποδιπλασιασμό του πλάτους. Και στις δύο περιπτώσεις το άλλο σήμα προκύπτει ως γινόμενο με σήμα συχνότητας διπλάσιας της $f_{\phi\chi}$ οπότε αφαιρείται από το σχετικό φιλτράρισμα.

- Η διαμόρφωση QAM απαιτεί **ισχυρό συγχρονισμό**, ώστε να αποτραπεί η παρουσία διαφωνίας (crosstalk). Η αποδιαμόρφωση πρέπει να είναι **ομόδυνη**, δηλαδή ο ταλαντωτής στον δέκτη πρέπει να είναι στην ίδια συχνότητα και φάση με το φέρον του χρώματος.

Διαμόρφωση έγχρωμου τηλεοπτικού σήματος – σήμα *Burst*

Επειδή καταπνίγεται η χρωμοφέρουσα (διαμόρφωση Suppressed Carrier) δεν μεταφέρεται κάποια πληροφορία για τη συχνότητα και τη φάση αυτής. Όμως, η πληροφορία της χρωμοφέρουσας **είναι απαραίτητη στον δέκτη** ώστε να αποφευχθεί η διαφορά φάσης και ακόμη πιο σημαντικά η διαφορά στη συχνότητα.

- Για τον σκοπό αυτόν, ένα δείγμα της χρωμοφέρουσας μεταφέρεται προς τον δέκτη, μέσω του οπίσθιου οριζόντιου παλμού αμαύρωσης (HBI) προκειμένου να έχουμε συμφασική ταλάντωση στον δέκτη. Αυτό το δείγμα ονομάζεται σήμα **burst**, το οποίο επιτρέπει τον συγχρονισμό του ταλαντωτή χρώματος.



Διαμόρφωση έγχρωμου τηλεοπτικού σήματος – σήμα *Burst*

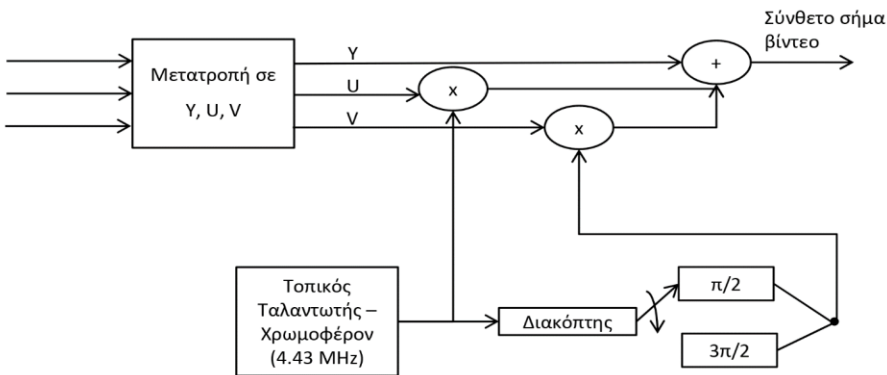
Σφάλματα μπορεί να υπάρχουν λόγω παραμόρφωσης που εισάγει το σύστημα εκπομπής και μετάδοσης.

Στο NTSC τα σφάλματα φάσης μεταξύ ταλαντωτή χρώματος πομπού και δέκτη επηρεάζουν τη **χροιά** του εκπεμπόμενου χρώματος.

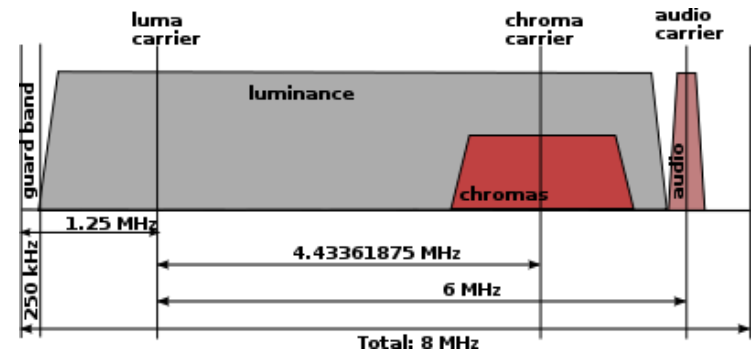
Το σύστημα PAL (Phase Alternation per Line) το οποίο έχει προκύψει ως βελτίωση του NTSC για την αντιμετώπιση φασικών σφαλμάτων. Έστω ότι εισάγεται φασικό σφάλμα α , λόγω του ανωτέρω μηχανισμού του PAL:

- στη μια γραμμή έχουμε θετικό σφάλμα, στην άλλη αρνητικό
- στη μια γραμμή μεγαλώνει τη γωνία, στην άλλη την ελαττώνει

Το αποτέλεσμα της άθροισης στον δέκτη δίνει περίπου την αρχική φάση, ενώ το μέτρο διαφοροποιείται και αυτό επηρεάζει τον **κορεσμό**, ο οποίος όμως δεν είναι τόσο σημαντικός όσο η χροιά.



Βαθμίδες συστήματος PAL



Φάσμα έγχρωμου τηλεοπτικού σήματος PAL (8MHz)

Διαμόρφωση έγχρωμου τηλεοπτικού σήματος – φονέας χρώματος

Όταν γίνεται λήψη ενός ασπρόμαυρου τηλεοπτικού προγράμματος από έγχρωμο δέκτη, στην οθόνη μπορεί να εμφανίζονται στίγματα τυχαίων αποχρώσεων. Αυτό οφείλεται στο ότι ο αποκωδικοποιητής δέχεται ισχύ στις συχνότητες του σήματος φωτεινότητας γύρω από τα 4.43 MHz. Αυτό σημαίνει ότι αυτές λαμβάνονται ως χρωματική πληροφορία.

- Η **βαθμίδα του φονέα χρωμάτων** απομονώνει τον ενισχυτή χρωματοφόρου, όταν το πρόγραμμα είναι ασπρόμαυρο. Ο φονέας χρώματος ενεργοποιείται μόλις γίνει αντιληπτό ότι απουσιάζει το σήμα χρώματος. Ο εντοπισμός της παρουσίας / απουσίας του σήματος χρώματος γίνεται με τον εντοπισμό **του προαναφερθέντος σήματος burst** (στον παλμό οριζόντιας αμαύρωσης).

Ψηφιακή διαμόρφωση

Αντιστοίχιση ροής σε σύμβολα

Όπως είδαμε στην Ενότητα 6 (Κωδικοποίηση καναλιού), τα βήματα που προηγούνται της ψηφιακής διαμόρφωσης είναι η εξωτερική και η εσωτερική κωδικοποίηση και διεμπλοκή (outer και inner coding και interleaving αντίστοιχα). Η κωδικοποίηση προσθέτει πλεονάζουσα πληροφορία για τον εντοπισμό και τη διόρθωση σφαλμάτων, ενώ η διεμπλοκή χρησιμοποιείται για την αντιμετάθεση των bits ώστε να γίνει πιο αποτελεσματική η αντιμετώπιση συνεχόμενων σφαλμάτων (ριπών, δηλαδή, θορύβου).

Στην ψηφιακή διαμόρφωση **το προς διαμόρφωση σήμα** (δηλαδή το σήμα πληροφορίας) είναι **ψηφιακό**, αποτελείται δηλαδή από ακολουθίες 0 και 1. Για να αντιστοιχιστεί η ακολουθία αυτή στον διαμορφωτή απαιτείται ένας αντιστοιχιστής (**mapper**) συμβόλων σε bits. Μετά την αντιστοίχιση αυτή η ψηφιακή ακολουθία γίνεται συνεχές σήμα.

Ο ψηφιακός διαμορφωτής είναι σε άμεση συνεργασία με τη βαθμίδα της εσωτερικής διεμπλοκής.

Αντιστοίχιση ροής σε σύμβολα

Στην περίπτωση της ψηφιακής διαμόρφωσης είναι δυνατόν να έχουμε διαφορετικά είδη διαμόρφωσης, τα οποία εξαρτώνται από το **πλήθος των bits** που θέλουμε να αντιστοιχίσουμε **σε κάθε σύμβολο**. Στο πρότυπο DVB-T χρησιμοποιείται κυρίως η διαμόρφωση Φάσης ή η ο συνδυασμός διαμόρφωσης Πλάτους και Φάσης. Ενώ η πρώτη επιτρέπει το γκρουπάρισμα των bits (symbols) ώστε να διαμορφώνεται μόνο η φάση του φέροντος σήματος, η δεύτερη διαμόρφωση και το πλάτος και η φάση της φέρουσας διαμορφώνεται από ένα γκρουπ από bits (symbols) τα οποία πρόκειται να μεταδοθούν.

$$S(t) = A(t) \cos(2\pi f_c t + \varphi(t))$$

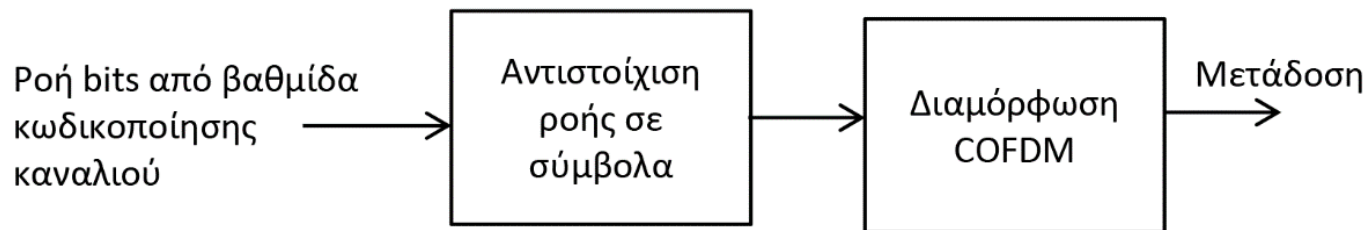
Συγκεκριμένα, έχουμε τις εξής πιο συνηθισμένες περιπτώσεις:

- Ένα bit (άρα δύο δυνατοί συνδυασμοί) ανά σύμβολο οπότε η διαμόρφωση είναι η **BPSK** (Binary Phase Shift Keying)
- Δύο bits (άρα τέσσερις δυνατοί συνδυασμοί) ανά σύμβολο, οπότε η διαμόρφωση είναι η **QPSK** (Quadrature Phase Shift Keying) ή ισοδύναμα 4-QAM (4 – Quadrature Amplitude Modulation).
- Τέσσερα bits (άρα δεκαέξι δυνατοί συνδυασμοί) ανά σύμβολο, οπότε η διαμόρφωση είναι η **16-QAM** (16 – Quadrature Phase Shift Keying).
- Έξι bits (άρα εξήντα τέσσερις δυνατοί συνδυασμοί) ανά σύμβολο, οπότε η διαμόρφωση είναι η **64-QAM** (64 – Quadrature Phase Shift Keying).
- Οκτώ bits (άρα εκατό είκοσι οκτώ δυνατοί συνδυασμοί) ανά σύμβολο, οπότε η διαμόρφωση είναι η **256-QAM** (256 – Quadrature Phase Shift Keying).

Αντιστοίχιση ροής σε σύμβολα

Ο τύπος της διαμόρφωσης προκύπτει από το πλήθος των συμβόλων, το οποίο, βέβαια, συνδέεται με το πλήθος των bits που αντιστοιχούν σε κάθε σύμβολο. Οι βασικές βαθμίδες του συστήματος διαμόρφωσης παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.

Το πρώτο βήμα της διαμόρφωσης είναι η **ομαδοποίηση των δεδομένων** ώστε να δημιουργηθούν τα διαμορφωμένα σύμβολα, **στο μιγαδικό επίπεδο**. Τα σύμβολα αυτά αντιστοιχούν σε μιγαδικούς αριθμούς, το σύνολο των οποίων (μαζί με τις απεικονήσεις τους στο μιγαδικό επίπεδο) δημιουργεί το διάγραμμα αστερισμού (**constellation diagram**).



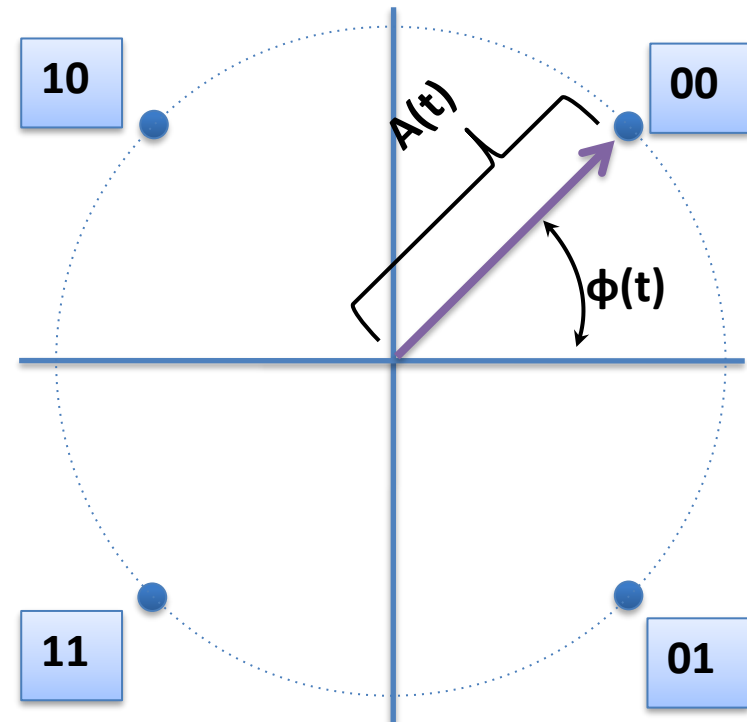
Βαθμίδες ψηφιακής διαμόρφωσης στο πρότυπο DVB-T

Αντιστοίχιση ροής σε σύμβολα

Αναπαριστάμε την διαδικασία της διαμόρφωσης σε Καρτεσιανό διάγραμμα, όπου κάθε σύμβολο (το οποίο αναπαριστά/μεταφράζεται σε τιμές φάσης και πλάτους) αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο σημείο.

$$S(t) = \mathbf{A}(t) \cos(2\pi f_c t + \varphi(t))$$

Το διάγραμμα αυτό είναι γνωστό ως **I-Q diagram**, ή διάγραμμα αστερισμού. Το πλάτος και η φάση της φέρουσας αναπαρίσταται από ένα διάνυσμα (“**phasor**”) που αρχικοποιείται από την αρχή των αξόνων.



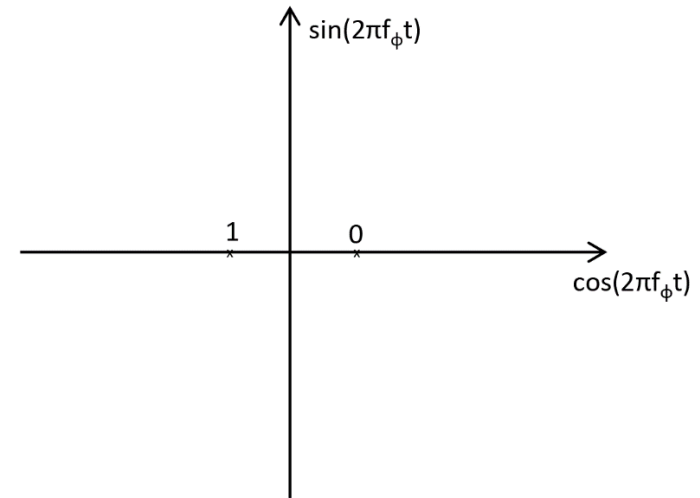
Αντιστοίχιση ροής σε σύμβολα

Το πλήθος των συμβόλων για κάθε διάγραμμα εξαρτάται από το πλήθος των bits (2 στην περίπτωση του BPSK, 4 για την QPSK, 16 σύμβολα στη 16-QAM, κ.ο.κ.). Το διάγραμμα αστερισμού για την αντιστοίχιση BPSK απεικονίζεται στο διπλανό σχήμα, όπου οι άξονες αντιστοιχούν ο μεν **οριζόντιος στο φέρον**, ο δε κατακόρυφος στο φέρον με διαφορά φάσης $\pi/2$ (όπως κατ' αντιστοιχία είχε συμβεί με την QAM στην αναλογική μετάδοση).

Παρατηρούμε την ύπαρξη δύο συμβόλων, στον οριζόντιο άξονα.

- το σύμβολο «0» αντιστοιχεί στο φέρον,
- το σύμβολο «1» αντιστοιχεί στο φέρον με διαφορά φάσης π .

Η BPSK είναι διαμόρφωση φάσης (αφού δεν υπάρχει κάποια διαφοροποίηση στο πλάτος των συμβόλων).



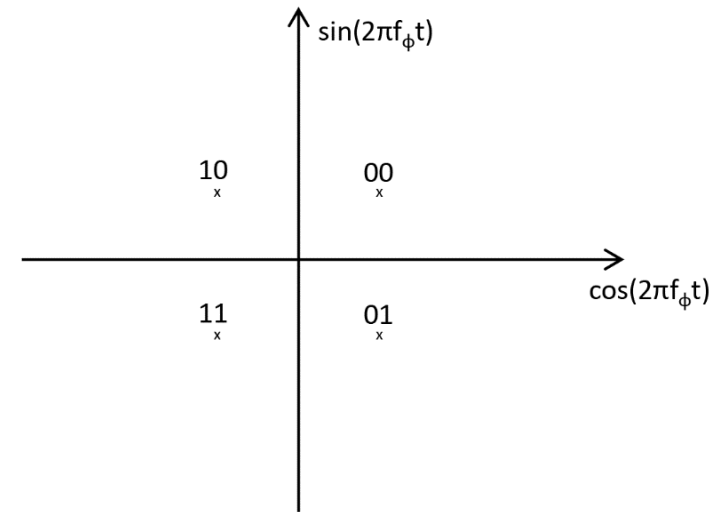
Διάγραμμα αστερισμού για BPSK

Αντιστοίχιση ροής σε σύμβολα

Στην περίπτωση του QPSK (ή 4-QAM), έχουμε 2 bits άρα 4 σύμβολα (00, 01, 10 και 11) τα οποία διατάσσονται όπως στο διπλανό σχήμα.

Παρατηρούμε ότι η διάταξη είναι τέτοια ώστε συνεχόμενα σύμβολα να διαφέρουν κατά ένα μόνο bit.

Και στο QPSK η διαφοροποίηση μεταξύ των συμβόλων αφορά τη φάση ($\pi/4$, $3\pi/4$, $5\pi/4$ και $7\pi/4$).



Διάγραμμα αστερισμού για QPSK

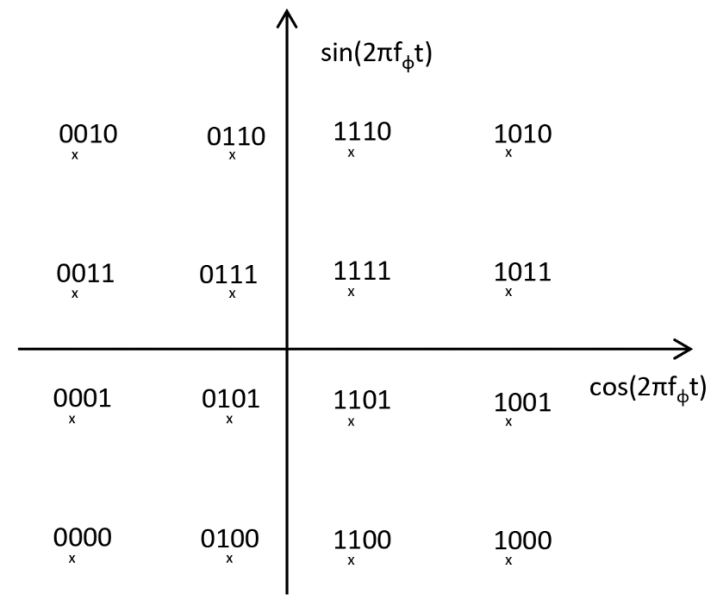
Αντιστοίχιση ροής σε σύμβολα

Στην περίπτωση του 16-QAM, έχουμε 4 bits άρα 16 σύμβολα τα οποία διατάσσονται όπως στο διπλανό σχήμα.

Παρατηρούμε ότι η διάταξη είναι τέτοια ώστε γειτονικά σύμβολα να διαφέρουν κατά ένα μόνο bit.

Στην περίπτωση του διαγράμματος αστερισμού για το 16-QAM (όπως και για τις επόμενες αντιστοιχίσεις, 64-QAM, 256-QAM κ.λπ.) οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των συμβόλων **αφορούν όχι μόνο στην φάση αλλά και στο πλάτος.**

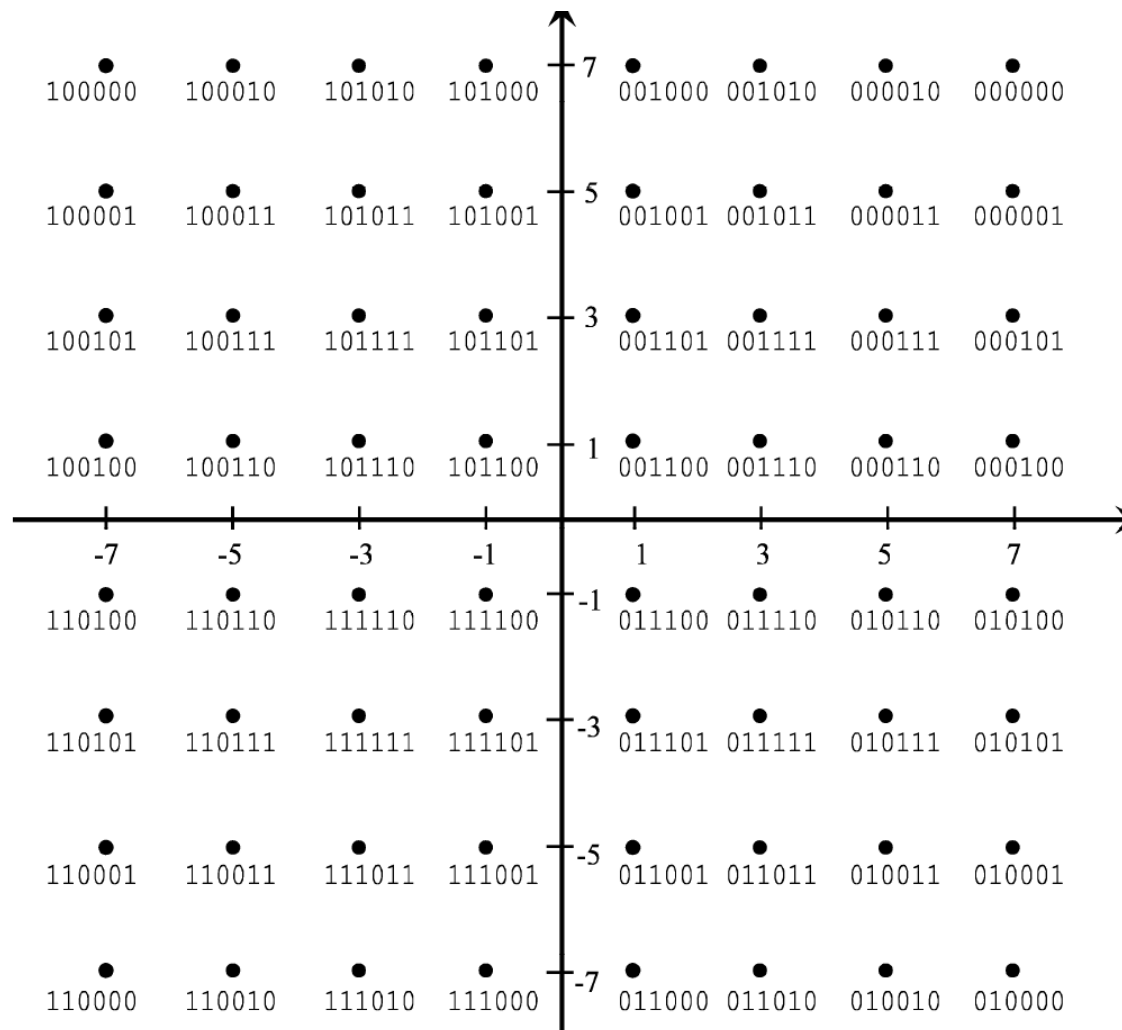
Αυτό σημαίνει ότι ανάλογα με το σύμβολο το οποίο αντιστοιχίζεται αλλάζει η φάση και το πλάτος του φέροντος.



Διάγραμμα αστερισμού για 16-QAM

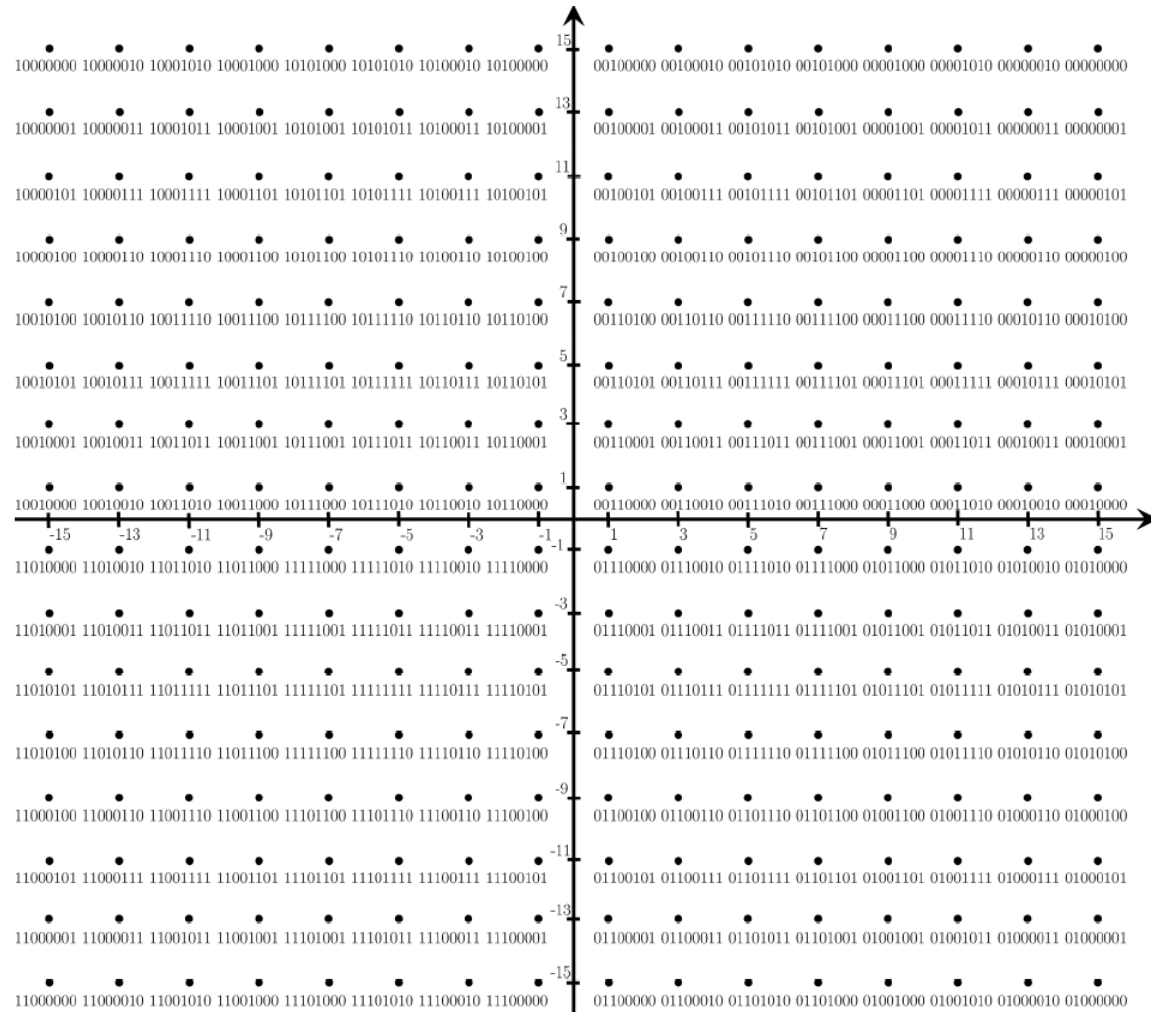
Αντιστοίχιση ροής σε σύμβολα

64-QAM
(6 bits/symbol)



Αντιστοίχιση ροής σε σύμβολα

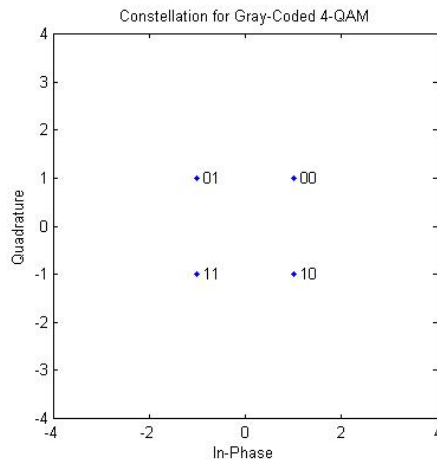
256-QAM
(8 bits/symbol)
Applied only in
DVB-T2



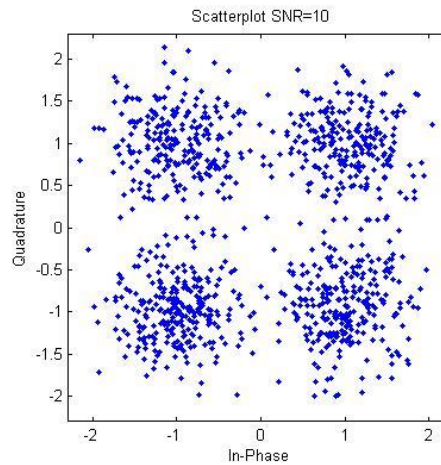
Αντιστοίχιση ροής σε σύμβολα

Περισσότερα bits/symbol συνεπάγεται μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Όσο υψηλότερη η τάξη διαμόρφωσης (modulation order), τόσο περισσότερα bit χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση ενός συμβόλου. Δεδομένου ότι ο αριθμός των συμβόλων που μεταδίδονται ανά δευτερόλεπτο είναι σταθερός, **αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης bit που μπορεί να μεταδοθεί.**

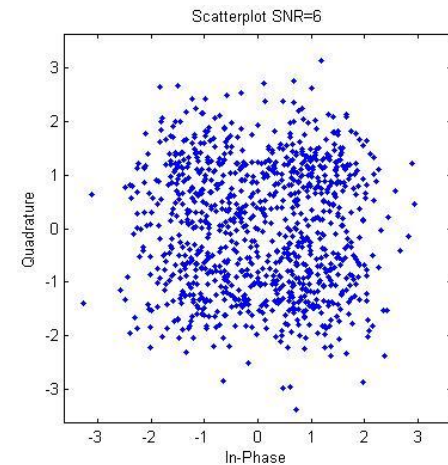
- Όμως, περισσότερα bits/symbol συνεπάγεται και μεγαλύτερη ευαισθησία σε περιβάλλον θορύβου. Η μείωση, π.χ. του SNR (λόγος σήματος προς θόρυβο) έχει ως αποτέλεσμα τυχαίες αλλαγές τόσο στη φάση όσο και στο πλάτος του σήματος. Για αυτόν τον λόγο, τα σημεία στο διάγραμμα αστερισμού αποκλίνουν από την αρχική τους θέση. Κάθε είδους διαμόρφωση έχει διαφορετική συμπεριφορά/επίδοση σε περιβάλλον θορύβου, με τις **μεγαλύτερης τάξης διαμορφώσεις να απαιτούν και υψηλότερο SNR** προκειμένου ο δέκτης να μπορεί να λάβει τα δεδομένα σωστά.



QPSK (Tx)



QPSK (Rx)
SNR = 10dB



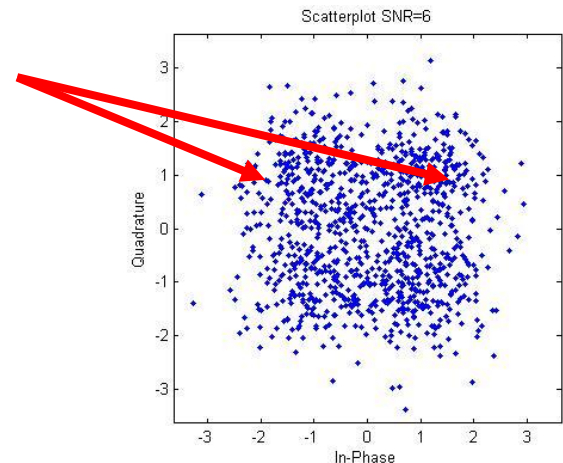
QPSK (Rx)
SNR = 6dB

Αντιστοίχιση ροής σε σύμβολα

Όσο μεγαλύτερη είναι η τάξη της διαμόρφωσης, τόσο **αυξάνεται ο αριθμός των bits που αντιπροσωπεύει κάθε σύμβολο**. Επειδή ο αριθμός των συμβόλων που εκπέμπονται ανά δευτερόλεπτο είναι σταθερός, **αυξάνεται το bit rate** που μπορεί να σταλεί.

- Όμως, όσο μεγαλύτερη είναι η τάξη της διαμόρφωσης, τόσο **πιο κοντά μεταξύ τους είναι τα σημεία του σηματοστερισμού**. Έτσι, υπάρχει μεγαλύτερος κίνδυνος σε περίπτωση χαμηλού SNR **ένα σύμβολο να ληφθεί λανθασμένα ως κάποιο «γειτονικό» του**. Έτσι, συμβαίνει λάθος το οποίο καλείται να διορθώσει η κωδικοποίηση καναλιού.
- Αυτό σημαίνει ότι **σήμα που εκπέμπεται με διαμόρφωση υψηλότερης τάξης απαιτεί υψηλότερο SNR στο δέκτη για να ληφθεί σωστά**.

Π.χ. Ένα «00» μπορεί να ληφθεί λανθασμένα ως «01»



Σχέση μεταξύ χωρητικότητας καναλιού και ανθεκτικότητας σε θόρυβο

Με βάση τα προηγούμενα, υπάρχουν 2 κύριες παράμετροι που καθορίζουν τη χωρητικότητα του συστήματος / καναλιού (από την άποψη του ρυθμού bit) και την ανθεκτικότητα σε σφάλματα:

- **Ρυθμός κώδικα κατά την κωδικοποίηση καναλιού.**
 - Χαμηλός ρυθμός κώδικα (low code rate, δηλ. πολλά πλεονάζοντα bit) συνεπάγεται ότι το σήμα μπορεί να ληφθεί σωστά, ακόμη και σε περιβάλλοντα χαμηλού SNR.
 - Υψηλός ρυθμός κώδικα (δηλαδή λίγα πλεονάζοντα Bits) συνεπάγεται υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων, άρα αυξημένη χωρητικότητα καναλιού.
- **Τύπος και τάξη διαμόρφωσης.**
 - Χαμηλής τάξης διαμόρφωση (π.χ. QPSK) συνεπάγεται ότι το σήμα που μπορεί να ληφθεί σωστά, ακόμη και σε χαμηλό SNR.
 - Υψηλής τάξης διαμόρφωση (π.χ. 256-QAM), συνεπάγεται υψηλό ωφέλιμο ρυθμός μετάδοσης, άρα αυξημένη χωρητικότητα καναλιού.

Ο συνδυασμός τύπου διαμόρφωσης και ρυθμού κώδικα - που επιλέγουμε από την πλευρά του πομπού - ονομάζεται σχήμα μετάδοσης (**transmission scheme**), το οποίο ορίζει i) **τον χρήσιμο ρυθμό bitrate** (δηλαδή το μέγιστο ρυθμό του MPEG-2 Transport Stream) και ii) **το ελάχιστο SNR** που απαιτείται στην πλευρά του δέκτη έτσι ώστε το σήμα να μπορεί να ληφθεί σωστά (δηλαδή για να μην υπερβαίνει την ικανότητα του Κωδικοποιητή καναλιού κατά τη διόρθωση σφάλματος).

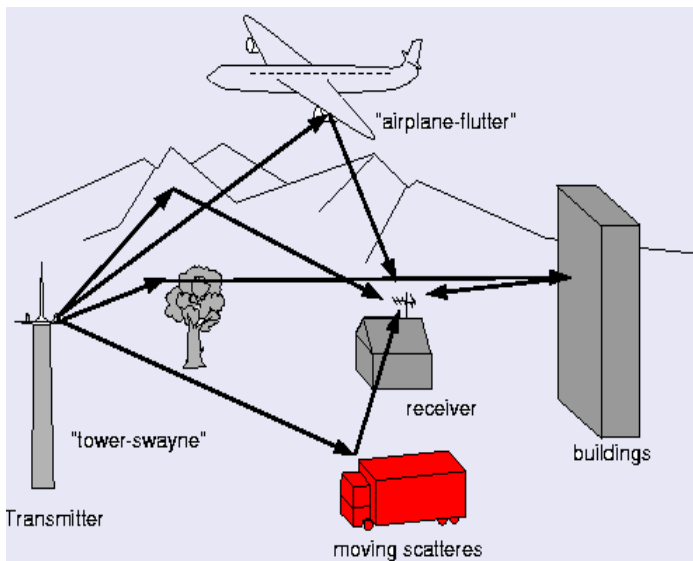
Σχήματα μετάδοσης στο DVB-T

Modulation	Code Rate	Useful bitrate (Mbits/s)	Minimum SNR required at the receiver (dB)
QPSK	1/2	5,53	3,1
QPSK	2/3	7,37	4,9
QPSK	3/4	8,29	5,9
QPSK	5/6	9,22	6,9
QPSK	7/8	9,68	7,7
16-QAM	1/2	11,06	8,8
16-QAM	2/3	14,75	11,1
16-QAM	3/4	16,59	12,5
16-QAM	5/6	18,43	13,5
16-QAM	7/8	19,35	13,9
64-QAM	1/2	16,59	14,4
64-QAM	2/3	22,12	16,5
64-QAM	3/4	24,88	18,0
64-QAM	5/6	27,65	19,3
64-QAM	7/8	29,03	20,1

Values for a DVB-T signal in an 8MHz channel, Guard Interval = 1/8

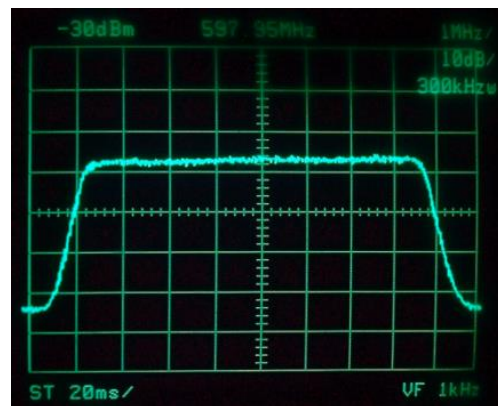
Διαμόρφωση COFDM

Ορθογώνια πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας



Στην επίγεια ψηφιακή λήψη έχουμε έντονο το περιβάλλον της **πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath)** δηλαδή της άφιξης στον δέκτη πολλαπλών αντιγράφων του σήματος λόγω ανακλάσεων.

Η πολυδιαδρομική διάδοση προκαλεί διαφορετική εξασθένηση σε διαφορετικές συχνότητες («συχνοεπιλεκτικές διαλείψεις» - frequency selective fading), κάτι που οδηγεί σε «παραμόρφωση» του φάσματος του σήματος



Φάσμα σήματος DVB-T που εκπέμπεται (BW=8MHz)



Φάσμα σήματος DVB-T που λαμβάνεται με συχνοεπιλεκτικές διαλείψεις λόγω multipath

Ορθογώνια πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας

Για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο αυτό χρησιμοποιείται στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση η τεχνική της **Ορθογώνιας Πολυπλεξίας Διαίρεσης Συχνότητας – Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)**. Το OFDM χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στην πράξη στο DVB-T και σήμερα χρησιμοποιείται σε όλα τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα (π.χ. WiFi, WiMAX, κινητά 4ης γενιάς κλπ) αλλά και ενσύρματα συστήματα (π.χ. στο DSL).

Σύμφωνα με το πρότυπο DVB-T, η επίγεια ψηφιακή τηλεόραση χρησιμοποιεί για τη μετάδοση του σήματος την κωδικοποιημένη ορθογώνια πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (**Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing, COFDM**). Το πλεονέκτημα του COFDM είναι η αντοχή στον θόρυβο που προκύπτει λόγω πολλαπλών διαδρομών (**multipath**), επειδή χρησιμοποιεί πολλαπλά φέροντα για να διαβιβάσει το σήμα.

Συγκεκριμένα, το COFDM αναθέτει την πληροφορία από ένα ενιαίο ψηφιακό σήμα σε πολλαπλά φέροντα που λειτουργούν ταυτόχρονα. Για να μην παρεμποδίζει το ένα φέρον το άλλο (**interference**), αποστέλλονται **ορθογώνια** μεταξύ τους.

- Δυο χρονικές συναρτήσεις είναι ορθογώνιες (έχουν δηλαδή διαφορά 90°) όταν το **άθροισμα των γινομένων τους** (για την ακρίβεια, το ορισμένο ολοκλήρωμα του γινομένου τους) **είναι μηδέν**. Στα ορθογώνια σήματα δεν έχουμε παρεμβολή μεταξύ των σημάτων. Η ορθογωνιότητα, δηλαδή, έχει να κάνει με παραστάσεις της μορφής

$$\int_a^b f(x)g(x)dx = 0$$

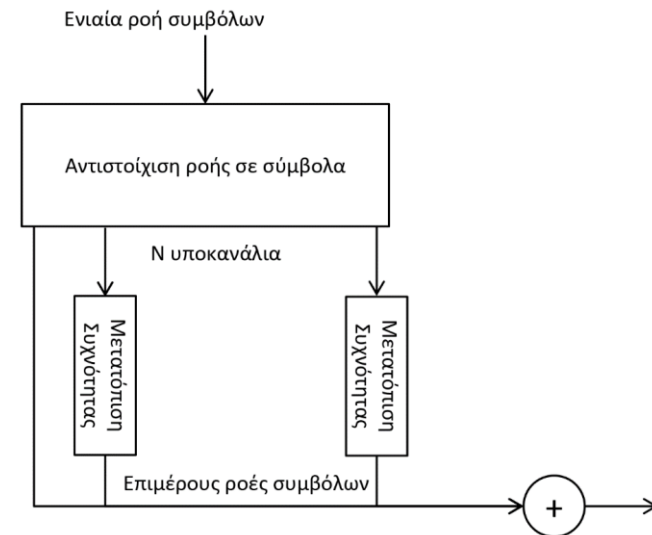
Ορθογώνια πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας

Η βασική, ιδέα της ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας είναι ο διαχωρισμός του καναλιού σε πολλά επιμέρους υποκανάλια.

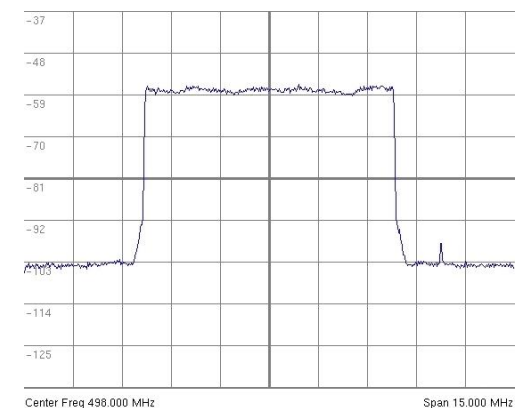
- Τα υποκανάλια αυτά ανήκουν στο φάσμα ενός συγκεκριμένου καναλιού (π.χ. ενός καναλιού των 8 MHz στην μπάντα των UHF).
- Το σήμα αυτών των υποκαναλιών πολυπλέκεται με διαίρεση συχνότητας (FDM), εντός του εύρους ζώνης του βασικού καναλιού.

Μια υλοποίηση του OFDM παρίσταται στο διπλανό επάνω σχήμα, με τη χρήση N υποκαναλιών όπου παρουσιάζονται οι βασικές βαθμίδες στο διάγραμμα ενός διαμορφωτή N υποκαναλιών.

Η κάτω εικόνα παρουσιάζει προσεγγιστικά την ισχύ του φάσματος του σήματος OFDM.



Διαχωρισμός ενιαίας ροής συμβόλων σε επιμέρους ροές του OFDM

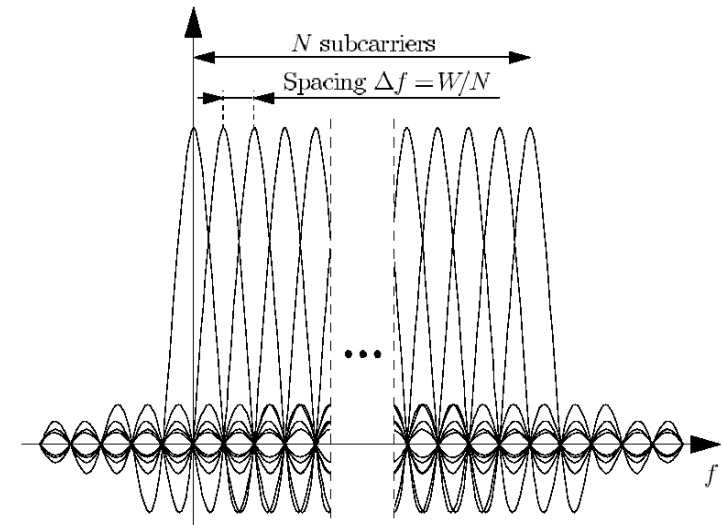


Ισχύς φάσματος καναλιού OFDM

Ορθογώνια πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας

Το σήμα OFDM επιτρέπει μια πιο ομαλή κατανομή της ισχύος κατά μήκος του εύρους ζώνης του καναλιού και έχει πιο απότομη πτώση της ισχύος στα άκρα του καναλιού, γεγονός που μειώνει τις απαιτήσεις στη σχεδίαση των φίλτρων που εμπλέκονται.

- Η παρεμβολή (interference) με άλλα σήματα περιορίζεται αφού ελαχιστοποιείται το επίπεδο του σήματος εκτός του καναλιού χωρίς την ανάγκη πολύπλοκου φιλτραρίσματος.
- Η βασική απαίτηση για το OFDM έχει να κάνει με τον συγχρονισμό των υποκαναλιών ώστε η εκ νέου πολυπλεξία στον αποκωδικοποιητή να είναι δυνατή και να δημιουργηθεί η αρχική ροή δεδομένων (bitstream).
- Τα φέροντα στα οποία βασίζεται η διαμόρφωση πρέπει να είναι ορθογώνια μεταξύ τους, ώστε να επιτευχθεί μεγάλη απόδοση στη χρήση του φάσματος.



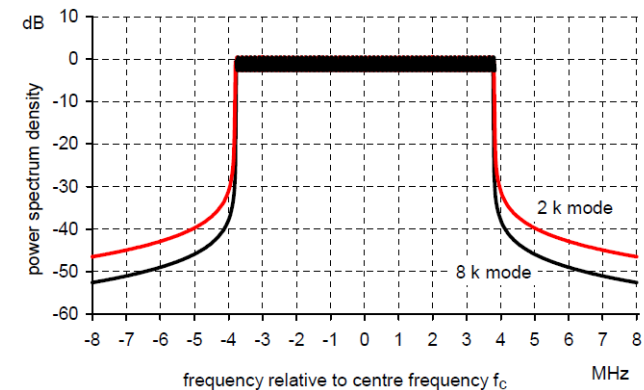
Η υψηλή απόδοση στη χρήση του φάσματος είναι ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του OFDM αφού το σήμα είναι πιο ομοιόμορφα καταμετρημένο σε όλο το εύρος ζώνης από ό,τι θα ήταν μια απλή ροή δεδομένων. Το OFDM παρέχει καλύτερη προστασία στις παρεμβολές. Επίσης, οποιαδήποτε φαινόμενα σχετίζονται με ένα από τα φέροντα δεν είναι σε θέση να επηρεάζουν τα άλλα φέροντα λόγω του γεγονότος ότι είναι ορθογώνια μεταξύ τους.

Τρόποι Λειτουργίας – πλήθος φερόντων

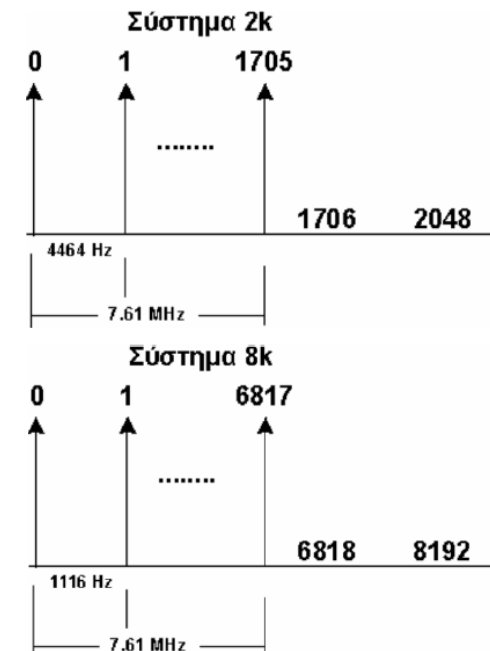
Μπορούμε εδώ να αναφέρουμε την χρήση του αντίστροφου γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (IFFT) κατά την εκπομπή, η οποία είναι και η αιτία της επιτυχημένης υλοποίησης του συστήματος στη πράξη. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μια σειρά από σύμβολα που θέλουμε να μεταδώσουμε. Αυτά τα σύμβολα, αντιμετωπίζονται σαν «σημεία» στο πεδίο της συχνότητας ενός σήματος και ομαδοποιούνται σε N ομάδες N συμβόλων, όπου η κάθε ομάδα, αποκαλείται «υπερσύμβολο», οπότε πλέον μπορεί να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος IFFT. **Ο αριθμός των φερουσών που πρόκειται να μεταδοθούν, αντιστοιχούν με τον αριθμό των σημείων που επεξεργάζεται ο IFFT. Στη λήψη, δεν έχουμε παρά να εφαρμόσουμε τον ευθύ μετασχηματισμό Fourier (FFT), έτσι ώστε να πάρουμε την αλληλουχία των δεδομένων που μεταδόθηκαν. (Βλ. Παράρτημα για την χρήση του IFFT).**

Το σύστημα διαμόρφωσης κατά OFDM στο DVB έχει δύο τρόπους λειτουργίας, οι οποίοι είναι οι εξής:

- Ο τρόπος **2K** (2K mode), όπου υπάρχουν 2.048 φέροντα (φέρουσες συχνότητες) εντός του καναλιού, με σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, στον τρόπο 2K χρησιμοποιούνται 1.705 φέροντα για τη μετάδοση των δεδομένων. Από αυτά τα 1.705 φέροντα, σε κάθε σύμβολο του OFDM τα 193 χρησιμοποιούνται ως πιλότοι (pilots) και για τη σηματοδότηση, ενώ τα υπόλοιπα 1.512 για τη μετάδοση της χρήσιμης πληροφορίας.
- Ο τρόπος **8K** (8K mode), όπου υπάρχουν 8.192 φέροντα (φέρουσες συχνότητες) εντός του καναλιού, ομοίως με σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, στον τρόπο 8K, χρησιμοποιούνται 6.817 για τη μετάδοση των δεδομένων. Από αυτά τα 6.817 φέροντα, σε κάθε σύμβολο OFDM τα 769 χρησιμοποιούνται ως πιλότοι (για σηματοδότηση), αφήνοντας 6.048 ως χρήσιμα φέροντα.

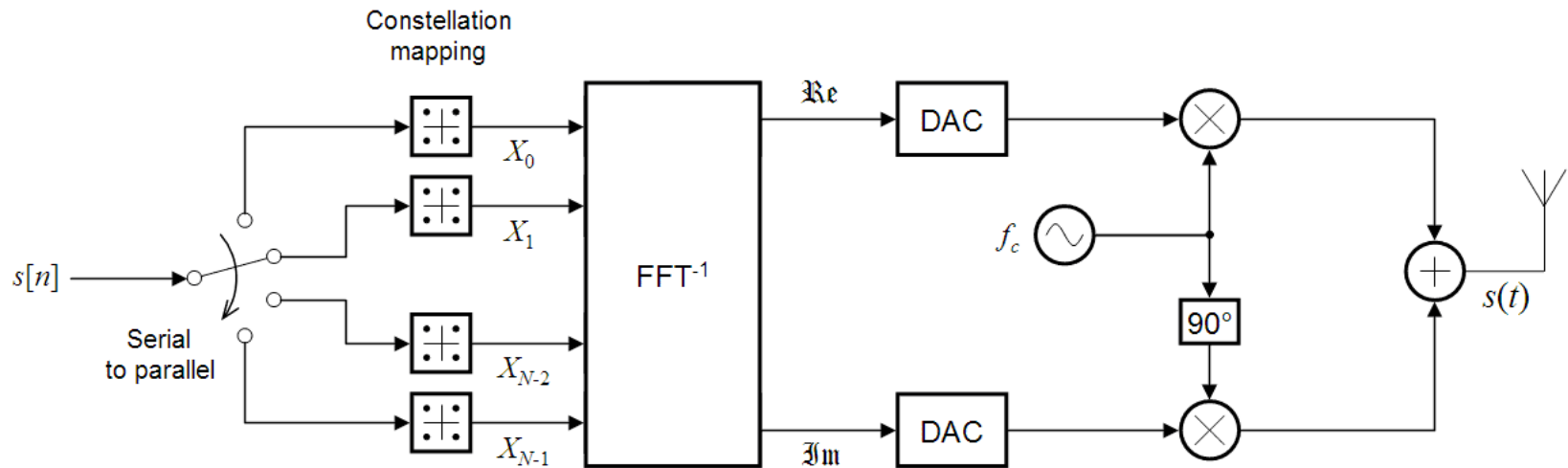


Φάσμα ενός σήματος DVB για 2K και 8K τρόπο λειτουργίας



Τρόποι λειτουργίας – πλήθος φερόντων

• Εκπομπή



Η ροή των δεδομένων (bit-stream) χωρίζεται σε N παράλληλες δευτερεύουσες ροές. Τα bit κάθε δευτερεύουσας ροής διαμορφώνονται χρησιμοποιώντας MPSK ή MQAM. Μετά τη διαμόρφωση, τα σύμβολα αντιστοιχίζονται (mapper) σε σημεία ενός αστερισμού σήματος (constellation diagram).

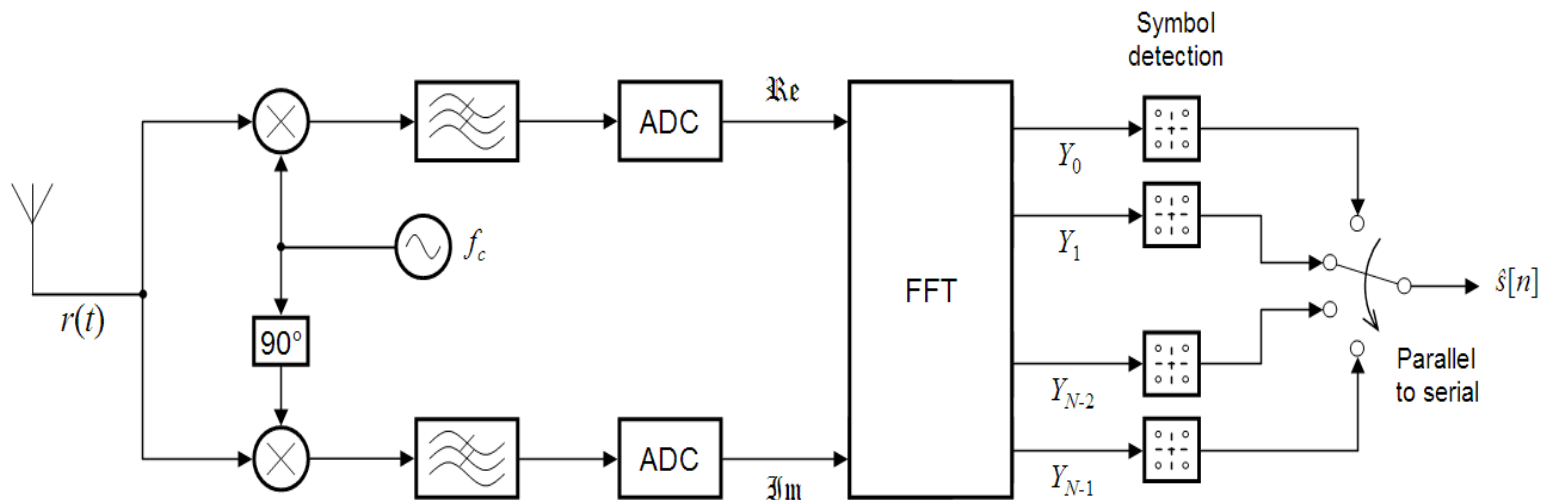
- Αυτά τα σημεία μπορούν να αναπαρασταθούν ως σύνθετοι αριθμοί που στη συνέχεια τροφοδοτούνται στη μονάδα που εκτελεί FFT^{-1} .

Το σήμα που προκύπτει

- μετατρέπεται από ψηφιακό σε αναλογικό (D/A)
- φέρεται στις συχνότητες RF
- τροφοδοτείται στην κεραία του πομπού

Τρόποι λειτουργίας – πλήθος φερόντων

- Λήψη



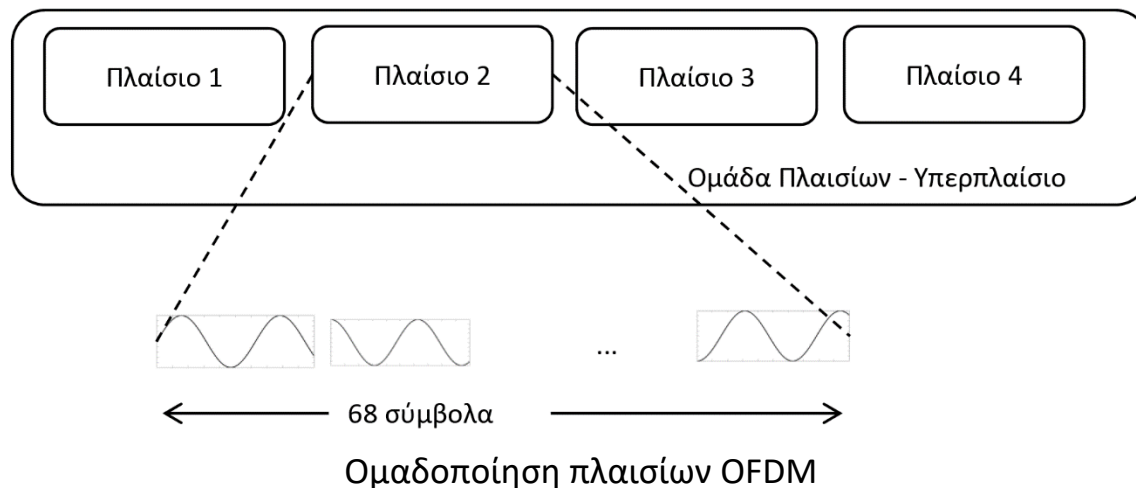
Στον δέκτη ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία

- Το σήμα υποβιβάζεται στη βασική ζώνη
- Μετατρέπεται από αναλογικό σε ψηφιακό (A/D)
- Εκτελείται ο FFT, δημιουργώντας τις εκτιμήσεις των μεταδιδόμενων συμβόλων
- Εκτελείται η μετατροπή των δεδομένων από παράλληλη σε σειριακή, με αποτέλεσμα την λήψη της εκτιμώμενης ροής δεδομένων (bit-stream)

Τρόποι λειτουργίας – σύμβολα

Κάθε ένα από τα φέροντα διαμορφώνονται κατά QPSK, 16-QAM, ή 64-QAM. Το σύνολο των συμβόλων (διαμορφωμένα Bits) που μεταδίδονται ταυτόχρονα σε όλα τα επιμέρους φέροντα αποτελούν το **OFDM Symbol** (σύμβολο OFDM), το οποίο αποτελείται είτε από 6 817 φέρουσες (8K mode) είτε από 1705 φέρουσες (2K mode) και μεταδίδεται σε χρόνο διάρκειας T_s . Το κάθε σύμβολο αποτελείται από το χρήσιμο μέρος (T_U) διάρκειας 896 μs ή 224 μs (8K ή 2K) και το διάστημα προστασίας (guard interval) διάρκειας Δ (βλ. επόμενες διαφάνειες για το Guard Interval).

- Τα OFDM symbols ομαδοποιούνται ανά 68, και δημιουργούν ένα **πλαίσιο OFDM (OFDM Frames)**, δηλαδή κάθε OFDM frame περιλαμβάνει **68 σύμβολα OFDM**.
- Τέσσερα OFDM frames ομαδοποιούνται περαιτέρω για να σχηματίσουν ένα υπερπλαίσιο (**OFDM superframe**), το οποίο περιλαμβάνει συνολικά **68x4=272 OFDM Symbols**. Η ομαδοποίηση αυτή απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Τρόποι λειτουργίας – σύμβολα

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των δύο τρόπων λειτουργίας, δηλαδή 8K και 2K.

- Παρατηρούμε ότι μεγαλύτερο πλήθος των φερόντων στον τρόπο 8K δημιουργεί την ανάγκη για **μεγαλύτερη διάρκεια συμβόλου**.

Η απόσταση συχνότητας μεταξύ των φερόντων με τον χαμηλότερο και τον υψηλότερο δείκτη είναι η ίδια και στις δύο περιπτώσεις και αποτελεί το φάσμα για ένα κανάλι 8 MHz (δηλ. 7.61 MHz).

Χαρακτηριστικά	Τρόπος 8K	Τρόπος 2K
Πλήθος φερόντων	6.817	1.705
Δείκτης χαμηλότερου φέροντος	0	0
Δείκτης υψηλότερου φέροντος	6816	1704
Διάρκεια συμβόλου T_u	896 μs	224 μs
Απόσταση συχνότητας μεταξύ των φερόντων ($1/T_u$)	1.116 Hz	4.464 Hz
Απόσταση συχνότητας μεταξύ των φερόντων με το χαμηλότερο και τον υψηλότερο δείκτη (για κανάλι 8 MHz)	7,61 MHz	7,61 MHz

Χαρακτηριστικά των δύο τρόπων 8K και 2K

The values for the various time-related parameters are given in multiples of the elementary period T and in microseconds. The elementary period T is 7/64 μs for 8 MHz channels, 1/8 μs for 7 MHz channels and 7/48 μs for 6MHz channels.

Διάστημα προστασίας – *guard interval*

Η επιλογή της απόστασης της συχνότητας των φερόντων (**carrier spacing**) από την οποία προκύπτει το εύρος ζώνης του καναλιού για τη ροή των συμβόλων που μεταδίδεται σε κάθε φέρον, γίνεται έτσι ώστε να είναι **το αντίστροφο της διάρκειας του συμβόλου OFDM** (έστω η διάρκεια συμβόλου T_U , τότε το carrier spacing θα είναι $1/T_U$).

- Αυτήν τη σχέση μπορούμε να την παρατηρήσουμε και από τις σχετικές γραμμές στον προηγούμενο πίνακα, συγκεκριμένα:

$$1116\text{Hz} = 1 / (896 * 10^{-6}\text{sec}) \quad (9)$$

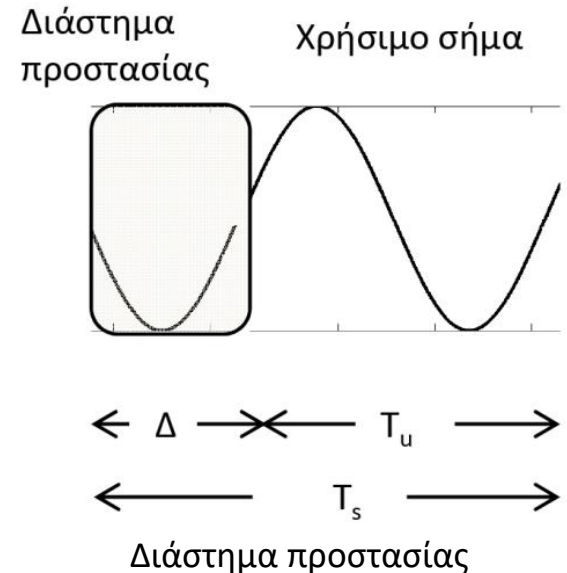
Επειδή όμως ενδέχεται να υπάρχει αλληλεπίδραση (παρεμβολή – intersymbol interference) μεταξύ των συμβόλων απαιτείται ένας τρόπος προστασίας για τον καλύτερο διαχωρισμό αυτών. Το ρόλο αυτό αναλαμβάνει το **διάστημα προστασίας (guard interval)**. Η σκοπιμότητα του διαστήματος προστασίας είναι **να μειώσει την επίδραση της παρεμβολής μεταξύ των συμβόλων**, αυξάνοντας τη (χρονική) απόσταση μεταξύ τους και επιτρέποντας κάποιο χρόνο ώστε να υποχωρήσει η απόκριση του καναλιού μεταξύ των χρονικών σημείων όπου

- α) στον διαμορφωτή αλλάζει η τιμή του μεταδιδόμενου συμβόλου, και
- β) ο αποδιαμορφωτής ξεκινάει να χρησιμοποιεί το λαμβανόμενο σήμα για την αποδιαμόρφωση αυτού.

Διάστημα προστασίας – *guard interval*

Το διάστημα προστασίας (guard interval) του DVB δημιουργείται αντιγράφοντας ένα μέρος του συμβόλου που πρόκειται να αποσταλεί και μεταδίδοντας αυτό το αντίγραφο ακριβώς πριν από το σύμβολο, όπως φαίνεται στην διπλανή εικόνα. Το μέγεθος του διαστήματος προστασίας καθορίζει ποιο ποσοστό του συμβόλου αντιγράφεται με αυτόν τον τρόπο, και οι τιμές του μπορούν να επιλεγούν μεταξύ των **1/4, 1/8, 1/16** ή **1/32** της περιόδου του συμβόλου OFDM (T_u).

Για τα κανάλια στα οποία το σήμα μεταδίδεται με χρήση πολλών παράλληλων μονοπατιών (multipath channels), το **διάστημα προστασίας παίζει σημαντικό ρόλο**, αφού χωρίς αυτό η μετάδοση μέσω πολλαπλών μονοπατιών οδηγεί σε παρεμβολή μεταξύ των λαμβανόμενων σημάτων.



Διάστημα προστασίας – *guard interval*

Η επιλογή του διαστήματος προστασίας **επηρεάζει τη διαθέσιμη χρήσιμη χωρητικότητα**. Ο παρακάτω πίνακας δείχνει πώς επηρεάζεται η **συνολική διάρκεια των συμβόλων OFDM (T_s)** με τους δύο τρόπους (2K και 8K), ανάλογα με τη σχέση που έχει το διάστημα προστασίας με την περίοδο για ένα κανάλι 8 MHz.

Σημείωση: T_s is the symbol duration; T_U is the inverse of the carrier spacing; Δ is the duration of the guard interval.

Mode	8K mode				2K mode			
Guard interval $\Delta \in T_U$	1/4	1/8	1/16	1/32	1/4	1/8	1/16	1/32
Duration of symbol part T_U	$8\ 192 \times T$ 896 μs (note)				$2\ 048 \times T$ 224 μs (note)			
Duration of guard interval Δ	$2\ 048 \times T$ 224 μs	$1\ 024 \times T$ 112 μs	$512 \times T$ 56 μs	$256 \times T$ 28 μs	$512 \times T$ 56 μs	$256 \times T$ 28 μs	$128 \times T$ 14 μs	$64 \times T$ 7 μs
Symbol duration $T_s = \Delta + T_U$	$10\ 240 \times T$ 1 120 μs	$9\ 216 \times T$ 1 008 μs	$8\ 704 \times T$ 952 μs	$8\ 448 \times T$ 924 μs	$2\ 560 \times T$ 280 μs	$2\ 304 \times T$ 252 μs	$2\ 176 \times T$ 238 μs	$2\ 112 \times T$ 231 μs
NOTE: Values for 8 MHz channels. Values for 6 MHz and 7 MHz channels are given in annex E, tables E.3 and E.4.								

Διάρκεια συμβόλων με χρήση διαστήματος προστασίας

The values for the various time-related parameters are given in multiples of the elementary period T and in microseconds. The elementary period T is 7/64 μs for 8 MHz channels, 1/8 μs for 7 MHz channels and 7/48 μs for 6MHz channels.

Διάστημα προστασίας – *guard interval*

proportion to the length of the useful interval	Length of the guard interval	
	8k-mode	2k-mode
1/4	224 μ s	56 μ s
1/8	112 μ s	28 μ s
1/16	56 μ s	14 μ s
1/32	28 μ s	7 μ s

Specified lengths of the guard interval

Modulation	Bits per sub-carrier	Inner code rate	Guard interval			
			1/4	1/8	1/16	1/32
QPSK	2	1/2	4,98	5,53	5,85	6,03
	2	2/3	6,64	7,37	7,81	8,04
	2	3/4	7,46	8,29	8,78	9,05
	2	5/6	8,29	9,22	9,76	10,05
	2	7/8	8,71	9,68	10,25	10,56
16-QAM	4	1/2	9,95	11,06	11,71	12,06
	4	2/3	13,27	14,75	15,61	16,09
	4	3/4	14,93	16,59	17,56	18,10
	4	5/6	16,59	18,43	19,52	20,11
	4	7/8	17,42	19,35	20,49	21,11
64-QAM	6	1/2	14,93	16,59	17,56	18,10
	6	2/3	19,91	22,12	23,42	24,13
	6	3/4	22,39	24,88	26,35	27,14
	6	5/6	24,88	27,65	29,27	30,16
	6	7/8	26,13	29,03	30,74	31,67

Net data rates in the DVB-T system (in Mbit/s)

Διάστημα προστασίας – *guard interval*

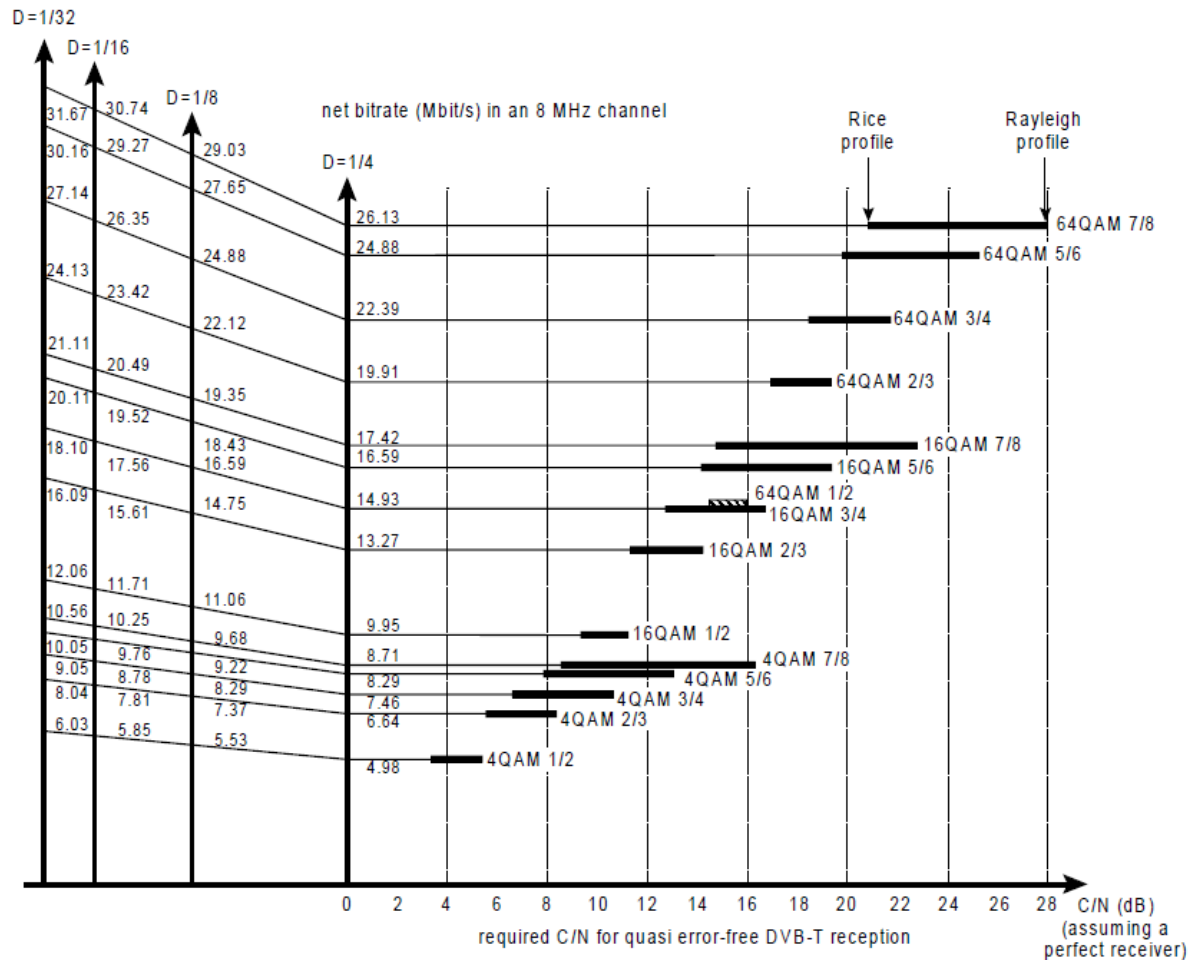


Figure 4: C/N and net bit-rate as a function of the constellation, code rate, guard interval length and channel profile for all DVB-T modes

Διάστημα προστασίας – *guard interval*

Η εναλλαγή μεταξύ των δύο τρόπων (2K και 8K) δεν επηρεάζει την απώλεια σε εύρος ζώνης για συγκεκριμένο ποσοστό του λόγου του διαστήματος προστασίας προς την περίοδο του συμβόλου Δ/T_U . Μια μικρότερη τιμή του Δ/T_U μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένα κανάλι στον τρόπο 8K αντί για τον 2K, ώστε το μήκος του διαστήματος προστασίας να είναι να το ίδιο.

- Για ένα σταθερό κανάλι μετάδοσης, έχουμε μικρότερη απώλεια εύρους ζώνης για διαστήματα προστασίας στον τρόπο 8K σε σχέση με τον τρόπο 2K. Ή, αλλιώς, ο τρόπος 8K επιτρέπει καλύτερα τη λειτουργία με χρήση καναλιών των οποίων η κρουστική απόκριση χρειάζεται περισσότερο χρόνο να αποσβεστεί σε σχέση με τον τρόπο 2K.

Σηματοδοσία

Ένας αποκωδικοποιητής DVB πρέπει να είναι σε θέση να αναγνωρίζει τις παραμέτρους που αφορούν τη μετάδοση και τη λήψη του εκπεμπόμενου σήματος καθώς και να το αποκωδικοποιεί (χωρίς, βέβαια, την παρέμβαση του χρήστη). Αυτό σημαίνει ότι ο αποκωδικοποιητής πρέπει να μπορεί να ενημερώνεται για τα χαρακτηριστικά τα οποία είναι δυνατό να διαφοροποιούνται ανά περίπτωση (για παράδειγμα, ανά εκπεμπόμενο πρόγραμμα).

Τα χαρακτηριστικά αυτά περιλαμβάνουν:

- τον τύπο της διαμόρφωσης,
- τον ρυθμό εσωτερικής κωδικοποίησης,
- το διάστημα προστασίας.

Απαιτείται, λοιπόν, ένας μηχανισμός με τον οποίο να αποστέλλονται αυτά τα χαρακτηριστικά από τον πομπό στον δέκτη. **Ο μηχανισμός αυτός στηρίζεται στη σηματοδοσία.**

Συγκεκριμένα, η σηματοδοσία για τις παραμέτρους μετάδοσης (Transmission Parameter Signaling, TPS) χρησιμοποιεί κάποιες από τις φέρουσες OFDM, **17 για την περίπτωση του τρόπου 2K και 68 για τον τρόπο 8K**, όπου η καθεμία μεταφέρει την ίδια ροή δεδομένων. Οι φέρουσες αυτές είναι αφιερωμένες στην αποστολή της σηματοδοσίας και δε χρησιμοποιούνται για κάποιον άλλο σκοπό.

Σηματοδοσία

Τα δεδομένα TPS κωδικοποιούνται χρησιμοποιώντας διαφορικό BPSK (Differential BPSK, **DBPSK**), ώστε ο αποκωδικοποιητής να μη χρειάζεται να γνωρίζει τον τύπο της διαμόρφωσης πριν ξεκινήσει την αποδιαμόρφωση. **Κάθε σύμβολο OFDM μεταφέρει ένα bit TPS.**

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενες διαφάνειες, εξήντα οκτώ (68) διαδοχικά OFDM σύμβολα δημιουργούν ένα πλαίσιο OFDM. Τα 68 bits TPS που μεταφέρονται από κάθε OFDM πλαίσιο δημιουργούν ένα μπλοκ TPS (**TPS block**). Κάθε TPS block περιέχει ένα bit αρχικοποίησης το οποίο ακολουθείται από 16 bits συγχρονισμού, 37 bits πληροφορίες και 14 bits πλεονασμού για προστασία από σφάλματα.

Το πλήθος bits για τα περιεχόμενα κάθε πεδίου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πεδίο	Πλήθος Bits
Bit αρχικοποίησης	1
Bits συγχρονισμού	16
Μήκος	6
Αριθμός πλαισίου (εντός του υπερπλαισίου)	2
Αστερισμός (QPSK, 16-QAM, 64-QAM)	2
Πληροφορία ιεραρχίας (ιεραρχικός - μη ιεραρχικός τρόπος)	3
Ρυθμός κωδικοποίησης (ρυθμός εσωτερικής κωδικοποίησης 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8)	3
Τρόπος μετάδοσης (2K, 8K)	1
Αναγνωριστικό	6

Περιεχόμενα πεδίων σε σήματα TPS

Σηματοδοσία

Table 9: TPS signalling information and format

Bit number	Format	Purpose/Content
s_0	see clause 4.6.2.1	Initialization
s_1 to s_{16}	0011010111101110 or 1100101000010001	Synchronization word
s_{17} to s_{22}	see clause 4.6.2.3	Length indicator (see annex F)
s_{23} , s_{24}	see table 10	Frame number
s_{25} , s_{26}	see table 11	Constellation
s_{27} , s_{28} , s_{29}	see table 12	Hierarchy information (see annex F)
s_{30} , s_{31} , s_{32}	see table 13	Code rate, HP stream
s_{33} , s_{34} , s_{35}	see table 13	Code rate, LP stream
s_{36} , s_{37}	see table 14	Guard interval
s_{38} , s_{39}	see table 15	Transmission mode (see annex F)
s_{40} to s_{47}	see clause 4.6.2.10	Cell identifier
s_{48} to s_{53}	all set to "0"	See annex F
s_{54} to s_{67}	BCH code	Error protection

TPS signalling information and format according to the European standard ETSI EN 300 744 V1.6.2 (2015-10)

Σήματα αναφοράς

Επιπρόσθετα της πληροφορίας που αφορά τα δεδομένα TPS, το DVB χρησιμοποιεί δύο ακόμα τύπους **σημάτων αναφοράς**:

- τους **συνεχόμενους πιλότους** (continual pilots) και
- τους **διασκορπισμένους πιλότους** (scattered pilots).

Τα σήματα-πιλότοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συγχρονισμό των OFDM frames, συγχρονισμό συχνότητας (frequency), συγχρονισμό χρόνου (time), εκτίμηση καναλιού (channel estimation), αναγνώριση τρόπου μετάδοσης (transmission mode) καθώς και για την παρακολούθηση του θορύβου φάσης (follow the phase noise).

Αμφότερα τα σήματα-πιλότοι δημιουργούν μια ψευδοτυχαία ακολουθία η οποία διαμορφώνεται κατά BPSK. Οι διασκορπισμένοι πιλότοι μεταδίδονται με τις φέρουσες στη χαμηλότερη και την υψηλότερη συχνότητα.

- Από τις 1705 φέρουσες στον τρόπο 2K οι 1.512 είναι διαθέσιμες για την μεταφορά δεδομένων και οι υπόλοιπες **193** χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση σημάτων αναφοράς.
- Αντίστοιχα από τις 6.048 χρήσιμες φέρουσες στον τρόπο 8K, οι **769** χρησιμοποιούνται για τα σήματα αναφοράς.

Οι συνεχόμενοι πιλότοι μεταδίδονται με χρήση των ίδιων κάθε φορά φερουσών, όπως αυτές αναφέρονται στον επόμενο Πίνακα.

Σήματα αναφοράς

Table 7: Carrier indices for continual pilot carriers

Continual pilot carrier positions (index number k)													
2K mode							8K mode						
0	48	54	87	141	156	192	0	48	54	87	141	156	192
201	255	279	282	333	432	450	201	255	279	282	333	432	450
483	525	531	618	636	714	759	483	525	531	618	636	714	759
765	780	804	873	888	918	939	765	780	804	873	888	918	939
942	969	984	1 050	1 101	1 107	1 110	942	969	984	1 050	1 101	1 107	1 110
1 137	1 140	1 146	1 206	1 269	1 323	1 377	1 137	1 140	1 146	1 206	1 269	1 323	1 377
1 491	1 683	1 704					1 491	1 683	1 704	1 752	1 758	1 791	1 845
							1 860	1 896	1 905	1 959	1 983	1 986	2 037
							2 136	2 154	2 187	2 229	2 235	2 322	2 340
							2 418	2 463	2 469	2 484	2 508	2 577	2 592
							2 622	2 643	2 646	2 673	2 688	2 754	2 805
							2 811	2 814	2 841	2 844	2 850	2 910	2 973
							3 027	3 081	3 195	3 387	3 408	3 456	3 462
							3 495	3 549	3 564	3 600	3 609	3 663	3 687
							3 690	3 741	3 840	3 858	3 891	3 933	3 939
							4 026	4 044	4 122	4 167	4 173	4 188	4 212
							4 281	4 296	4 326	4 347	4 350	4 377	4 392
							4 458	4 509	4 515	4 518	4 545	4 548	4 554
							4 614	4 677	4 731	4 785	4 899	5 091	5 112
							5 160	5 166	5 199	5 253	5 268	5 304	5 313
							5 367	5 391	5 394	5 445	5 544	5 562	5 595
							5 637	5 643	5 730	5 748	5 826	5 871	5 877
							5 892	5 916	5 985	6 000	6 030	6 051	6 054
							6 081	6 096	6 162	6 213	6 219	6 222	6 249
							6 252	6 258	6 318	6 381	6 435	6 489	6 603
							6 795	6 816					

Carrier indices for continual pilot carriers in the ETSI EN 300 744 V1.6.2 (2015-10)

Μονοσυχνοτικά δίκτυα

Στα τυπικά τηλεοπτικά δίκτυα, συχνά χρησιμοποιούνται τοπικοί αναμεταδότες για να παρέχουν ένα αποδεκτό επίπεδο σήματος σε διάφορες περιοχές. Λόγω της πιθανότητας παρεμβολής (interference), οι αναμεταδότες αυτοί χρησιμοποιούν διαφορετικό κανάλι (διαφορετικό, δηλαδή, φάσμα συχνοτήτων) από τον κυρίως πομπό, και είθισται να ανατίθεται ένα ξεχωριστό κανάλι για κάθε περιοχή. Αυτού του είδους τα δίκτυα ονομάζονται **πολυσυχνοτικά** (Multi Frequency Network, MFN).

- Αυτή η πρακτική καθιστά τη διαχείριση του εύρους ζώνης για την επίγεια μετάδοση μη αποδοτική.

Ο συνδυασμός της εξωτερικής και της εσωτερικής κωδικοποίησης σε ένα μεγάλο ποσοστό από τα φέροντα του COFDM με τη χρήση της διεμπλοκής επιτρέπει την αντιμετώπιση της παρεμβολής. Αυτό οδηγεί στην επίτευξη μιας υψηλής ποιότητας ροής δεδομένων στην είσοδο του αποκωδικοποιητή MPEG-2. Το σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί μία συχνότητα σε ένα κανάλι ονομάζεται **μονοσυχνοτικό δίκτυο** (Single Frequency Network, SFN).



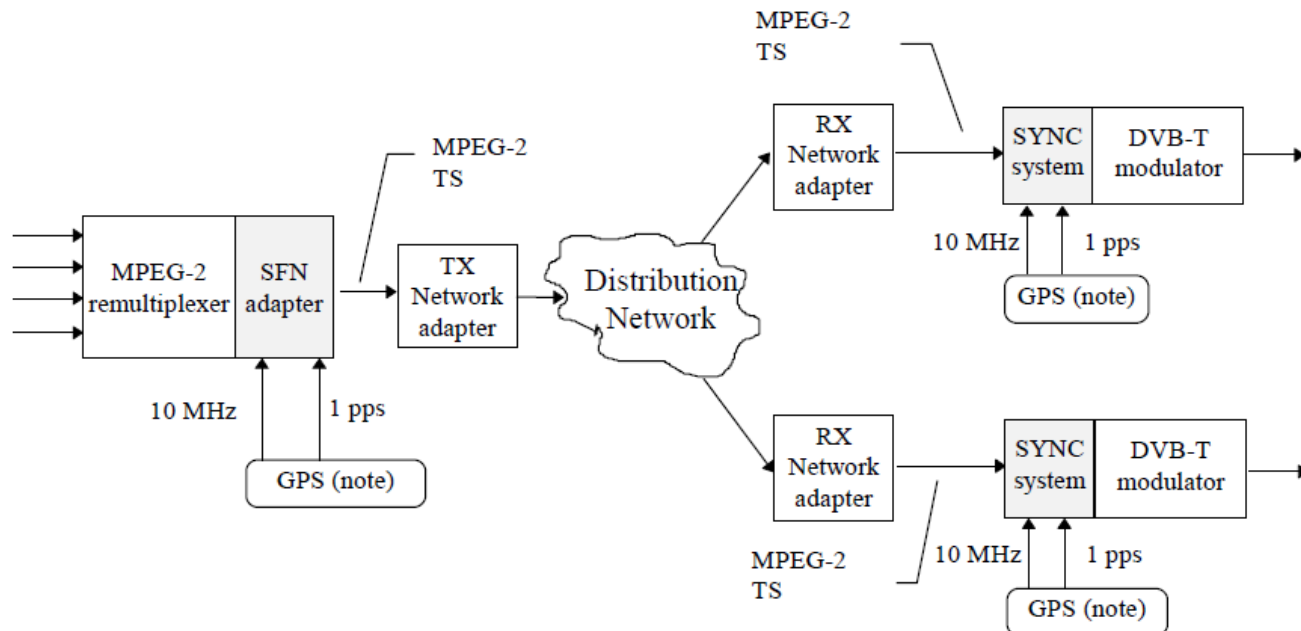
Παράδειγμα πολυσυχνοτικού δικτύου (MFN)



Παράδειγμα μονοσυχνοτικού δικτύου (SFN)

Μονοσυχνοτικά δίκτυα – ο “χρυσός” κανόνας των SFN

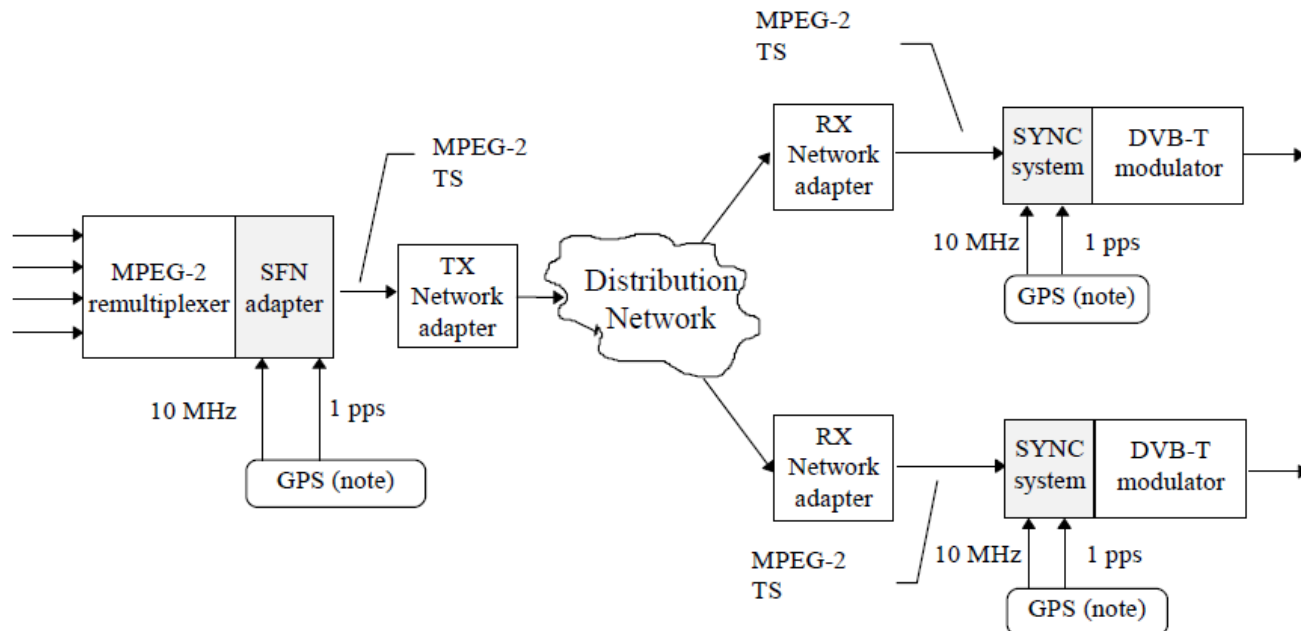
- Ίδια ακριβώς συχνότητα
- Την ίδια ακριβώς χρονική στιγμή
- Τα ίδια ακριβώς δεδομένα



DVB-T primary distribution with SFN adaptation

Μονοσυχνοτικά δίκτυα – δομή μεταδιδόμενης πληροφορίας

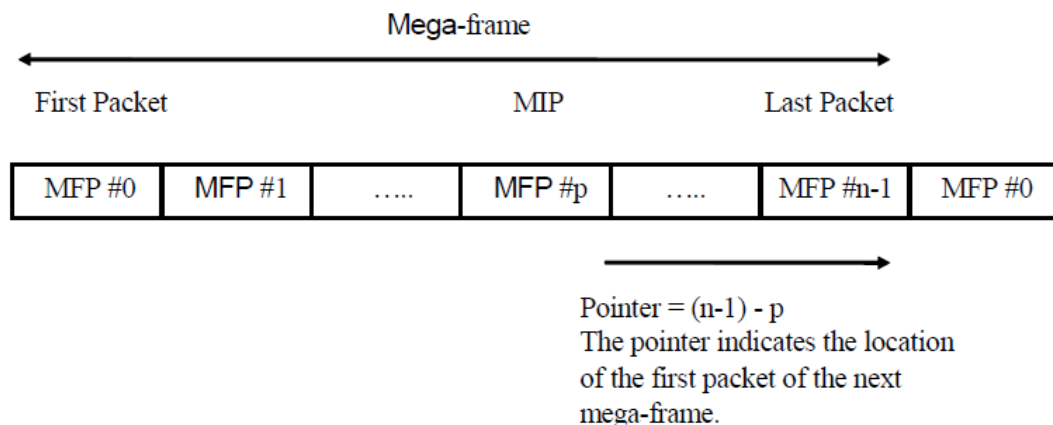
Η έξοδος του SFN adapter θα πρέπει να είναι έγκυρο MPEG-2 TS, όπου τα μεμονωμένα πακέτα είναι οργανωμένα σε ομάδες, που αποτελούν ένα **μέγα-πλαίσιο (mega frame)**. Κάθε mega-frame αποτελείται από n πακέτα, όπου το n είναι ακέραιος αριθμός, και εξαρτάται από τον αριθμό των πακέτων RS σε κάθε super-frame, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας (transmission mode) που έχουμε επιλέξει (βλ. EN 300 744, ενότητα 4.7). Στη λειτουργία 8K το n είναι (ο αριθμός των πακέτων RS ανά σούπερ-πλαίσιο) $\times 2$, ενώ στη λειτουργία 2K το n είναι (ο αριθμός των πακέτων RS ανά σούπερ-πλαίσιο) $\times 8$.



DVB-T primary distribution with SFN adaptation

Μονοσυχνοτικά δίκτυα – δομή μεταδιδόμενης πληροφορίας

- Κάθε mega-πλαίσιο περιέχει ένα μόνο Mega-frame Initialization Packet (MIP). Η πραγματική θέση του μπορεί να ποικίλει από mega-frame σε mega-frame. Η τιμή του MIP χρησιμοποιείται για δείξει την αρχή του επόμενου mega-frame. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η δομή του mega-frame, περιλαμβανομένης και της θέσης του MIP.

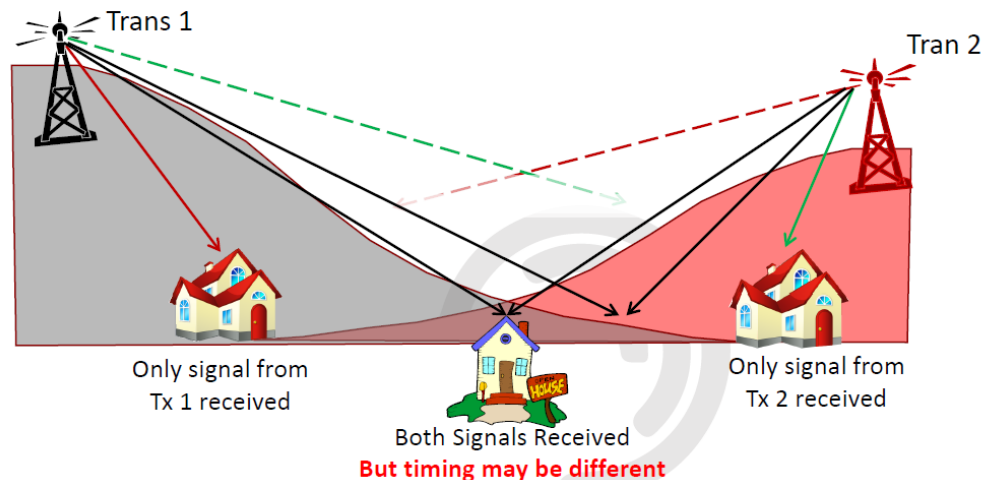


Δομή ενός mega-πλαισίου (mega-frame structure)

Μονοσυχνοτικά δίκτυα – απόσταση μεταξύ των πομπών

Ένα τμήμα ενός μονοσυχνοτικού δικτύου απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα. Χρησιμοποιούνται δύο αναμεταδότες («Trans 1» και «Trans 2»). Εάν οι αναμεταδότες αυτοί είναι σε κοντινή απόσταση, η λειτουργία στην ίδια συχνότητα μπορεί να οδηγήσει σε παρεμβολή (interference) μεταξύ των δύο σημάτων. Η διαφορά μεταξύ των καθυστερήσεων διάδοσης από τους δύο αναμεταδότες είναι ο βασικός λόγος για την υποβάθμιση του λαμβανόμενου σήματος.

- Η πρώτη επίδραση αυτής της διαφοροποίησης στην καθυστέρηση μετάδοσης είναι ότι δημιουργεί παρεμβολή μεταξύ των συμβόλων που αποτελούν τα σήματα, την ονομάζουμε διασυμβολική παρεμβολή (intersymbol interference). **Όσο η διαφορά στην καθυστέρηση μετάδοσης (μεταξύ των δύο αναμεταδοτών) είναι μικρότερη από το διάστημα προστασίας, τότε η συμβολή του μονοσυχνοτικού δικτύου στη διασυμβολική παρεμβολή είναι αμελητέα.**
- Η δεύτερη επίδραση της λήψης σημάτων από δύο διαφορετικές πηγές είναι ότι η λαμβανόμενη ισχύς εξαρτάται από τη σχετική φάση των δύο σημάτων, η οποία αλλάζει με τη συχνότητα. **Εάν η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο σημάτων είναι μισός κύκλος, η παρεμβολή οδηγεί στον μηδενισμό των σημάτων (αθροιστικά, δηλαδή, δίνουν μηδενικό σήμα).**



Μονοσυχνοτικά δίκτυα – απόσταση μεταξύ των πομπών

Κατά την ανάλυση της επίδρασης της παρεμβολής, ας θεωρήσουμε τη χειρότερη περίπτωση, στην οποία τα σήματα από τους αναμεταδότες Α και Β έχουν την ίδια ισχύ. Σε αυτήν την περίπτωση, το σήμα μηδενίζεται στις συχνότητες στις οποίες η διαφορά στο μήκος των διαδρομών, έστω d_n , μεταξύ των αναμεταδοτών και των δεκτών λαμβάνουν τιμές οι οποίες ικανοποιούν την παρακάτω σχέση για ακέραιες τιμές του n :

$$d_n = \frac{\lambda(2n + 1)}{2} \quad (10)$$

- Δύο κύματα παρεμβάλλονται εποικοδομητικά (constructive interference), όταν η διαφορά διαδρομής τους είναι $d_n = \lambda, 2\lambda \dots n\lambda$.
- Δύο κύματα παρεμβάλλονται καταστρεπτικά (destructive interference), όταν η διαφορά διαδρομής τους είναι $d_n = \lambda / 2, 3\lambda / 2 \dots (2n+1) \lambda / 2$.

Η διαφορά στη συχνότητα μεταξύ των μηδενισμών είναι ίση με το αντίστροφο της διαφοράς στην καθυστέρηση διάδοσης από το Α στον δέκτη και από το Β στον δέκτη. Στο σύστημα DVB οι φέρουσες OFDM για τις οποίες η λαμβανόμενη ισχύς είναι μικρή τείνουν να ομαδοποιούνται. Για αυτόν τον λόγο το DVB δεν αναθέτει σύμβολα στις φέρουσες του OFDM με αύξουσα σειρά συχνότητας αλλά αναθέτει τα σύμβολα στις φέρουσες με **ψευδοτυχαία** σειρά.

Μονοσυχνοτικά δίκτυα – απόσταση μεταξύ των πομπών

Η σύσταση που παρέχεται στις Οδηγίες εφαρμογής ETSI TR 101-190 [9] για το DVB-T είναι ότι η επιλογή του διαστήματος προστασίας (guard interval) πρέπει να βασίζεται στην απόσταση μεταξύ των πομπών. Η απόσταση μεταξύ παρακείμενων πομπών σε SFN δεν πρέπει να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από το χρόνο διάδοσης που επιτρέπεται στο διάστημα προστασίας: Πιο συγκεκριμένα,

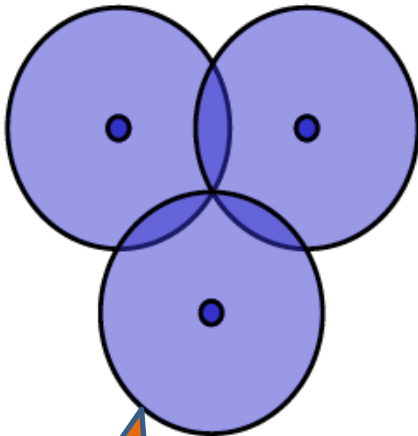
- Σε ένα σύστημα DVB-T των 2K-FFT, το διάστημα προστασίας μπορεί να πάρει τις τιμές 7 μ s ($GI = 1/32$), 14 μ s ($GI = 1/16$), 28 μ s ($GI = 1/8$), ή 56 μ s ($GI = 1/4$). Αυτές οι τιμές μεταφράζονται σε αποστάσεις των 2.1 km, 4.2 km, 8.4 km, και 16.8 km.
- Σε ένα σύστημα DVB-T των 8K-FFT, το διάστημα προστασίας μπορεί να πάρει τις τιμές 28 μ s ($GI = 1/32$), 56 μ s ($GI = 1/16$), 112 μ s ($GI = 1/8$), ή 224 μ s ($GI = 1/4$). Αυτές οι τιμές μεταφράζονται σε αποστάσεις των 8.4 km, 16.8 km, 33.6 km, και 67.2 km αντίστοιχα.

Με βάση τα παραπάνω, για ένα σύστημα των 8K-FFT με guard interval του 1/4 προκύπτει ότι οι επιτρεπόμενοι χρόνοι καθυστέρησης σήματος βρίσκονται εκτός της καθυστέρησης σήματος μεταξύ παρακείμενων πομπών, όταν αυτοί οι πομποί βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από 67.2 km.

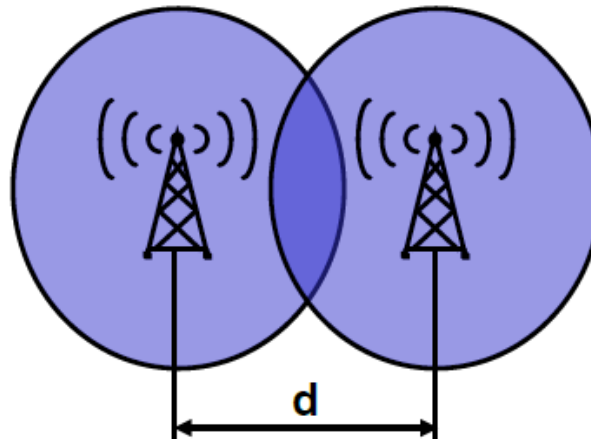
proportion to the length of the useful interval	Length of the guard interval	
	8k-mode	2k-mode
1/4	224 μ s	56 μ s
1/8	112 μ s	28 μ s
1/16	56 μ s	14 μ s
1/32	28 μ s	7 μ s

Specified lengths of the guard interval

Μονοσυχνотικά δίκτυα – απόσταση μεταξύ των πομπών



Μεγάλη απόσταση
μεταξύ των πομπών
Λίγοι πομποί σε μεγάλες
αποστάσεις



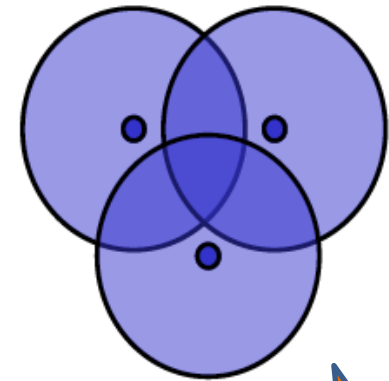
Η μέγιστη επιτρεπτή απόσταση μεταξύ
δύο πομπών καθορίζεται από το Guard
Interval

DVB-T (8k, GI 1/4): $224\mu\text{s} \Rightarrow d \leq 67 \text{ km}$

DVB-T (8k, GI 1/32): $28\mu\text{s} \Rightarrow d \leq 9 \text{ km}$

DVB-T (2k, GI 1/4): $56\mu\text{s} \Rightarrow d \leq 17 \text{ km}$

DVB-T (2k, GI 1/32): $7\mu\text{s} \Rightarrow d \leq 2 \text{ km}$



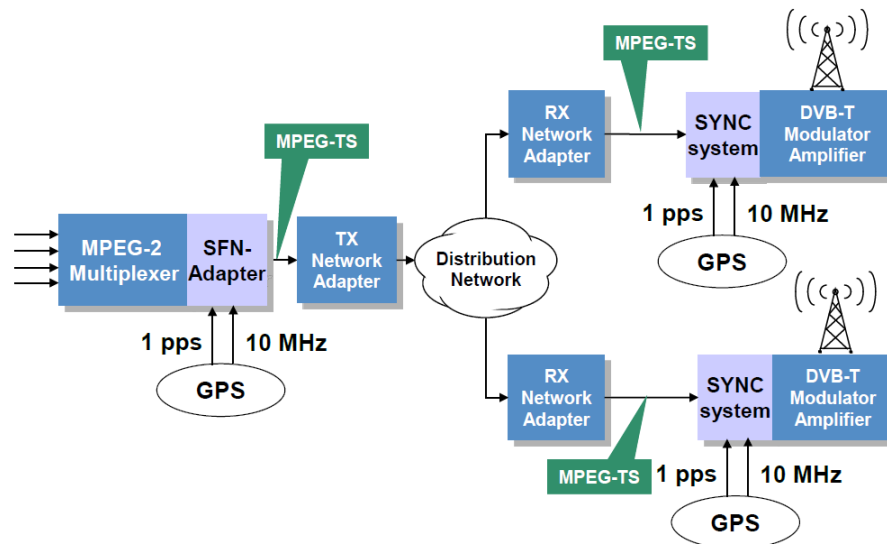
Μικρή απόσταση
μεταξύ των πομπών
Πολλοί πομποί σε
μεγάλες αποστάσεις

Μονοσυχνοτικά δίκτυα – συγχρονισμός

Οι πομποί σε ένα SFN θα πρέπει να είναι **απολύτως συγχρονισμένοι**. Ο πιο κοινός τρόπος συγχρονισμού όλων των πομπών είναι με την χρήση με GPS (Global Positioning System).

- Η χρήση δεκτών GPS σε ένα SFN γίνεται για την δυναμική αποκατάσταση της καθυστέρησης (**Dynamic Delay Compensation**). Οι δέκτες GPS μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθούν στο κλείδωμα της συχνότητας σε κάθε πομπό SFN για σταθεροποίηση της συχνότητας.
- Επιπλέον αποκατάσταση της καθυστέρησης (delay compensation) μπορεί να γίνει στους πομπούς όπου οι διαμορφωτές έχουν διαφορετικούς χρόνους επεξεργασίας ή είναι από διαφορετικούς κατασκευαστές. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε να κάνουμε με την στατική αποκατάσταση της καθυστέρησης (**Static Delay Compensation**).

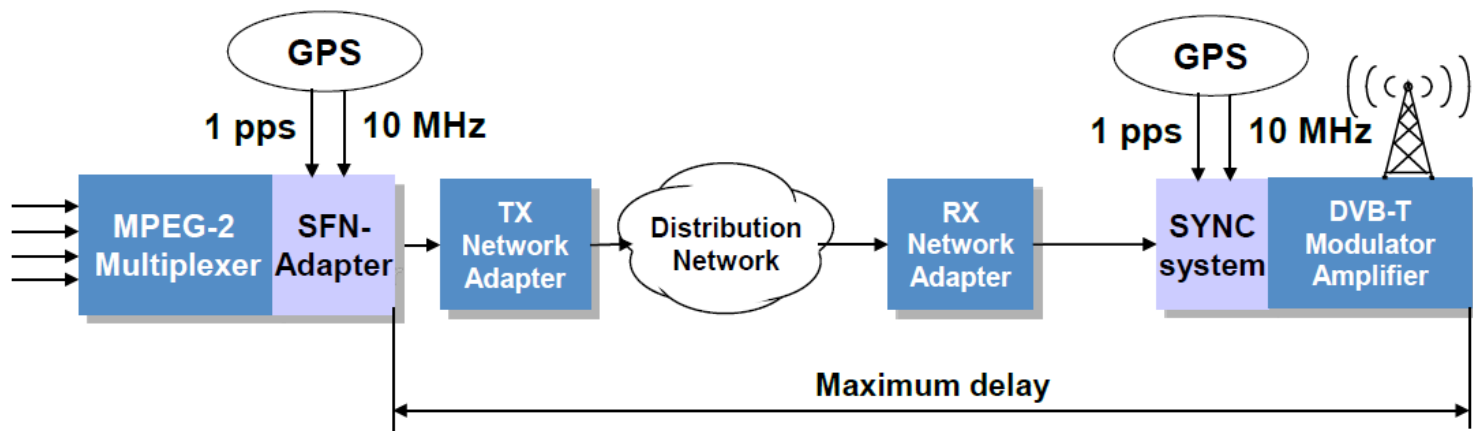
Σε πολλές περιπτώσεις η dynamic delay compensation και η static delay compensation χρησιμοποιούνται σε μεγάλα SFN's.



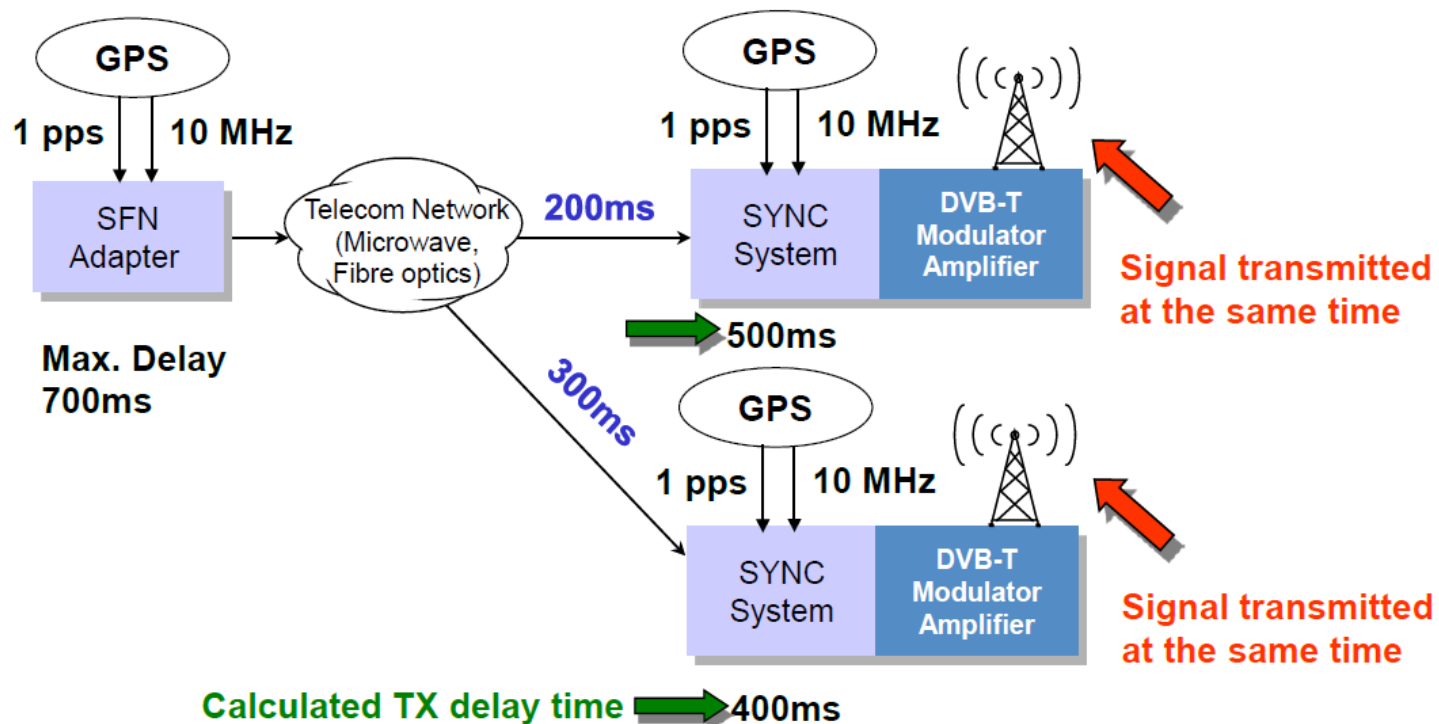
Μονοσυχνοτικά δίκτυα – συγχρονισμός

Μέγιστη καθυστέρηση

- Η μέγιστη καθυστέρηση (maximum delay) περιγράφει τη χρονική διαφορά ανάμεσα ενός συγκεκριμένου Mega-frame που εξέρχεται από τον SFN adapter και του αντίστοιχου COFDM Mega-frame που βρίσκεται στην έξοδο της κεραίας εκπομπής **κάθε αναμεταδότη στο δίκτυο SFN**.
- Η τιμή της μέγιστης καθυστέρησης μπορεί να ρυθμιστεί μέσα από τον **SFN-Adapter**, και θα πρέπει να είναι (σε κάθε περίπτωση) μεγαλύτερη από την πραγματική καθυστέρηση του δικτύου. Η τιμή της μέγιστης καθυστέρησης **μεταφέρεται μέσα από κάθε MIP**.

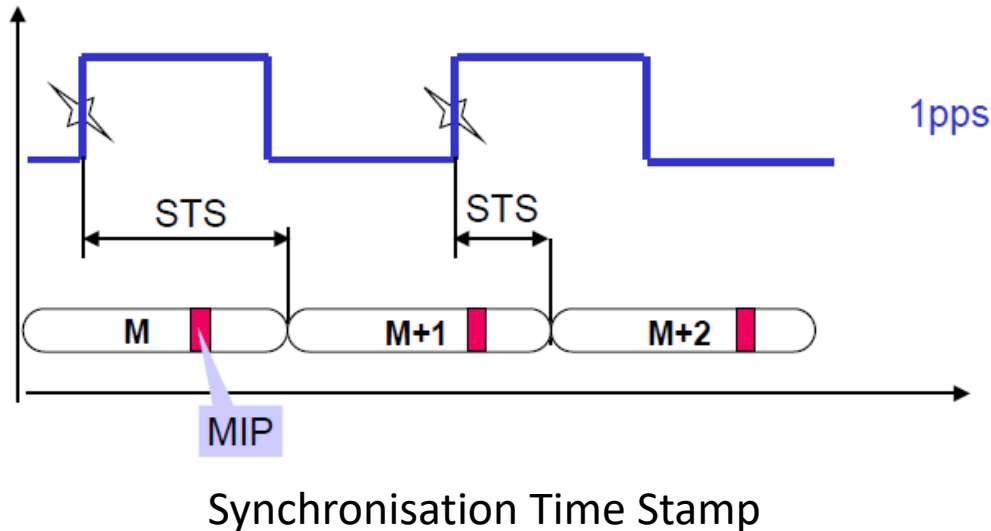


Μονοσυχνοτικά δίκτυα – συγχρονισμός



Transmitter Synchronisation Dynamic Delay Compensation

Μονοσυχνοτικά δίκτυα – συγχρονισμός



Η σηματοδοσία STS μεταφέρεται με το MIP 'του κάθε Mega-frame.

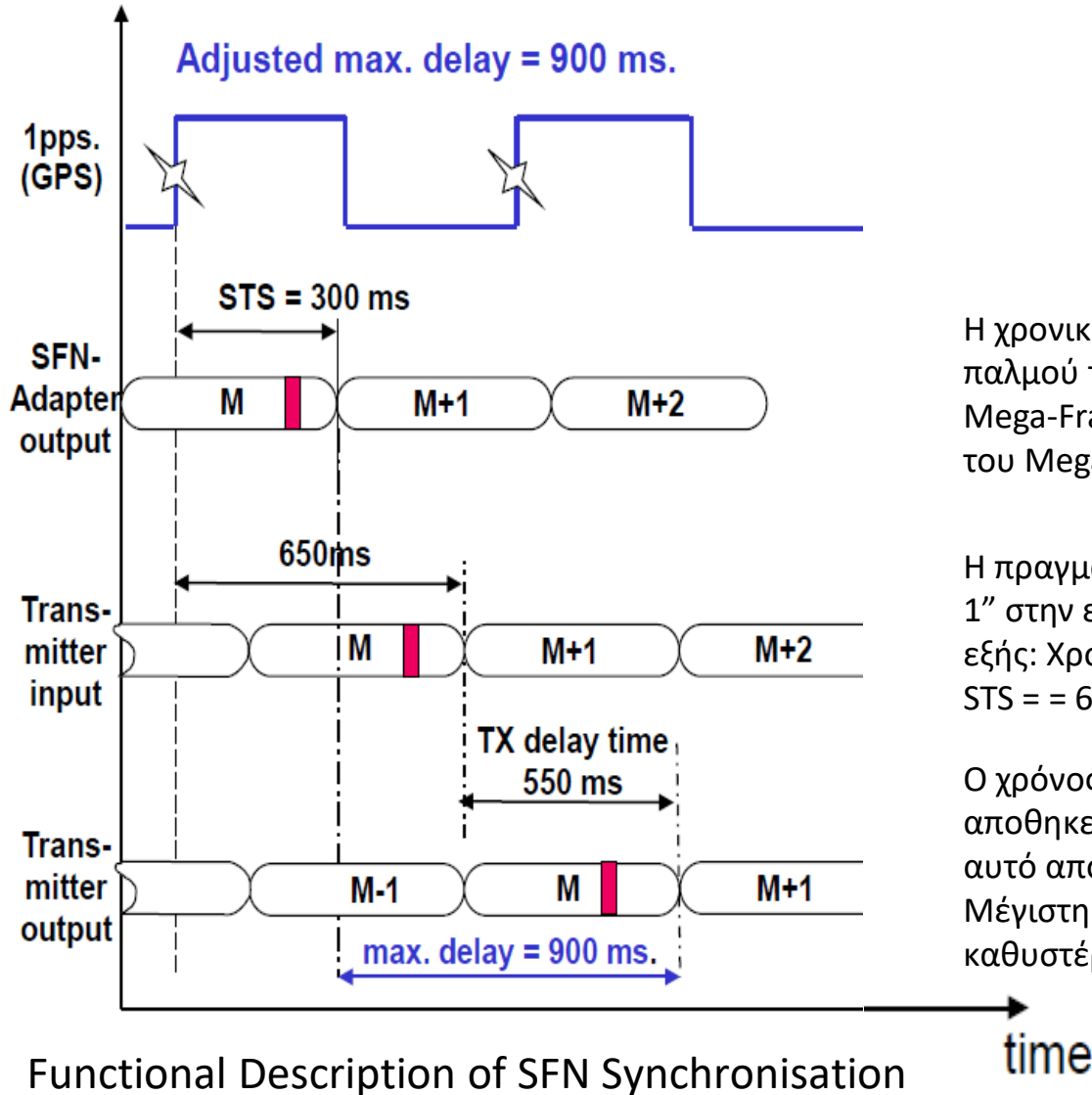
Το STS που μεταφέρει κάθε Mega-frame (M) περιγράφει την αρχή έναρξης του επόμενου Mega-frame (M+1).

Το STS που μεταφέρεται από το Mega-frame "M+1" περιγράφει την αρχή έναρξης του Mega-frame "M+2", κ.ο.κ..

Synchronisation Timestamp (STS)

Η τιμή του synchronisation timestamp αποτυπώνει την χρονική διαφορά μεταξύ της αιχμής ανόδου (rising edge) του 1pps symbol και της έναρξης του επόμενου mega-frame (M+1)

Μονοσυχνοτικά δίκτυα – συγχρονισμός



Η χρονική διαφορά μεταξύ του τελευταίου παλμού του σήματος 1pps και της έναρξης του Mega-Frame “M + 1” αντιγράφεται στο MIP του Mega-Frame “M”.

Η πραγματική καθυστέρηση του πλαισίου “M + 1” στην είσοδο του πομπού υπολογίζεται ως εξής: Χρόνος άφιξης του πλαισίου “M + 1” – τιμή $STS = 650\text{ ms} - 300\text{ ms} = 350\text{ ms}$

Ο χρόνος που πρέπει να παραμείνει αποθηκευμένο ένα πλαίσιο στον πομπό πριν αυτό αποσταλεί, υπολογίζεται ως εξής: Μέγιστη. καθυστέρηση - πραγματική καθυστέρηση = $900\text{ ms} - 350\text{ ms} = 550\text{ ms}$

Μονοσυχνοτικά δίκτυα – πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

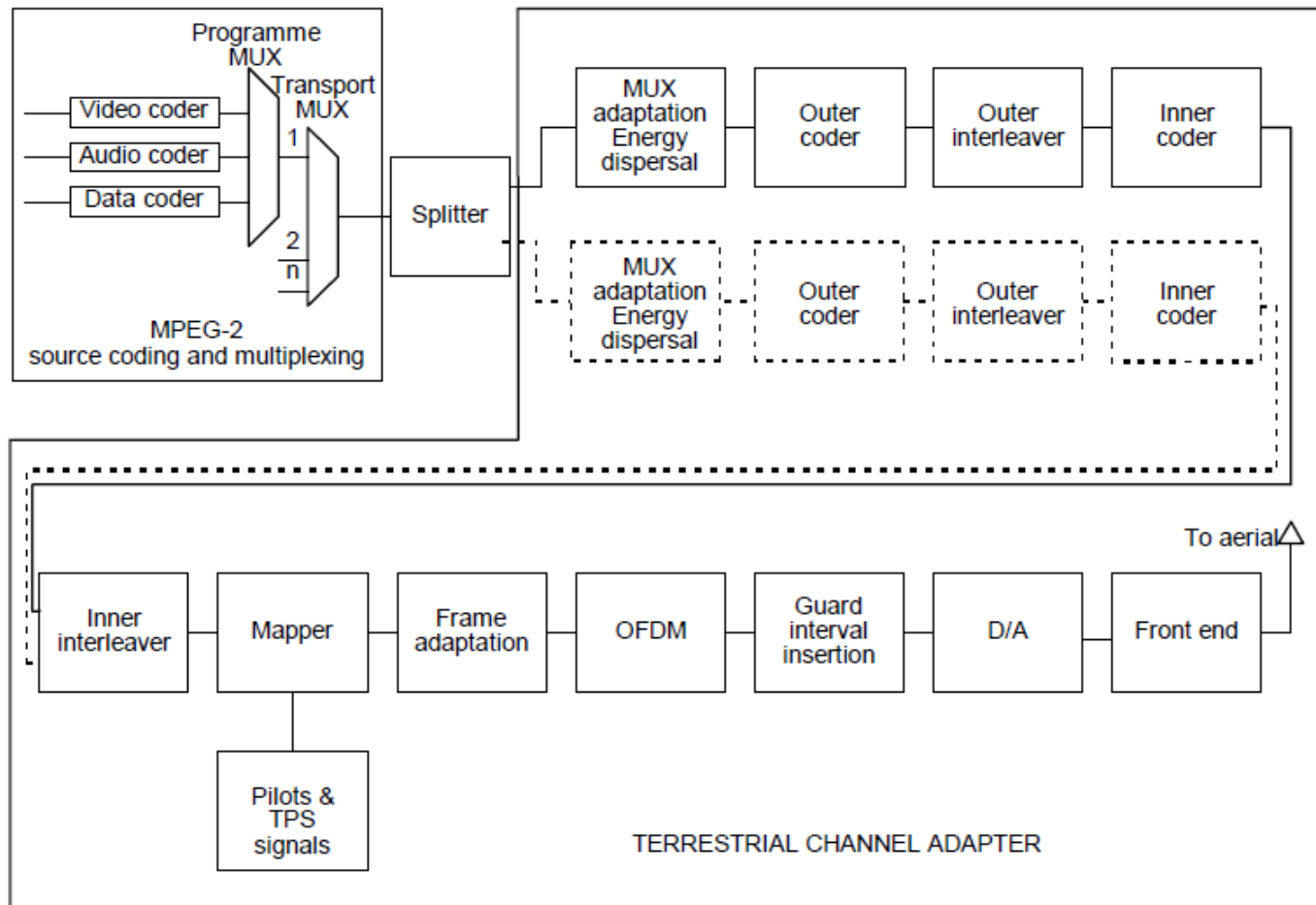
Τα κύρια πλεονεκτήματα των μονοσυχνικών δικτύων συγκριτικά τα πολυσυχνοτικά είναι:

- **Εξοικονόμηση φάσματος σε αντίθεση με τα MFNs.** Η διαχείριση του φάσματος αποτελεί καθοριστικό παράγοντα επιτυχίας, τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα όπου ένα μεγάλο πλήθος προσφερόμενων τηλεοπτικών προγραμμάτων και διαδραστικών υπηρεσιών θα κάνουν τις υποδομές ευρυεκπομπής ελκυστικές.
- **Στα SFNs το λαμβανόμενο σήμα αποτελεί σύνθεση των εισερχομένων σημάτων που μεταδίδονται από αρκετούς μεταδότες.** Κάποιοι μεταδότες μπορεί να προσφέρουν ασθενές σήμα, ενώ κάποιοι άλλοι ισχυρό. Ως αποτέλεσμα οι πιθανότητες επαρκούς λήψης αυξάνονται. Επομένως υπάρχει δικτυακό κέρδος, το οποίο μεταφράζεται σε χαμηλότερη ισχύ και μεγαλύτερη ομοιογένεια της περιοχής που καλύπτεται από το SFN δίκτυο.
- **Τα SFNs επιτρέπουν την εύκολη εγκατάσταση gap - filling μεταδοτών, όπου υπάρχει προβληματική λήψη, χωρίς τη δέσμευση επιπλέον συχνοτήτων.**

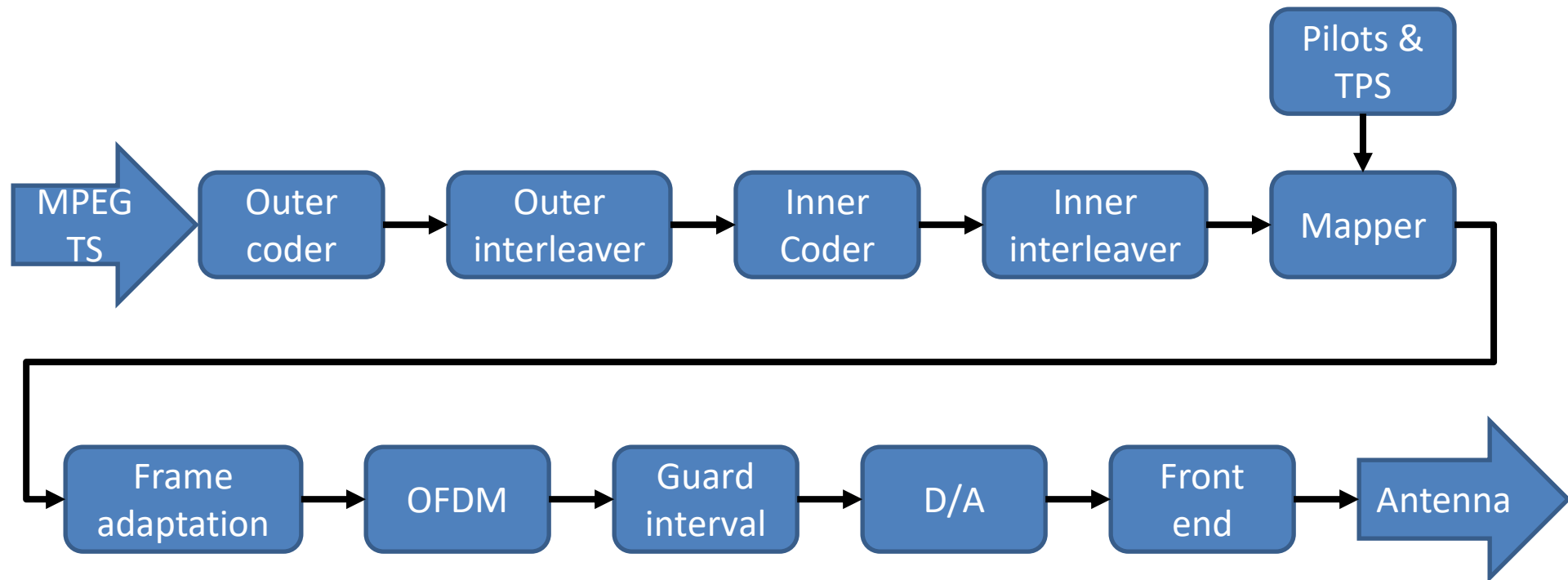
Τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των SFNs είναι:

- **Μειωμένο bit rate λόγω του μεγέθους του SFN ή της απόστασης μεταξύ πομπών SFN (χρήση μεγάλων guard intervals)**
- **Αυξημένη πολυπλοκότητα στη σχεδίαση των πομπών**
- **Πολυπλοκότητα στο δικτυακό σχεδιασμό και ανάγκη για μεγάλη ακρίβεια συγχρονισμού των πομπών**
- **Εκπομπή των ίδιων υπηρεσιών και δεδομένων, χωρίς την δυνατότητα προσθήκης τοπικών ή/και προσωπικών υπηρεσιών.**
- **Το σήμα που λαμβάνεται εκτός του διαστήματος Guard Interval προκαλεί ιδιο-παρεμβολή (self interference) μέσα στο δίκτυο. Τα σήματα από μακρινούς πομπούς SFN λόγω μη φυσιολογικής διάδοσης (Multipath) μπορούν να προκαλέσουν παρεμβολές.**
- **Η απόσταση μεταξύ των σταθμών εκπομπής περιορίζεται από το guard interval.**
- **Δεν υπάρχει η δυνατότητα εκπομπής διαφορετικών τοπικών τηλεοπτικών υπηρεσιών ή άλλων δεδομένων**

Σύνοψη ευρυεκπομπής επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης



Επίγεια ψηφιακή τηλεόραση σύμφωνα με το πρότυπο DVB-T



Δομικά στοιχεία/βαθμίδες ενός συστήματος επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης σύμφωνα με το πρότυπο DVB-T

Επαναληπτικές ασκήσεις – Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1

Άσκηση

Τροφοδοτούμε ένα πομπό DVB με συρμό μεταφοράς MPEG-2 Transport Stream που έχει ρυθμό 15 Mbits/s. Σε αυτό τον συρμό μεταφοράς προσθέτουμε κώδικα Reed-Solomon, και στην συνέχεια συνελικτικό κώδικα ρυθμού 2/3.

- Ποιος είναι ο τελικός ρυθμός μετάδοσης της κωδικοποιημένης / προστατευμένης ροής;
- Ποσά σύμβολα ανά δευτερόλεπτο (symbols/sec - δηλ. αλλαγές φάσης της διαμορφωμένης κυματομορφής) απαιτούνται για τη μετάδοση του σήματος με σηματοστερισμό (constellation diagram) QPSK στο DVB-T;

Κριτήριο αξιολόγησης 1

Απάντηση / Λύση

- a. Τα 15 Mbits/s αντιστοιχούν σε $15/8 \text{ Mbytes/s} = 1,875 \text{ Mbytes/s}$. Εφόσον κάθε Transport Packet έχει μήκος 188 bytes, ο ρυθμός μετάδοσης είναι ίσος με $(1,875 \cdot 10^6 \text{ bytes/s}) / (188 \text{ bytes/packet}) = 9973,4 \text{ packets/sec}$. Μετά την προσθήκη του κώδικα Reed-Solomon, το μήκος κάθε πακέτου θα αυξηθεί από τα 188 στα 204 bytes. Έτσι, τα 9973,4 packets/sec θα αντιστοιχούν σε $(9973,4 \text{ packets/sec}) \cdot (204 \text{ bytes/packet}) = 2,034 \text{ Mbytes/sec} = \mathbf{16,27 \text{ Mbits/s}}$. Ο συνελικτικός κωδικοποιητής 3 bits για κάθε 2 bits εισόδου. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης να ανέλθει στα $16,27 \text{ Mbits/s} \cdot (3/2) = \mathbf{24,40 \text{ Mbits/s}}$.
- b. Το πρότυπο DVB-T χρησιμοποιεί διαμόρφωση QPSK, η οποία αντιστοιχεί 2 bits σε κάθε αλλαγή φάσης του φέροντος (2 bits/symbol). Συνεπώς, για την αποστολή $24,40 \cdot 10^6 \text{ bits/s}$ απαιτούνται $(24,40/2) \cdot 10^6 \text{ symbols/s} = \mathbf{12,2 \text{ Msymbols/s}}$.

Κριτήριο αξιολόγησης 2

Άσκηση

Σε ένα δίκτυο DVB-T ο ελάχιστος σηματοθορυβικός λόγος (minimum SNR) που μετρήσαμε στην μεριά του δέκτη ήταν ίσος με 6 dB.

- Ποιος είναι ο ρυθμός συνελκτικού κώδικα που πρέπει να επιλέξουμε στον πομπό προκειμένου οι δέκτες να αποκωδικοποιούν σωστά (χωρίς λάθη) το εκπεμπόμενο Transport Stream οποιαδήποτε στιγμή;
- Θεωρώντας ότι ο ρυθμός εισόδου στην είσοδο του συνελκτικού κωδικοποιητή (convolutional encoder) είναι 5 Mbps, ποιος είναι ο ρυθμός στην έξοδό του;

Δίνεται ο παρακάτω πίνακας που περιγράφει τις καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος DVB-T.

Modulation	Code Rate	Useful bitrate (Mbits/s)	Minimum SNR required at the receiver (dB)
QPSK	1/2	5,53	3,1
QPSK	2/3	7,37	4,9
QPSK	3/4	8,29	5,9
QPSK	5/6	9,22	6,9
QPSK	7/8	9,68	7,7

Κριτήριο αξιολόγησης 2

Απάντηση / Λύση

- a. Από τον πίνακα επιλέγουμε διαμόρφωση QPSK με **ρυθμό κώδικα $\frac{3}{4}$ (Code Rate)**, πράγμα που θα μας εξασφαλίσει μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων χωρίς λάθη με κατώφλι SNR στα 5.9dB.
- b. Ο συνελκτικός κώδικας που επιλέξαμε προηγουμένως έχει ρυθμό $\frac{3}{4}$, δηλαδή δημιουργεί 4 bits στην έξοδο για κάθε 3 bits εισόδου. Επομένως, για ρυθμό εισόδου ίσο με 5 Mbps, ο ρυθμός εξόδου του κωδικοποιητή θα είναι $5 \text{ Mbps} \cdot \frac{4}{3} = \mathbf{6,67 \text{ Mbps}}$.

Modulation	Code Rate	Useful bitrate (Mbits/s)	Minimum SNR required at the receiver (dB)
QPSK	1/2	5,53	3,1
QPSK	2/3	7,37	4,9
QPSK	3/4	8,29	5,9
QPSK	5/6	9,22	6,9
QPSK	7/8	9,68	7,7

Κριτήριο αξιολόγησης 3

Άσκηση

Σε ένα δίκτυο ψηφιακής **δορυφορικής τηλεόρασης DVB-S**, η ελάχιστη τιμή του σηματοθορυβικού λόγου που παρατηρείται στους δέκτες των τηλεθεατών είναι 7 dB.

- Ποιος είναι ο ρυθμός του συνελικτικού κώδικα που πρέπει να επιλέξουμε στον πομπό ώστε οι δέκτες να μπορούν ανά πάσα στιγμή να αποκωδικοποιήσουν σωστά το Transport Stream;
- Αν το bit rate εισόδου στο συνελικτικό κωδικοποιητή είναι 10 Mbps, πόσο είναι το bit rate εξόδου;

Δίνεται ο πίνακας καταστάσεων λειτουργίας για ένα σύστημα DVB-S.

Code Rate	Useful bitrate (Mbits/s)	Minimum SNR required at the receiver (dB)
1/2	23,7	4,1
2/3	31,6	5,8
3/4	35,6	6,8
5/6	39,6	7,8
7/8	41,5	8,4

Κριτήριο αξιολόγησης 3

Απάντηση / Λύση

- a. Από τον πίνακα καταστάσεων λειτουργίας, επιλέγουμε **ρυθμό κώδικα 3/4**, που εξασφαλίζει μέγιστο ωφέλιμο bitrate και σωστή λειτουργία για $\text{SNR} > 7\text{dB}$.
- b. Ο συνελκτικός κώδικας έχει ρυθμό 3/4, δηλ. παράγει 4 bits εξόδου για κάθε 3 bits εισόδου. Συνεπώς για bitrate εισόδου 10 Mbps, το bitrate εξόδου θα είναι $10 \text{ Mbps} \cdot 4/3 = \mathbf{13,33 \text{ Mbps}}$.

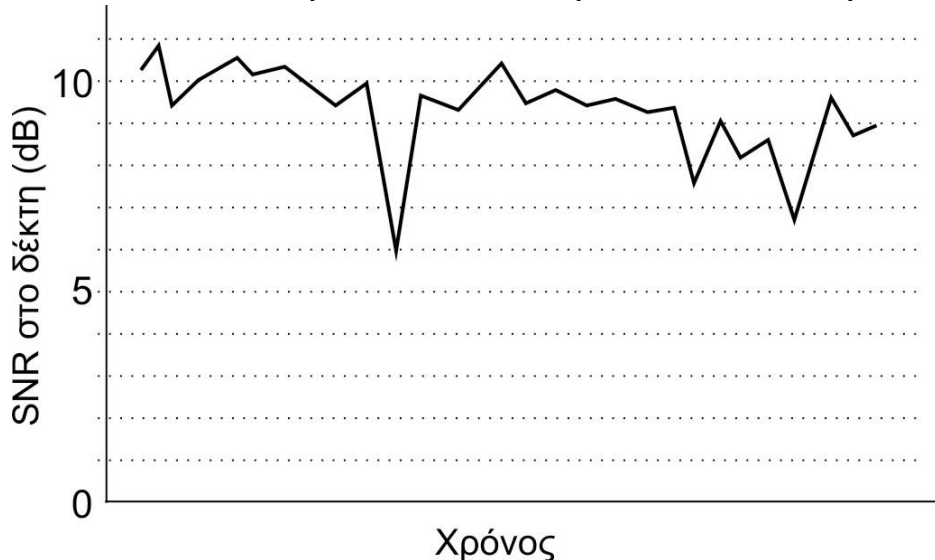
Code Rate	Useful bitrate (Mbits/s)	Minimum SNR required at the receiver (dB)
1/2	23,7	4,1
2/3	31,6	5,8
3/4	35,6	6,8
5/6	39,6	7,8
7/8	41,5	8,4

Κριτήριο αξιολόγησης 4

Άσκηση

Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει τον σηματοθορυβικό λόγο σε έναν δέκτη ψηφιακής δορυφορικής τηλεόρασης DVB-S, όπως έχει καταγραφεί κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου.

- Ποιος είναι ο ρυθμός του συνελικτικού κώδικα που πρέπει να επιλέξουμε στον πομπό ώστε ο δέκτης να μπορεί ανά πάσα στιγμή να αποκωδικοποιήσει σωστά το Transport Stream;
- Χρησιμοποιώντας εύρος ζώνης εκπομπής 33 MHz, πόσα το πολύ δορυφορικά τηλεοπτικά προγράμματα MPEG-2 με ρυθμό 6 Mbits/s το καθένα μπορούμε να μεταφέρουμε στην πολυπλεξία; Πόσα κενά (stuffing/pudding) Transport Packets το δευτερόλεπτο θα πρέπει να εισάγονται σε αυτή την περίπτωση;

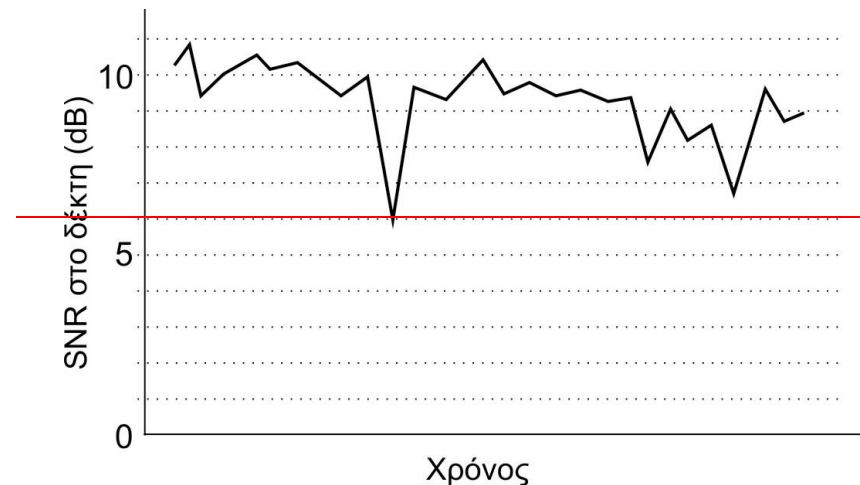


Code Rate	Useful bitrate (Mbits/s)	Minimum SNR required at the receiver (dB)
1/2	23,7	4,1
2/3	31,6	5,8
3/4	35,6	6,8
5/6	39,6	7,8
7/8	41,5	8,4

Κριτήριο αξιολόγησης 4

Απάντηση / Λύση

- a. Στο γράφημα του σηματοθορυβικού λόγου, παρατηρούμε ότι η ελάχιστη τιμή που παίρνει το SNR είναι 6 dB. Από τον πίνακα καταστάσεων λειτουργίας, επιλέγουμε **ρυθμό κώδικα 2/3**, που εξασφαλίζει μέγιστο ωφέλιμο bitrate και σωστή λειτουργία για $SNR > 5.8$.
- b. Για code rate = 2/3, από τον πίνακα προκύπτει ότι για εύρος ζώνης εκπομπής 33 MHz, το συνολικό ωφέλιμο bitrate της πολυπλεξίας που μπορεί να εκπεμφθεί είναι 31.6 Mbits/s. Με τη χωρητικότητα αυτή μπορούν να μεταφερθούν 5 προγράμματα των 6 Mbits/s, που θα καταλάβουν συνολικά 30 Mbits/s. Το 1.6 Mbits/s που περισσεύουν θα καλυφθούν με την εισαγωγή κενών (stuffing) πακέτων. $1.6 \text{ Mbits/s} = 200 \text{ Kbytes/sec} = (200000/188) \text{ Transport Packets/sec} = \mathbf{1063,8 \text{ TPs/sec}}$.



Code Rate	Useful bitrate (Mbits/s)	Minimum SNR required at the receiver (dB)
1/2	23,7	4,1
2/3	31,6	5,8
3/4	35,6	6,8
5/6	39,6	7,8
7/8	41,5	8,4

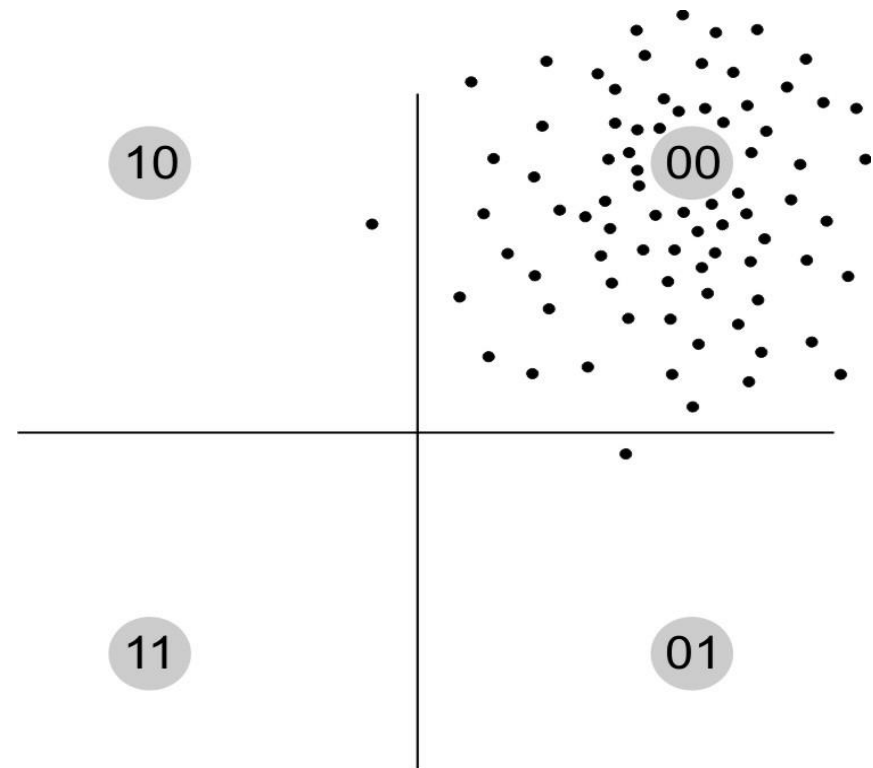
Κριτήριο αξιολόγησης 5

Άσκηση

Σε έναν δέκτη ψηφιακού τηλεοπτικού σήματος (το οποίο εκπέμπεται με διαμόρφωση QPSK), καταγράφονται 80 διαδοχικά σύμβολα που απεικονίζονται στο ακόλουθο διάγραμμα σηματοστερισμού (constellation diagram). Ο πομπός εκπέμπει συνεχώς το σύμβολο «00» ως δοκιμαστικό σήμα.

- a) Ποιο είναι το BER (Bit Error Rate) χωρίς κωδικοποίηση;
- b) Αν υποθεθεί ομοιογενής κατανομή λαθών στα πακέτα μεταφοράς, μπορεί η κωδικοποίηση Reed-Solomon από μόνη της να διορθώσει τα λάθη που προκύπτουν;

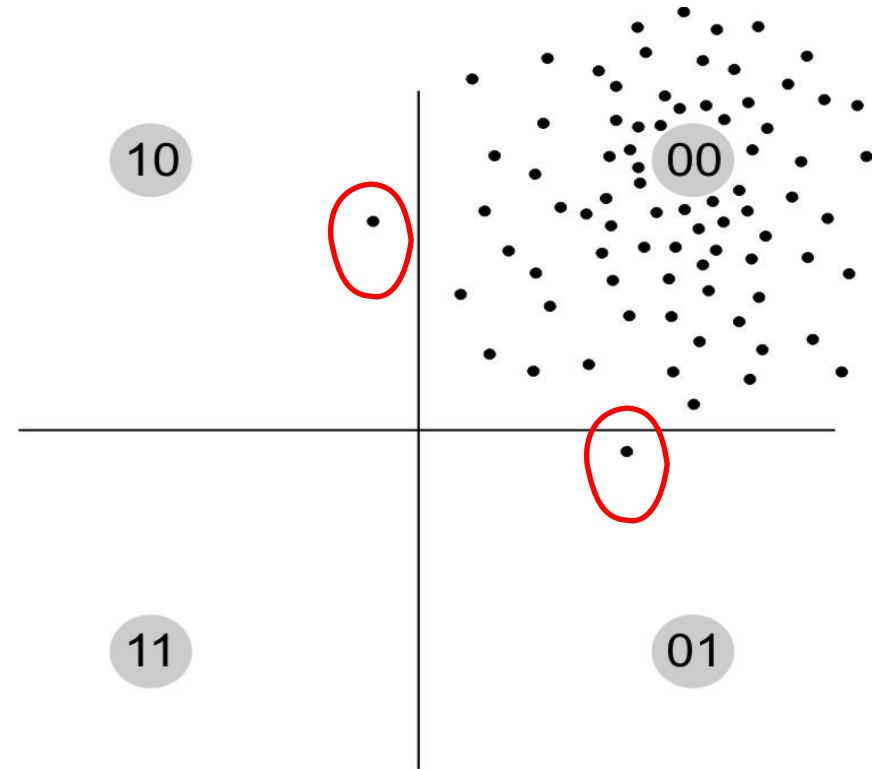
Δίνεται ότι το ποσοστό λανθασμένων bytes (byte error rate - ByER) μπορεί να βρεθεί από το ποσοστό λανθασμένων bits (bit error rate - BER) με τη σχέση: **ByER = 1 – (1-BER)⁸**



Κριτήριο αξιολόγησης 5

Απάντηση / Λύση

- a. Όπως φαίνεται από το σχήμα, από τα 80 σύμβολα τα 78 θα ληφθούν σωστά ως «00», ένα θα ληφθεί λανθασμένα ως «10» (αντί για «00») και ακόμα ένα ως «01» (αντί για «00»). Συνεπώς, στα 160 bits θα ληφθούν δυο bits λανθασμένα. Το BER είναι $2/160 = 1,25 \cdot 10^{-2}$.
- b. $\text{ByER} = 1 - (1 - \text{BER})^8 = 1 - (1 - 1,25 \cdot 10^{-2})^8 = 9,57 \cdot 10^{-2}$. Το κάθε προστατευμένο πακέτο έχει 204 bytes. Θεωρώντας ομοιόμορφη κατανομή των λαθών, κάθε προστατευμένο πακέτο θα λαμβάνεται με κατά μέσο ορό $204 \cdot (9,57 \cdot 10^{-2}) = \mathbf{19,52 \text{ λανθασμένα bytes}}$. Επειδή ο αλγόριθμος R-S μπορεί να διορθώσει μέχρι και 8 bytes ανά κωδικοποιημένο πακέτο, **ο δέκτης δεν θα μπορέσει να ανακτήσει το Transport Stream.**



Κριτήριο αξιολόγησης 6

Άσκηση

Σε ένα δίκτυο επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης DVB-T, η ελάχιστη τιμή του σηματοθορυβικού λόγου (SNR) που παρατηρείται στους δέκτες των τηλεθεατών είναι 10 dB.

- Ποια είναι η κατάσταση λειτουργίας (σχήμα διαμόρφωσης και ρυθμός κώδικα) που πρέπει να επιλέξουμε στον πομπό ώστε οι δέκτες να μπορούν ανά πάσα στιγμή να αποκωδικοποιήσουν σωστά το Transport Stream;
- Πόσα bits ανά σύμβολο εκπέμπει ο διαμορφωτής;
- Αν θέλουμε να περιλάβουμε 4 τηλεοπτικά προγράμματα MPEG-2 στην πολυπλεξία, ποιο είναι το συνολικό (εικόνα & ήχος) bit rate του κάθε προγράμματος που πρέπει να ορίζουμε στον κωδικοποιητή MPEG-2;

Δίνεται ο πίνακας καταστάσεων λειτουργίας για ένα σύστημα DVB-T.

Modulation	Code Rate	Ωφέλιμο bitrate (Mbits/s)	Ελάχιστο απαιτούμενο SNR στον δέκτη (dB)
QPSK	1/2	5,53	3,1
QPSK	2/3	7,37	4,9
QPSK	3/4	8,29	5,9
QPSK	5/6	9,22	6,9
QPSK	7/8	9,68	7,7
16-QAM	1/2	11,06	8,8
16-QAM	2/3	14,75	11,1
16-QAM	3/4	16,59	12,5
16-QAM	5/6	18,43	13,5
16-QAM	7/8	19,35	13,9
64-QAM	1/2	16,59	14,4
64-QAM	2/3	22,12	16,5
64-QAM	3/4	24,88	18,0
64-QAM	5/6	27,65	19,3
64-QAM	7/8	29,03	20,1

Κριτήριο αξιολόγησης 6

Απάντηση / Λύση

- a. Από τον πίνακα καταστάσεων λειτουργίας, επιλέγουμε **διαμόρφωση 16-QAM και ρυθμό κώδικα 1/2**, που εξασφαλίζει μέγιστο ωφέλιμο bitrate και σωστή λειτουργία για $\text{SNR} > 10\text{dB}$.
- b. Χρησιμοποιείται διαμόρφωση 16-QAM, στην οποία αντιστοιχίζονται **4 bits ανά σύμβολο**.
- c. Από τον πίνακα φαίνεται ότι η κατάσταση λειτουργίας (16-QAM, 1/2) προσφέρει ωφέλιμο bitrate ίσο με 11,06 Mbps. Για να χρησιμοποιήσουμε αυτή τη χωρητικότητα για την εκπομπή μιας πολυπλεξίας 4 προγραμμάτων MPEG-2, το κάθε πρόγραμμα θα πρέπει να χρησιμοποιεί $11,06/4 = \mathbf{2,765 \text{ Mbps}}$.

Modulation	Code Rate	Ωφέλιμο bitrate (Mbps/s)	Ελάχιστο απαιτούμενο SNR στον δέκτη (dB)
QPSK	1/2	5,53	3,1
QPSK	2/3	7,37	4,9
QPSK	3/4	8,29	5,9
QPSK	5/6	9,22	6,9
QPSK	7/8	9,68	7,7
16-QAM	1/2	11,06	8,8
16-QAM	2/3	14,75	11,1
16-QAM	3/4	16,59	12,5
16-QAM	5/6	18,43	13,5
16-QAM	7/8	19,35	13,9
64-QAM	1/2	16,59	14,4
64-QAM	2/3	22,12	16,5
64-QAM	3/4	24,88	18,0
64-QAM	5/6	27,65	19,3
64-QAM	7/8	29,03	20,1

Κριτήριο αξιολόγησης 7

Άσκηση

Σε ένα δίκτυο επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης (DVB-T) καταγράφεται για μια μεγάλη χρονική περίοδο ο σηματοθορυβικός λόγος στους δέκτες. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Η απαίτηση είναι το σήμα να λαμβάνεται σωστά από τουλάχιστον 95% των δεκτών.

- Να επιλεγεί η κατάσταση λειτουργίας στον πομπό
- Στην επίγεια τηλεοπτική πολυπλεξία θέλουμε να συμπεριλάβουμε 3 τηλεοπτικά προγράμματα. Αν το bitrate του ήχου για κάθε πρόγραμμα είναι 384kbps και το συνολικό bitrate για τις πληροφορίες προγράμματος είναι 110kbps, σε ποιο bitrate κωδικοποίησης εικόνας (BR_v) πρέπει να ρυθμιστούν οι κωδικοποιητές MPEG-2;

Δίνεται ο πίνακας καταστάσεων λειτουργίας για ένα σύστημα DVB-T.

SNR	Ποσοστό δεκτών
< 12 dB	5%
12 – 14 dB	35%
14 – 16 dB	30%
16 – 18 dB	25%
> 18 dB	5%

Modulation	Code Rate	Ωφέλιμο bitrate (Mbits/s)	Ελάχιστο απαιτούμενο SNR στον δέκτη (dB)
QPSK	1/2	5,53	3,1
QPSK	2/3	7,37	4,9
QPSK	3/4	8,29	5,9
QPSK	5/6	9,22	6,9
QPSK	7/8	9,68	7,7
16-QAM	1/2	11,06	8,8
16-QAM	2/3	14,75	11,1
16-QAM	3/4	16,59	12,5
16-QAM	5/6	18,43	13,5
16-QAM	7/8	19,35	13,9
64-QAM	1/2	16,59	14,4
64-QAM	2/3	22,12	16,5
64-QAM	3/4	24,88	18,0
64-QAM	5/6	27,65	19,3
64-QAM	7/8	29,03	20,1

Κριτήριο αξιολόγησης 7

Απάντηση / Λύση

- a. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνεται ότι στο 95% των δεκτών το SNR είναι τουλάχιστον 12 dB. Πρέπει να επιλεγεί η κατάσταση λειτουργίας που μπορεί να επιτύχει το μέγιστο δυνατό ωφέλιμο bit rate και σωστή λήψη για SNR > 12dB. Συνεπώς, με βάση τον πίνακα καταστάσεων λειτουργίας επιλέγουμε **διαμόρφωση 16-QAM και ρυθμό κώδικα 2/3**.
- b. Από τον πίνακα καταστάσεων λειτουργίας φαίνεται ότι στην κατάσταση που επιλέχτηκε (16-QAM, 2/3), το μέγιστο ωφέλιμο bitrate είναι 14,75 Mbps. Αν BR_V είναι το ζητούμενο bitrate της κωδικοποιημένης εικόνας για κάθε πρόγραμμα MPEG-2, θα πρέπει:

$$3 \times (BR_V + 0,384) + 0,110 = 14,75 \Rightarrow \\ \Rightarrow BR_V = \mathbf{4,49Mbps}$$

Modulation	Code Rate	Ωφέλιμο bitrate (Mbps/s)	Ελάχιστο απαιτούμενο SNR στον δέκτη (dB)
QPSK	1/2	5,53	3,1
QPSK	2/3	7,37	4,9
QPSK	3/4	8,29	5,9
QPSK	5/6	9,22	6,9
QPSK	7/8	9,68	7,7
16-QAM	1/2	11,06	8,8
16-QAM	2/3	14,75	11,1
16-QAM	3/4	16,59	12,5
16-QAM	5/6	18,43	13,5
16-QAM	7/8	19,35	13,9
64-QAM	1/2	16,59	14,4
64-QAM	2/3	22,12	16,5
64-QAM	3/4	24,88	18,0
64-QAM	5/6	27,65	19,3
64-QAM	7/8	29,03	20,1

Κριτήριο αξιολόγησης 8

Άσκηση

Υπολογίστε την μέγιστη απόσταση μεταξύ πομπών σε ένα SFN του DVB-T με εύρος ζώνης καναλιού 8 MHz, το οποίο λειτουργεί σε 8K mode και έχει Guard Interval 1/8.

Κριτήριο αξιολόγησης 8

Απάντηση / Λύση

Αρχικά, από τον Πίνακα της διαφάνειας 50 (Χαρακτηριστικά των δύο τρόπων 8K και 2K), βρίσκω ότι για κανάλι με εύρος ζώνης 8 MHz η απόσταση συχνότητας μεταξύ των φερόντων με το χαμηλότερο και τον υψηλότερο δείκτη είναι 7.61 MHz, και ότι σε αυτό το mode λειτουργία έχω 6816 φέρουσες.

- Με βάση αυτά υπολογίζω την απόσταση συχνότητας μεταξύ των φερουσών ($1/T_u$ – carrier spacing) η οποία είναι:

$$\begin{aligned}\text{Bandwidth kHz} / \text{Number of Carriers (FFT size)} &= \text{Carrier Spacing Hz (cs)} \\ 7.61 * 10^6 / 6816 \text{ (8K mode)} &= \mathbf{1116.5 \text{ Hz (cs)}}$$

- Στην συνέχεια υπολογίζω την συνολική διάρκεια του συμβόλου, η οποία είναι ίση με το αντίστροφο του carrier spacing:

$$\begin{aligned}1 / \text{carrier spacing (cs)} &= \text{Total Symbol Duration (T}_u\text{)} \\ 1 / 1116.5 \text{ Hz} &= 0.000895656 \text{ seconds} = 895.656 \mu\text{s (T}_u\text{)}$$

- Έπειτα υπολογίζω την διάρκεια του διαστήματος προστασίας (Guard Interval)

$$\begin{aligned}T_u * \text{Guard Interval (Gi)} &= \text{Guard interval in Microseconds (Gin)} \\ 895.656 \mu\text{s} * (1/8) &= 895.656 \mu\text{s} * .125 = 111.957 \mu\text{s (Gin)}$$

- Τέλος, με βάση την διάρκεια του Guard Interval υπολογίζω την μέγιστη απόσταση κάνοντας χρήση της ταχύτητας διάδοσης των σημάτων (ταχύτητα φωτός)

$$\begin{aligned}\text{Guard Interval} * \text{Velocity of Light (Vo)} &= \text{The distance in km} \\ 111.957 \mu\text{s} * (300 * 10^6) &= .00022387 * 300000 = \mathbf{33.587 \text{ km}} \text{ (σύγκρινε με διαφάνεια 68)}$$

Κριτήριο αξιολόγησης 9

Άσκηση

Υπολογίστε την μέγιστη απόσταση μεταξύ πομπών σε ένα SFN του DVB-T με εύρος ζώνης καναλιού 8 MHz, το οποίο λειτουργεί σε 8K mode και έχει Guard Interval 1/4.

Χαρακτηριστικά	Τρόπος 8K	Τρόπος 2K
Πλήθος φερόντων	6.817	1.705
Δείκτης χαμηλότερου φέροντος	0	0
Δείκτης υψηλότερου φέροντος	6816	1704
Διάρκεια συμβόλου T_u	896 μs	224 μs
Απόσταση συχνότητας μεταξύ των φερόντων ($1/T_u$)	1.116 Hz	4.464 Hz
Απόσταση συχνότητας μεταξύ των φερόντων με το χαμηλότερο και τον υψηλότερο δείκτη (για κανάλι 8 MHz)	7,61 MHz	7,61 MHz

Χαρακτηριστικά των δύο τρόπων 8K και 2K

Κριτήριο αξιολόγησης 9

Απάντηση / Λύση

Αρχικά, από τον Πίνακα της διαφάνειας 48 (Χαρακτηριστικά των δύο τρόπων 8K και 2K), βρίσκω ότι για κανάλι με εύρος ζώνης 8 MHz η απόσταση συχνότητας μεταξύ των φερόντων με το χαμηλότερο και τον υψηλότερο δείκτη είναι 7.61 MHz, και ότι σε αυτό το mode λειτουργία έχω 6816 φέρουσες.

- Με βάση αυτά υπολογίζω την απόσταση συχνότητας μεταξύ των φερουσών ($1/T_u$ – carrier spacing) η οποία είναι:

$$\text{Bandwidth kHz} / \text{Number of Carriers (FFT size)} = \text{Carrier Spacing Hz (cs)}$$
$$7.61 * 10^6 / 6816 \text{ (8K mode)} = \mathbf{1116.5 \text{ Hz (cs)}}$$

- Στην συνέχεια υπολογίζω την συνολική διάρκεια του συμβόλου, η οποία είναι ίση με το αντίστροφο του carrier spacing:

$$1 / \text{carrier spacing (cs)} = \text{Total Symbol Duration (T}_u\text{)}$$
$$1 / 1116.5 \text{ Hz} = 0.000895656 \text{ seconds} = \mathbf{895.656 \mu\text{s (T}_u\text{)}}$$

- Έπειτα υπολογίζω την διάρκεια του διαστήματος προστασίας (Guard Interval)

$$T_u * \text{Guard Interval (Gi)} = \text{Guard interval in Microseconds (Gin)}$$
$$895.656 \mu\text{s} * (1/4) = 895.656 \mu\text{s} * .25 = \mathbf{223.914 \mu\text{s (Gin)}}$$

- Τέλος, με βάση την διάρκεια του Guard Interval υπολογίζω την μέγιστη απόσταση κάνοντας χρήση της ταχύτητας διάδοσης των σημάτων (ταχύτητα φωτός)

$$\text{Guard Interval} * \text{Velocity of Light (Vo)} = \text{The distance in km}$$
$$223.914 \mu\text{s} * (300 * 10^6) = .00022387 * 300000 = \mathbf{67.174 \text{ km}} \text{ (σύγκρινε με διαφάνεια 68)}$$

Κριτήριο αξιολόγησης 10

Άσκηση

Ποιο από τα παρακάτω είναι Σωστό και ποιο είναι Λάθος για ένα σύστημα SFN επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης;

	Σωστό	Λάθος
Καλύτερη εκμετάλλευση του φάσματος		
Δυνατότητα προσθήκης τοπικών τηλεοπτικών προγραμμάτων και προσωπικών υπηρεσιών		
Κατανομή της εκπεμπόμενης ισχύος		
Μεγαλύτερος ρυθμός μετάδοσης λόγω της χρήσης μεγάλου Guard Interval.		
Οι κινούμενοι δέκτες δεν χρειάζεται να επανασυντονίζονται σε νέα συχνότητα/κανάλι καθώς κινούνται μέσα στην επικράτεια.		

Κριτήριο αξιολόγησης 10

- Απάντηση / Λύση

	Σωστό	Λάθος
Καλύτερη εκμετάλλευση του φάσματος	✓	
Δυνατότητα προσθήκης τοπικών τηλεοπτικών προγραμμάτων και προσωπικών υπηρεσιών		✓
Κατανομή της εκπεμπόμενης ισχύος	✓	
Μεγαλύτερος ρυθμός μετάδοσης λόγω της χρήσης μεγάλου Guard Interval.		✓
Οι κινούμενοι δέκτες δεν χρειάζεται να επανασυντονίζονται σε νέα συχνότητα/κανάλι καθώς κινούνται μέσα στην επικράτεια.	✓	

Βιβλιογραφία και βασικές πηγές

Βιβλιογραφία και βασικές πηγές

Προτεινόμενη βιβλιογραφία

1. Παπαδάκης, Α., 2015. Ψηφιακή τηλεόραση. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα:Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/5005>
2. A. G. Sennitt. World Radio and TV Handbook Volume 49, Billboard Books, 1995.
3. International Telecommunication Union in Recommendation ITU-R. BT.470-6, Conventional Television Systems (PAL definition). International Telecommunication Union, 1998.
4. International Telecommunications Union Recommendation ITU-R. BT.470-6 Conventional Television Systems, Annex 2. International Telecommunication Union, 1998.
5. Comité consultatif international pour la radio (CCIR). Report 308-2 Part 2 Chapter XII — Characteristics of Monochrome Television Systems. Comité consultatif international pour la radio, 1970.
6. European Broadcasting Union. Tech. 3213-E.: E.B.U. Standard for Chromaticity Tolerances for Studio Monitors. European Broadcasting Union, 1975.
7. Digital Video Broadcasting. Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television (DVB-T). Digital Video Broadcasting, 2015.
8. Digital Video Broadcasting (DVB); DVB mega-frame for Single Frequency Network (SFN) synchronization, ETSI TS 101 191 V1.4.1 (2004-06) Technical Specification
9. TR 101 190 V1.1.1 (1997-12), Technical Report, Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for DVB terrestrial services; Transmission aspects.
10. SFN frequency planning and network implementation with regard to T-DAB and DVB-T, TR 24, Geneva, October 2013.
11. Steven Rossiter, TV Network planning, SFN design guidelines, GAP fillers, SFN'S applications,
12. <https://www.gatesair.com/webinars/tv-network-planning-sfn-design-guidelines-gap-fillers-and-sfns-applications>
13. Rich Redmond, Single Frequency Network Structural Aspects & Practical Field Considerations, November 2011

Συναφή επιστημονικά περιοδικά

1. IEEE Communications Magazine, ComSoc
2. IEEE Transactions on Broadcasting
3. International Journal of Digital Television, Intellect

Παράρτημα

Μετάδοση OFDM

Η έκφραση για ένα OFDM σύμβολο το οποίο ξεκινάει τη χρονική στιγμή $t = t_s$ δίνεται παρακάτω:

$$\left. \begin{aligned} s(t) &= \operatorname{Re} \left\{ \sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+N_s/2} \exp \left(j 2\pi \left(f_c - \frac{i+0.5}{T} \right) (t-t_s) \right) \right\}, \quad t_s \leq t \leq t_s + T \\ s(t) &= 0, \quad t < t_s \quad \wedge \quad t > t_s + T \end{aligned} \right\} \quad (\Pi.1)$$

- Όπου όπου d_i είναι σύνθετα σύμβολα διαμόρφωσης, N_s είναι ο αριθμός των υποφερόντων, T αντιστοιχεί στη διάρκεια του συμβόλου και f_c είναι η φέρουσα συχνότητα.

Μετάδοση OFDM

Μία συγκεκριμένη μορφή της προηγούμενης σχέσης (Π.1) αντιστοιχεί στο πρότυπο DVB-T ως το σήμα εκπομπής. Η έκφραση είναι η εξής:

$$s(t) = \text{Re} \left\{ e^{j2\pi f_c t} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{67} \sum_{k=K_{\min}}^{K_{\max}} c_{m,l,k} \times \psi_{m,l,k}(t) \right\} \quad (\text{Π.2})$$

όπου

$$\psi_{m,l,k}(t) = \begin{cases} e^{j2\pi \frac{k'}{T_U} (t - \Delta - l \cdot T_S - 68 \cdot m \cdot T_S)} & (l + 68 \cdot m) \cdot T_S \leq t \leq (l + 68 \cdot m + 1) \cdot T_S \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (\text{Π.3})$$

όπου

- k δηλώνει τον αριθμό φέροντος
- l δηλώνει τον αριθμό συμβόλου OFDM
- m δηλώνει τον αριθμό του πλαισίου μετάδοσης
- K είναι ο αριθμός των μεταδιδόμενων φερόντων
- T_S είναι η διάρκεια συμβόλου (συνολική μαζί με το διάστημα «φρουρό»)
- T_U είναι το αντίστροφο του διαστήματος φερόντων
- Δ είναι η διάρκεια του διαστήματος φρουρού
- f_c είναι η κεντρική συχνότητα του RF σήματος
- k' είναι ο δείκτης φέροντος που σχετίζεται με την κεντρική συχνότητα με την εξής σχέση, $k' = k - (K_{\max} + K_{\min}) / 2$
- $c_{m,0,k}$ μιγαδικό σύμβολο για το φέρον k του συμβόλου δεδομένου αρ.1 στο πλαίσιο m
- $c_{m,1,k}$ μιγαδικό σύμβολο για το φέρον k του συμβόλου δεδομένου αρ.2 στο πλαίσιο m
- ...
- $c_{m,67,k}$ μιγαδικό σύμβολο για το φέρον k του συμβόλου δεδομένου αρ.68 στο πλαίσιο m

Μετάδοση OFDM

Αν λάβουμε υπόψη τη σχέση (Π.2) για την περίοδο από $t = 0$ έως $t = T_s$ παίρνουμε:

$$\left. \begin{aligned} s(t) &= \text{Re} \left\{ e^{j2\pi f_c t} \sum_{k=K_{\min}}^{K_{\max}} c_{0,0,k} e^{j2\pi k'(t-\Delta)/T_U} \right\} \\ \text{with } k' &= k - (K_{\max} + K_{\min})/2. \end{aligned} \right\} \quad (\text{Π.4})$$

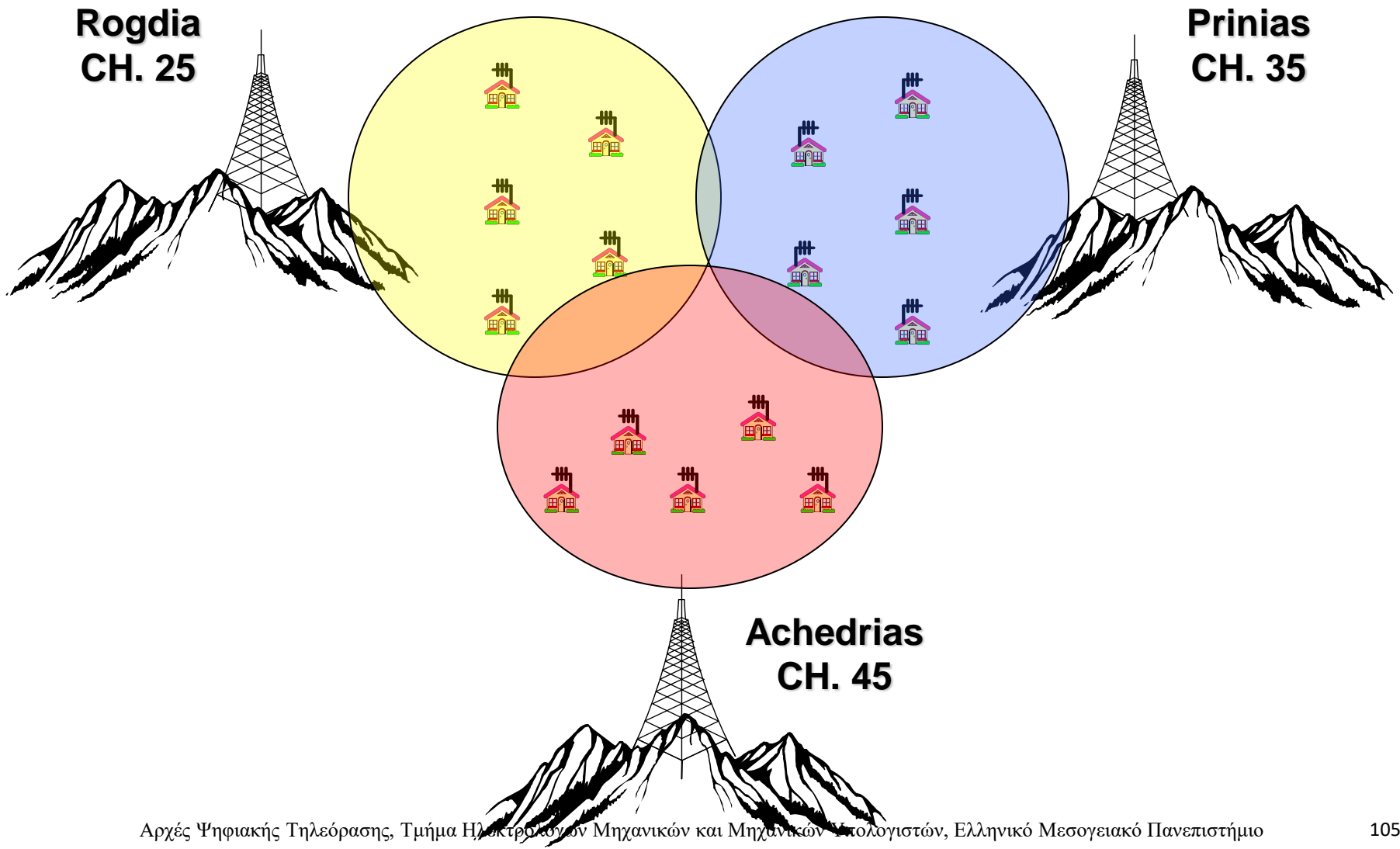
Υπάρχει ξεκάθαρη ομοιότητα μεταξύ της παραπάνω σχέσης (Π.4) και του Αντίστροφου Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier (IDFT):

$$\left. X_n = \frac{1}{N} \sum_{q=0}^{N-1} X_q e^{j2\pi \frac{nq}{N}} \right\} \quad (\text{Π.5})$$

Από τη στιγμή που υπάρχουν διάφοροι αποδοτικοί FFT αλγόριθμοι για να εκτελέσουν τον DFT και τον IDFT, είναι βολικό να παράγουμε N δείγματα X_n που αντιστοιχούν στο χρήσιμο μέρος κάθε συμβόλου, διάρκειας T_U . Παίρνοντας αντίγραφα των $(N \cdot \Delta / T_U)$ μερών αυτών των δειγμάτων και βάζοντάς τα στο μπροστινό μέρος προκύπτει το διάστημα φύλαξης (guard interval). Μια άνω-μετατροπή (up-conversion) δίνει το πραγματικό σήμα $s(t)$ με κεντρική συχνότητα f_c .

Μονοσυχνοτικά δίκτυα – παράδειγμα

Heraklion is today covered by 3 Transmission Points, each one exploiting a different UHF channel.



Mode	8K mode				2K mode			
	Guard Interval							
	1/4	1/8	1/16	1/32	1/4	1/8	1/16	1/32
8 MHz channel	224 μ S	112 μ S	56 μ S	28 μ S	56 μ S	28 μ S	14 μ S	7 μ S
7 MHz channel	256 μ S	128 μ S	64 μ S	32 μ S	64 μ S	32 μ S	16 μ S	8 μ S
6 MHz channel	<i>298.667 μS</i>	<i>149.333 μS</i>	<i>74.667 μS</i>	<i>37.333 μS</i>	<i>74.667 μS</i>	<i>37.333 μS</i>	<i>18.667 μS</i>	<i>9.333 μS</i>
NOTE: values in italics are approximate values								

Table 2.1: Guard interval durations (from ETSI EN 300 744 [5]).

Table 1a: Mega-frame duration for all combinations of channel bandwidth and guard interval proportions

Guard Interval	Channel bandwidth			
	8 MHz	7 MHz	6 MHz	5 MHz
$\Delta / T_U = 1/32$	0,5026560 s	0,5744640 s	0,6702080 s	0,8042496 s
$\Delta / T_U = 1/16$	0,5178880 s	0,5918720 s	<i>0,6905173 s</i>	0,8286208 s
$\Delta / T_U = 1/8$	0,5483520 s	0,6266880 s	0,7311360 s	0,8773632 s
$\Delta / T_U = 1/4$	0,6092800 s	0,6963200 s	<i>0,8123733 s</i>	0,9748480 s
NOTE: Approximate values in <i>Italics</i> .				

proportion to the length of the useful interval	Length of the guard interval	
	8k-mode	2k-mode
1/4	224 μ s	56 μ s
1/8	112 μ s	28 μ s
1/16	56 μ s	14 μ s
1/32	28 μ s	7 μ s