

Συστήματα OFDM & Εφαρμογές

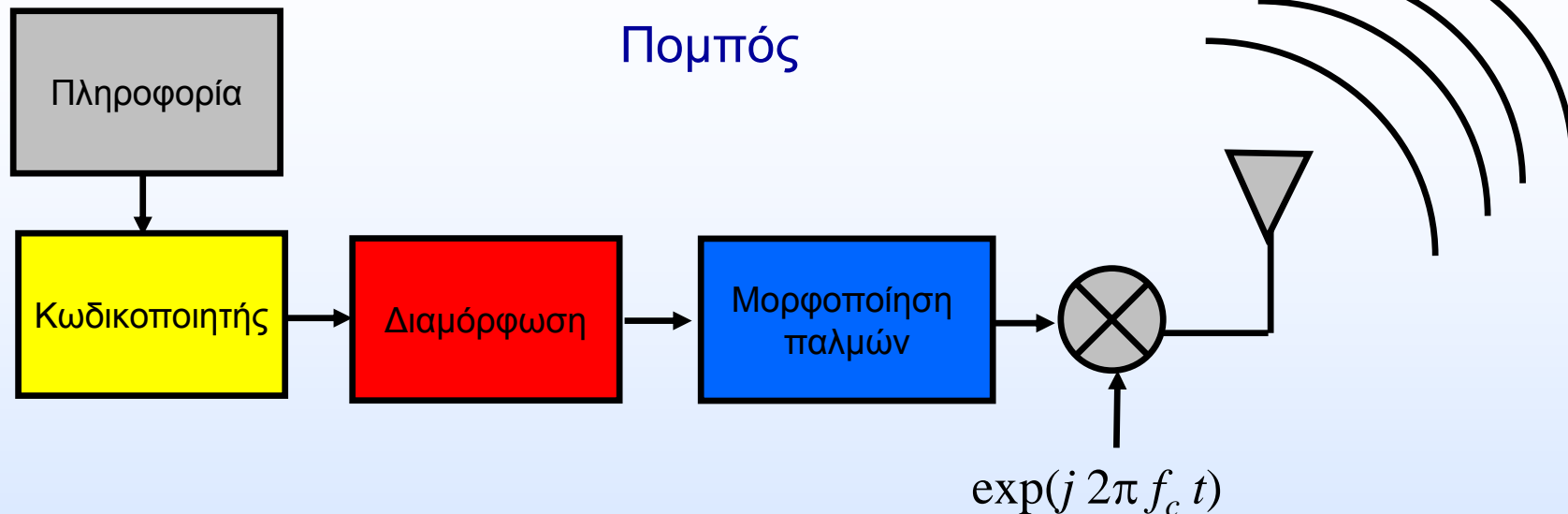
- Σε πολλές περιπτώσεις πρέπει να μεταφέρουμε το ίδιο σήμα μέσα από πολλαπλά κανάλια
- Αυτός ο τρόπος μεταφοράς είναι επιθυμητός σε περιπτώσεις όπου υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η μετάδοση να είναι αναξιόπιστη σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή
- Ασύρματες επικοινωνίες: διαλείψεις
- Στρατιωτικές εφαρμογές: anti-jamming
- Εφαρμογή: Ψηφιακά συστήματα με πολλαπλά φέροντα.

Συστήματα OFDM & Εφαρμογές

<i>Πρότυπο</i>		<i>Συχνότητα φέροντος.</i>	<i>Ρυθμός Μετάδοσης (Mbps)</i>	<i>Εφαρμογές</i>
DAB	Digital Audio Broadcasting	FM radio	0.008-0.384	Audio broadcasting
DVB-T	Digital Video Broadcasting	UHF	3.7-32	Digital TV broadcasting
DVB-H	Digital Video Broadcasting	UHF	13.7	Digital broadcasting to handheld
IEEE 802.11a	Wireless LAN / WiFi	5.2 GHz	6 - 54	Wireless Internet
IEEE 802.11g	Wireless LAN / WiFi	2.4 GHz	6 - 54	Wireless Internet
IEEE 802.11n	Wireless LAN (High Speed)	2.4 GHz - ??	6 - 100	Wireless Internet
IEEE 802.16	Broadband Wireless Access	2.1 GHz & others	0.5 - 20	Fixed / Mobile Wireless Internet
IEEE 802.20	Mobile Broad. Wireless Access	3.5 GHz	~ 1	Mobile Internet / Voice?

- Η βασική αρχή των συστημάτων OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) είναι γνωστή από τη δεκαετία του 60
- Μόλις στη δεκαετία του 90 βρήκε εφαρμογή (για λόγους υλοποίησης)
- Εφαρμογές του OFDM σε πρακτικά ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα
 - ο Broadcast
 - ο Πρόσβαση στο Internet με υψηλή ταχύτητα

Παράδειγμα ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος (1)

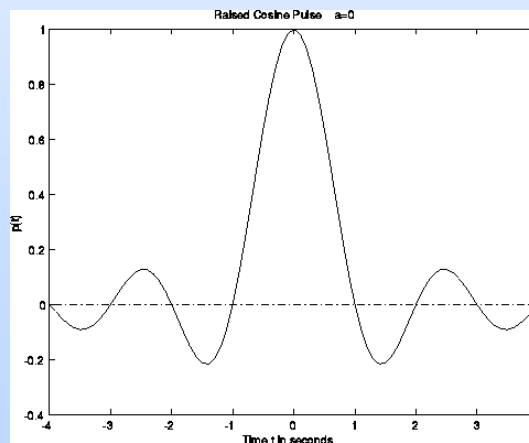


Χαρακτηριστικές τιμές της συχνότητας f_c

FM radio: 88.5-107.7 MHz (0.2 MHz απόσταση μεταξύ σταθμών)

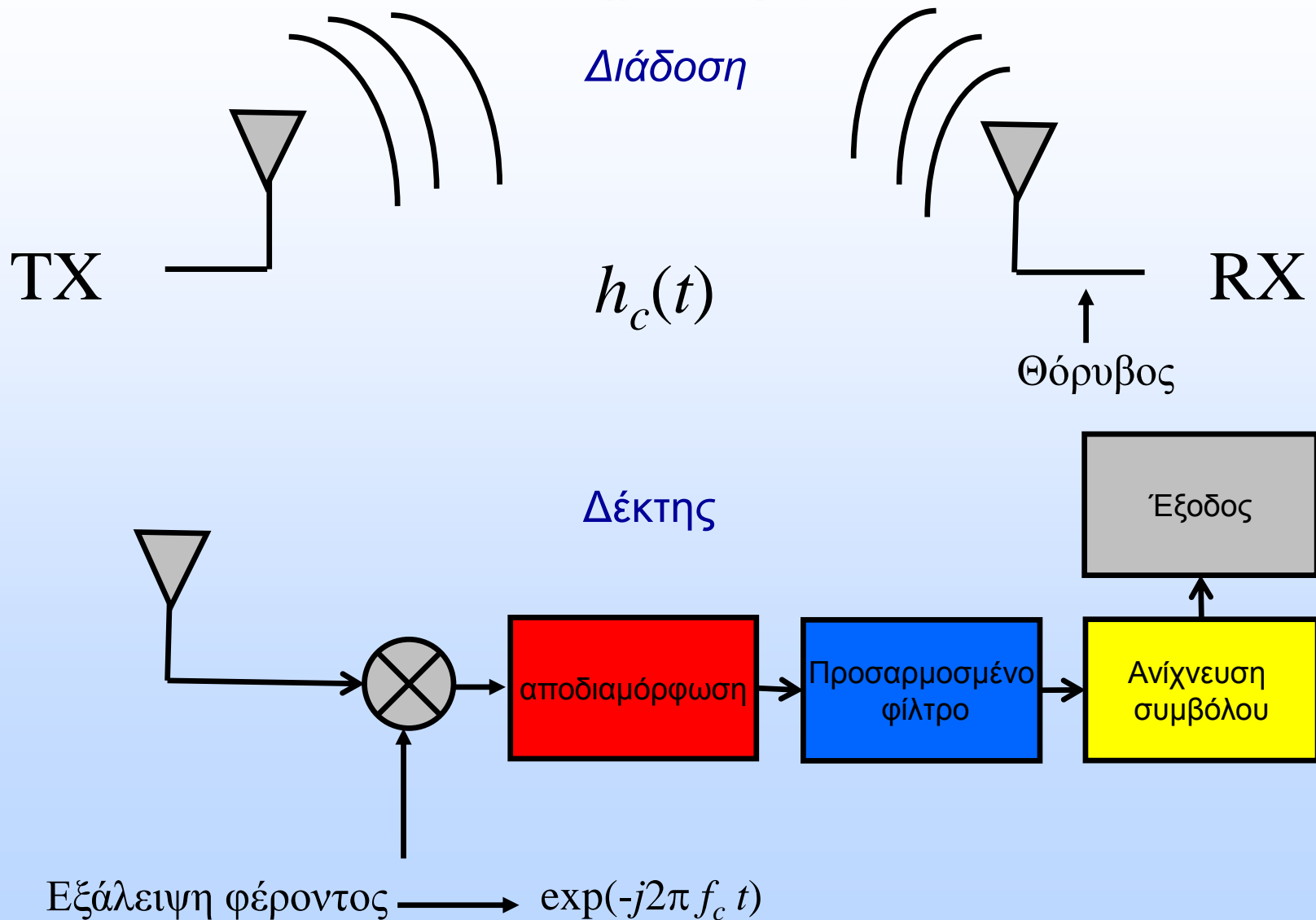
Αναλογικά κυβελωτά συστήματα: 900 MHz

Ψηφιακά κυβελωτά συστήματα: 1.8 GHz

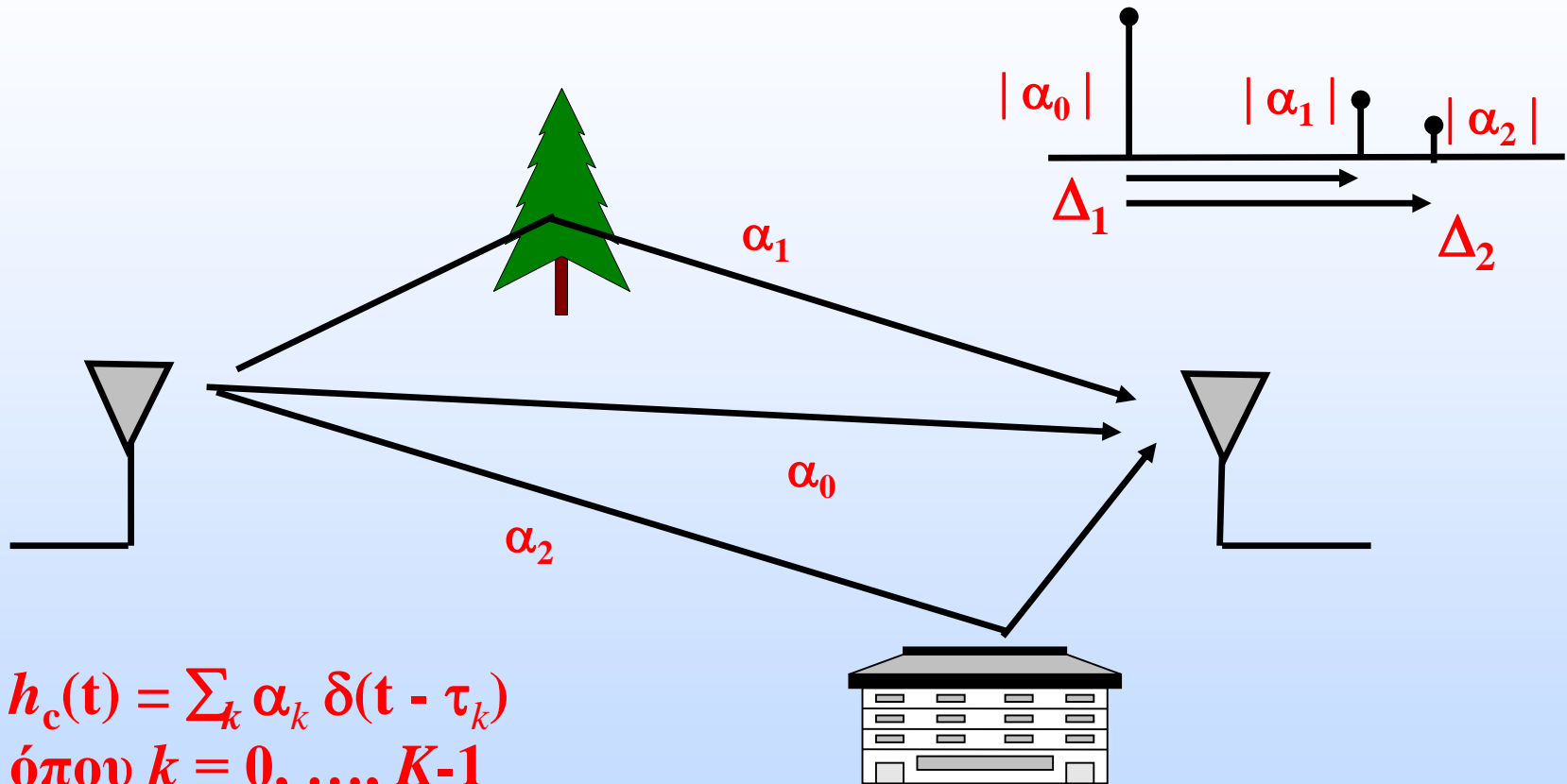


Φίλτρο ανυψωμένου συνημιτόνου

Παράδειγμα ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος (2)



Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών (απλοποιημένο μοντέλο)



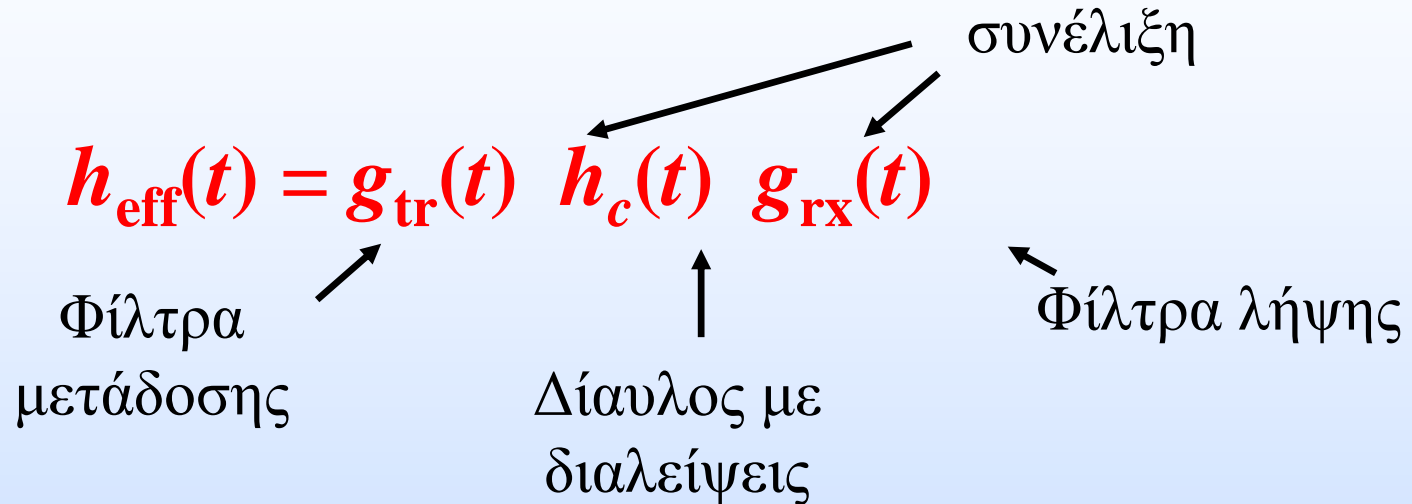
- $h_c(t) = \sum_k \alpha_k \delta(t - \tau_k)$
όπου $k = 0, \dots, K-1$

α_k : παράγοντας κέρδους (μιγαδικός αριθμός)

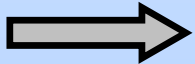
$\tau_k = 0$ Η αντίστοιχη χρονική καθυστέρηση

$\Delta_k = \tau_k - \tau_0$

Ισοδύναμο μοντέλο διαύλου



- **Ισοδύναμο μοντέλο διαύλου λαμβάνει υπ' όψιν:**
 - Φαινόμενα διάδοσης
 - Φίλτρα μετάδοσης / λήψης
- **Η κρουστική απόκριση $h_c(t)$ μεταβάλλεται με τον χρόνο με τυχαίο τρόπο**
- Ανάγκη εκτίμησης του καναλιού στο δέκτη



Φαινόμενο διασυμβολικής παρεμβολής (Inter-Symbol Interference) λόγω διαλείψεων (1)

- Έστω ότι θέλουμε να μεταδώσουμε δυαδικά δεδομένα μέσω του ασύρματου δίαυλου:

- Διάρκεια bit: T_b δευτερόλεπτα
- Παλμός μορφοποίησης $g(t)$, $g(0) = 1$

- Γεννήτρια παλμών παράγει το σήμα:

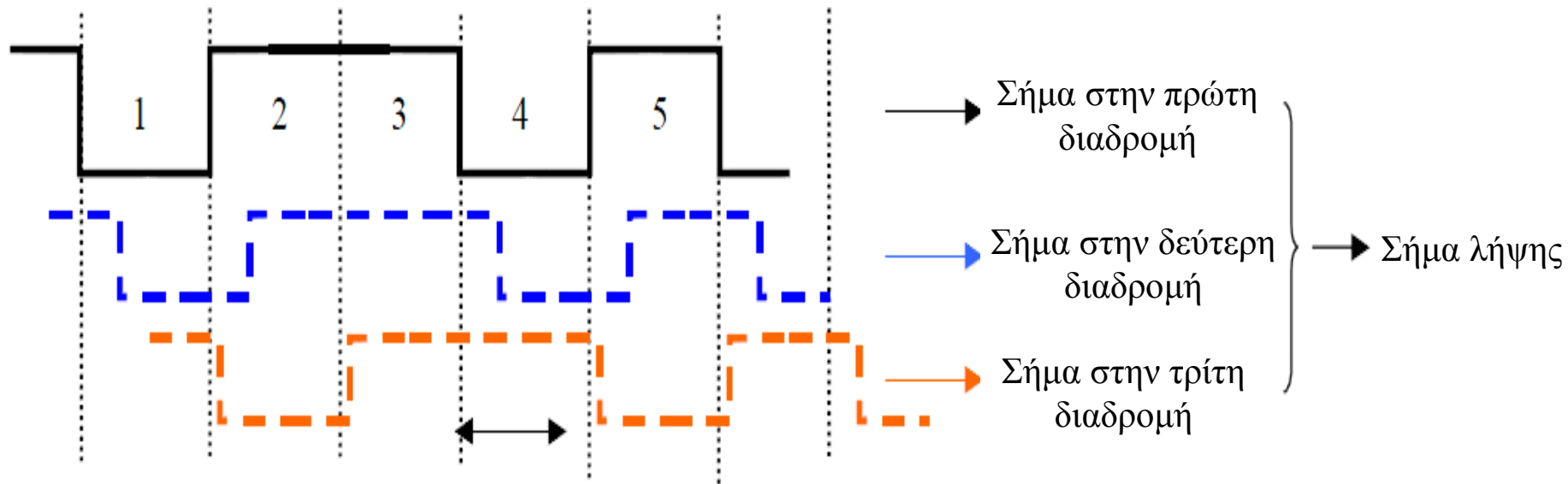
$$x(t) = \sum_k a_k g(t - kT_b)$$

- Η έξοδος του φίλτρου λήψης γράφεται ως

$$y(t) = \sum_k A_k p(t - kT_b) + n(t)$$

- $p(0) = 1$
- $A_k P(f) = a_k G_{TR}(f) H_c(f) G_{RX}(f)$, $n(t)$ θόρυβος
- $P(f)$, $G_{TR}(f)$, $H_c(f)$, $G_{RX}(f)$ οι μετασχηματισμοί Fourier
- Λαμβάνοντας δείγματα του $y(t)$ στις χρονικές στιγμές $t = iT_b$, προκύπτει $y(t_i) = A_i + \sum_{k \neq i} A_k p[(i-k)T_b] + n(t_i)$
- Η επίδραση του δεύτερου όρου είναι διασυμβολική παρεμβολή.

Φαινόμενο διασυμβολικής παρεμβολής (Inter-Symbol Interference) λόγω διαλείψεων (2)

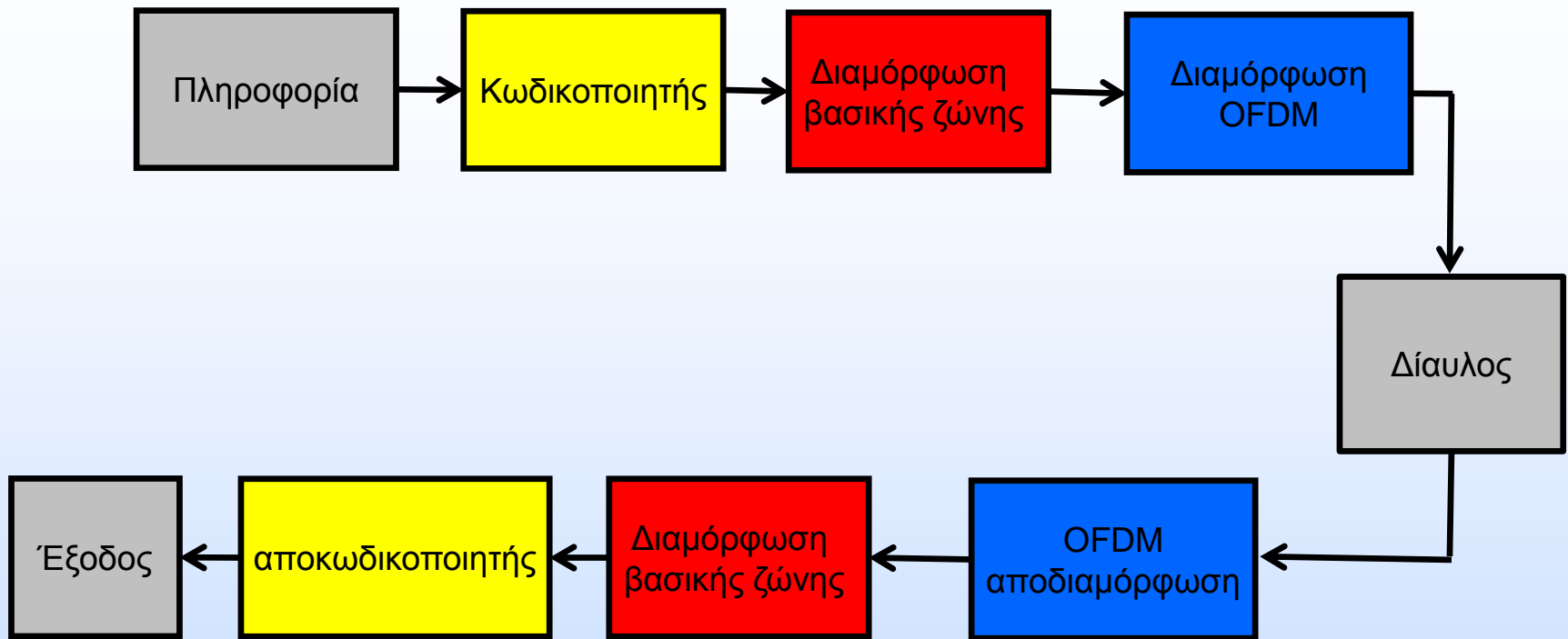


- Το σήμα λήψης σε κάθε χρονική στιγμή εξαρτάται από τον αριθμό των bits που μεταδίδονται
- Κοινή λύση για την εξάλειψη του φαινομένου: Χρήση Ισοσταθμιστή (Equalizer)

Φαινόμενο διασυμβολικής παρεμβολής (Inter-Symbol Interference) λόγω διαλείψεων (3)

- Η δισυμβολική παρεμβολή εισάγει μνήμη στα προς μετάδοση σήματα
- Η διάρκεια του φαινομένου εξαρτάται από τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων R_s
 - $L \approx [R_s T_b] + 1$
- Αύξηση του ρυθμού μετάδοσης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της πολυπλοκότητας του ισοσταθμιστή
 - Υπολογιστική πολυπλοκότητα
 - Καθυστέρηση στην επεξεργασία των δεδομένων
- Η υπολογιστική πολυπλοκότητα και η καθυστέρηση επεξεργασίας μειώνουν το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σε ασύρματα συστήματα .
- Η διαμόρφωση OFDM αποτελεί πιθανή λύση για την επίτευξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης χωρίς την ανάγκη πολύπλοκων ισοσταθμιστών.

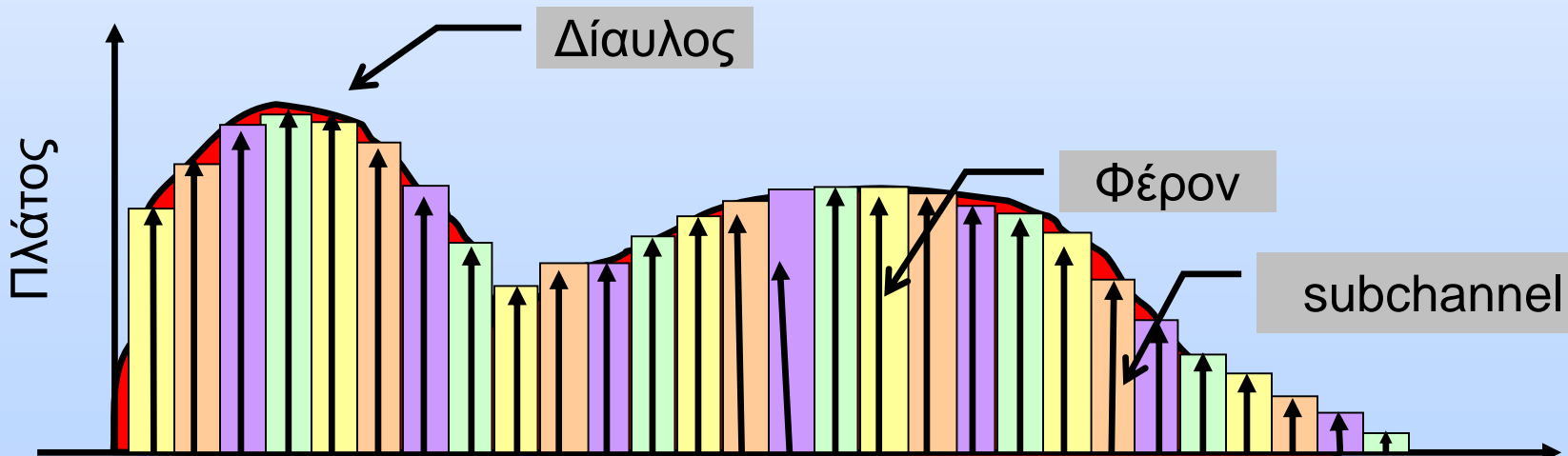
Δομικό διάγραμμα συστήματος OFDM



- Η διαμόρφωση OFDM εφαρμόζεται σε ένα ήδη διαμορφωμένο σήμα.
- Μετασχηματίζει ένα συρμό υψηλού ρυθμού μετάδοσης σε πολλούς συρμούς με χαμηλότερους ρυθμούς μετάδοσης.
- Κάθε τέτοιος συρμός μεταδίδεται μέσω ενός διαφορετικού φέροντος σήματος.

Αρχές συστημάτων OFDM (1)

- Ένα σύστημα OFDM μπορεί να θεωρηθεί συνδυασμός διαμόρφωσης πολλαπλών φερόντων και FSK.
 - Διαμόρφωση FSK: Σε κάθε σύμβολο αντιστοιχίζεται ένα φέρον σήμα από ένα σύνολο ορθογώνιων μεταξύ τους φερόντων σημάτων.
- Η ορθογωνιότητα μεταξύ των φερόντων επιτυγχάνεται διαχωρίζοντας τις συχνότητές τους κατά ακέραια πολλαπλάσια του αντιστρόφου της διάρκειας ενός μεταδιδόμενου συμβόλου
- Όλα τα φέροντα μεταδίδονται ταυτόχρονα
 - Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται ανάλογα η διάρκεια του συμβόλου
 - Μείωση της διασυμβολικής παρεμβολής.



Το εύρος κάθε Subchannel είναι 312 kHz στο 802.11a

Αρχές συστημάτων OFDM (2)

- Η ακολουθία εισόδου καθορίζει το φέρον που θα μεταδοθεί στο συγκεκριμένο διάστημα μετάδοσης:

- $s_i(t) = A \exp(j2\pi f_i t) \Pi(t/T)$, $f_i = f_c + i/T$, $i = 0, 1, \dots, N-1$
- $\Pi(t/T) = 1$, $-T/2 < t < T/2$, 0 αλλού
- N είναι ο συνολικός αριθμός των φερόντων και T η διάρκεια του συμβόλου.

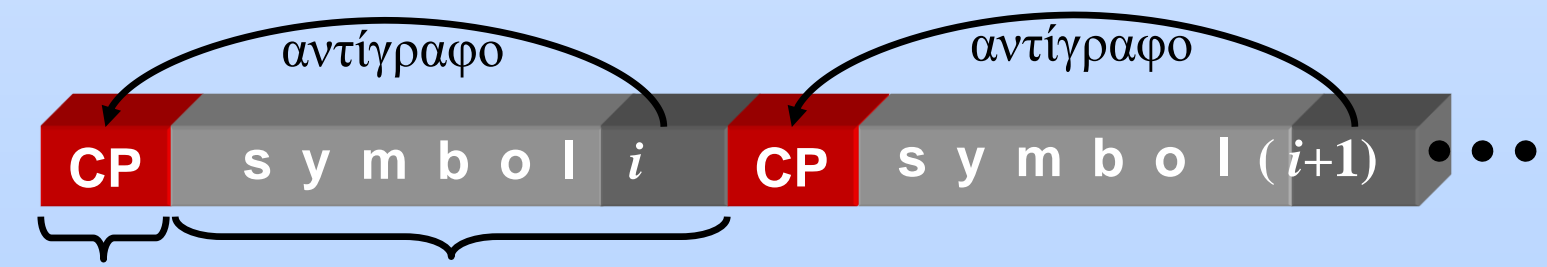
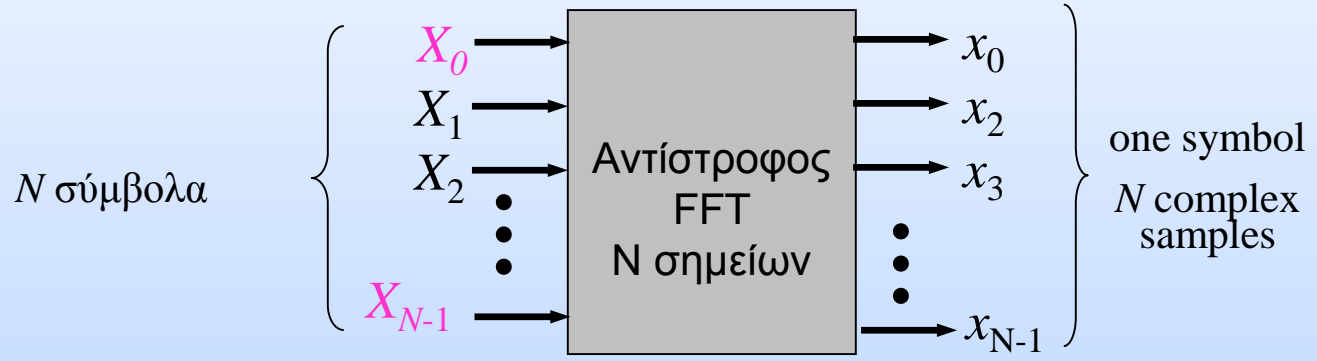
- Ένα σήμα OFDM κατασκευάζεται εισάγοντας παράλληλους συρμούς bits σε κάθε φέρον, κανονικοποιώντας την ενέργεια του σήματος και επεκτείνοντας τη διάρκειά του:

$$\tilde{s}(n) = \frac{A}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i(n) \exp(j2\pi f_i n)$$

- $x_i(n)$ είναι n-οστό bit του i-οστού συρμού
- Η προηγούμενη σχέση είναι στη μορφή αντιστρόφου μετασχηματισμού Fourier

Κυκλικό πρόθεμα (1)

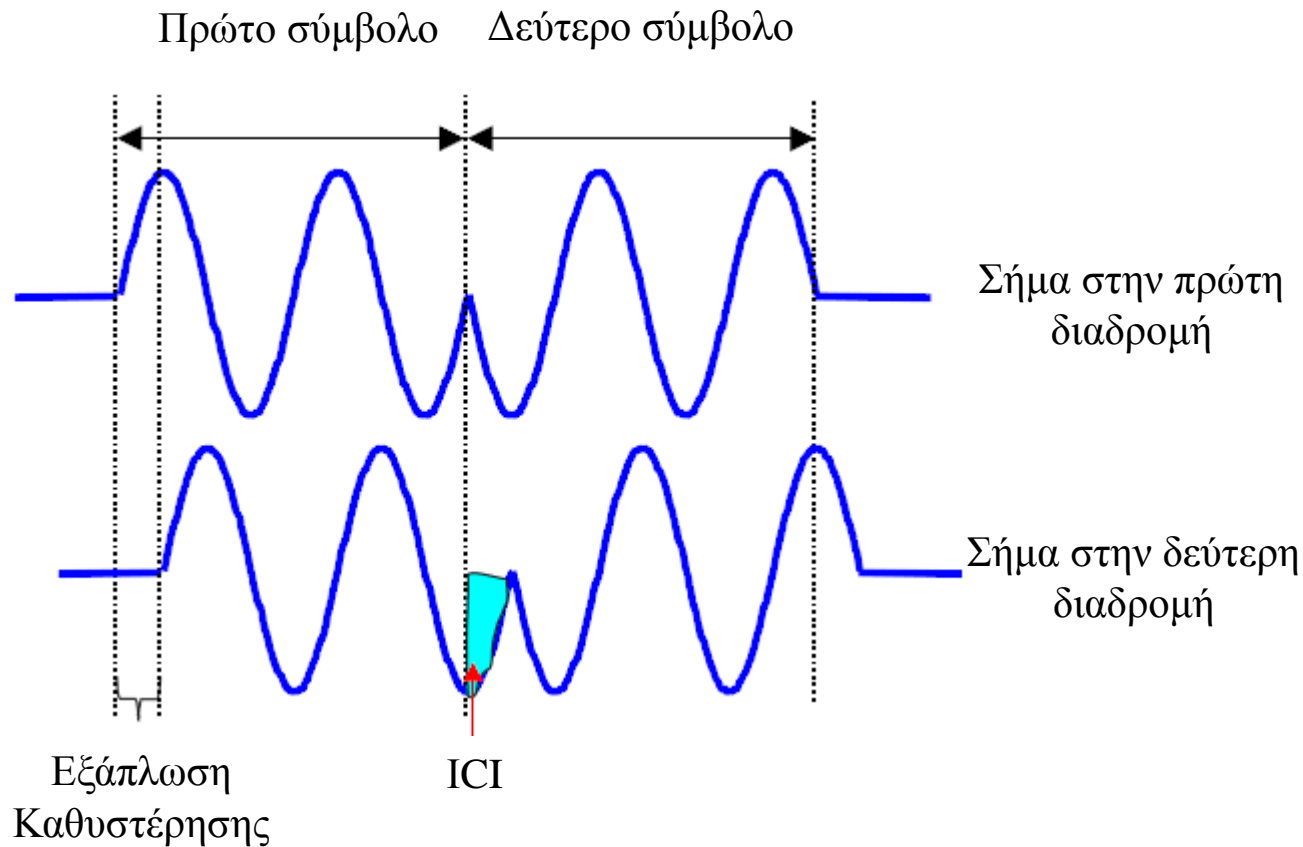
- Πριν τη μετάδοση της παραπάνω ακολουθίας, προστίθεται ένα κυκλικό πρόθεμα (cyclic prefix, CP) στο τέλος της
- Το κυκλικό πρόθεμα αποτελεί αντιγραφή του τελευταίου τμήματος του συμβόλου OFDM
- Αν η διάρκεια του συμβόλου είναι μεγάλη, η εισαγωγή του προθέματος εξαλείφει τη διασυμβολική παρεμβολή
- Εξαλείφεται η ανάγκη για φίλτρο μορφοποίησης παλμού



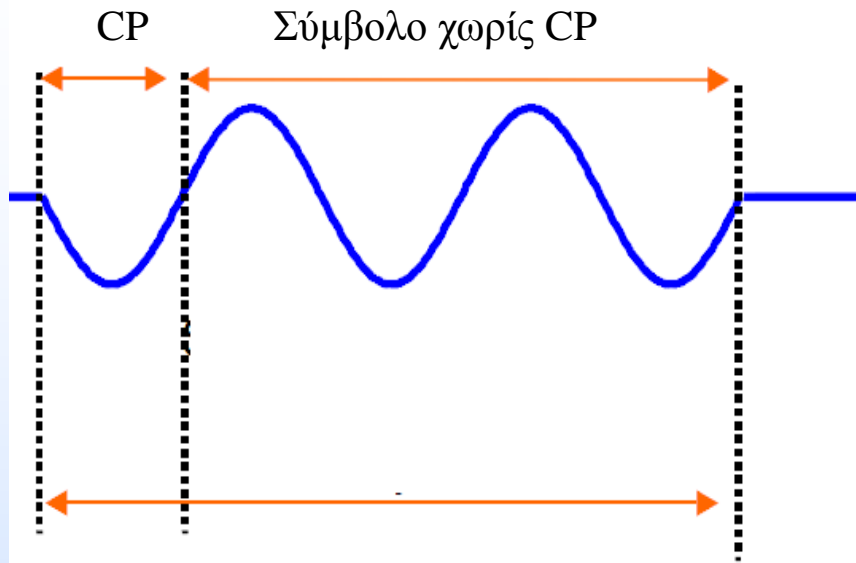
CP: Cyclic Prefix

Κυκλικό πρόθεμα (2)

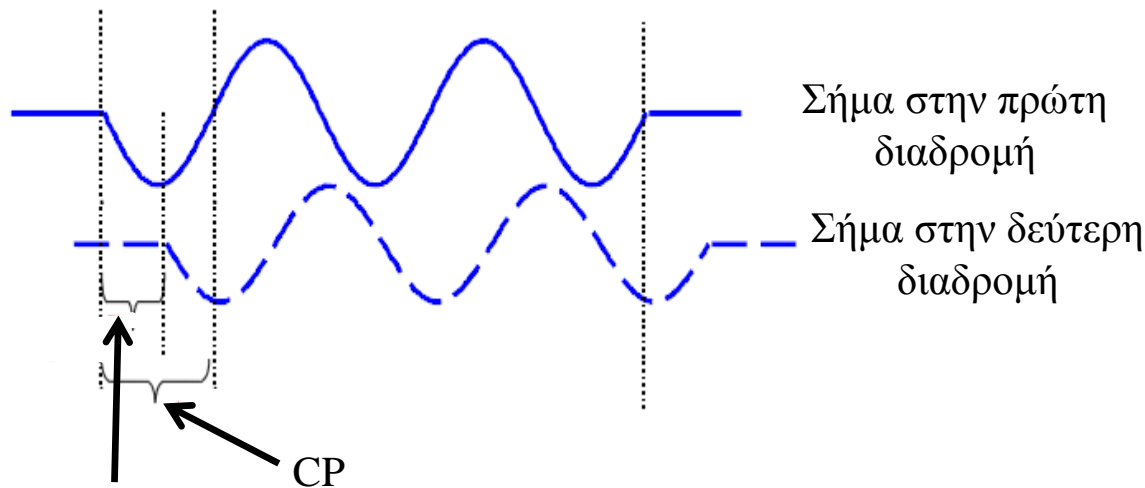
- Στο σχήμα φαίνεται η επίδραση των διαλείψεων σε ένα φέρον του OFDM
- Το σύμβολο λήψης σε μία περίοδο συμβόλου δεν είναι ημιτονοειδές
- Διακαναλική παρεμβολή (Inter-Channel Interference ICI)



Κυκλικό πρόθεμα (3)



- Μικρή απώλεια ισχύος αφού το πρόθεμα δεν μεταφέρει πληροφορία
- Αν η καθυστέρηση πολλαπλών διαδρομών είναι σημαντικά μικρότερη από τη διάρκεια του CP η ICI πρακτικά εξαλείφεται



Καθυστέρηση διαδρομής

Κυκλικό πρόθεμα (4)

- Γενικά: Το κυκλικό πρόθεμα εξυπηρετεί δύο σκοπούς:
- Σαν guard interval εξαλείφει την ISI από το προηγούμενο σύμβολο
- Σαν επανάληψη στο τέλος του κάθε συμβόλου μετατρέπει τη γραμμική συνέλιξη ενός καναλιού επιλεκτικού ως προς τη συχνότητα να μετατραπεί σε κυκλική συνέλιξη, η οποία εκφράζεται στο πεδίο της συχνότητας σαν διακριτός μετασχηματισμός Fourier. Αυτή η προσέγγιση διευκολύνει την ισοστάθμιση και την εκτίμηση του καναλιού
- Το κυκλικό πρόθεμα χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τη διαμόρφωση για να διατηρήσει τις ημιτονοειδείς ιδιότητες των καναλιών πολλαπλών διαδρομών

Κυκλικό πρόθεμα (5)

- Γενικά: Το κυκλικό πρόθεμα εξυπηρετεί δύο σκοπούς:
- Σαν guard interval εξαλείφει την ISI από το προηγούμενο σύμβολο
- Σαν επανάληψη στο τέλος του κάθε συμβόλου μετατρέπει τη γραμμική συνέλιξη ενός καναλιού επιλεκτικού ως προς τη συχνότητα να μετατραπεί σε κυκλική συνέλιξη, η οποία εκφράζεται στο πεδίο της συχνότητας σαν διακριτός μετασχηματισμός Fourier. Αυτή η προσέγγιση διευκολύνει την ισοστάθμιση και την εκτίμηση του καναλιού
- Το κυκλικό πρόθεμα χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τη διαμόρφωση για να διατηρήσει τις ημιτονοειδείς ιδιότητες των καναλιών πολλαπλών διαδρομών

Κυκλικό πρόθεμα (6)

Αρχικό μήνυμα

$$\mathbf{d} = [d_0, d_1, \dots, d_{N-1}]^T$$

Σύμβολο OFDM από IDFT

$$\mathbf{x}' = [x[0], x[1], \dots, x[N-1]]^T$$

Κυκλικό πρόθεμα μήκους $L-1$

$$\mathbf{x} = [x[N-L+1], \dots, x[N-2], x[N-1], x[0], x[1], \dots, x[N-1]]^T$$

Κανάλι

$$\mathbf{h} = [h_0, h_1, \dots, h_{L-1}]^T$$

Έξοδος γραμμική συνέλιξη η οποία μετατρέπεται σε κυκλική

$$y[m] = \sum_{l=0}^{L-1} h[l]x[m-l] \quad L-1 \leq m \leq N-1$$

Αφού το $x[m-l]$ γίνεται $x'[(m-l) \bmod N]$. Μετά από DFT:

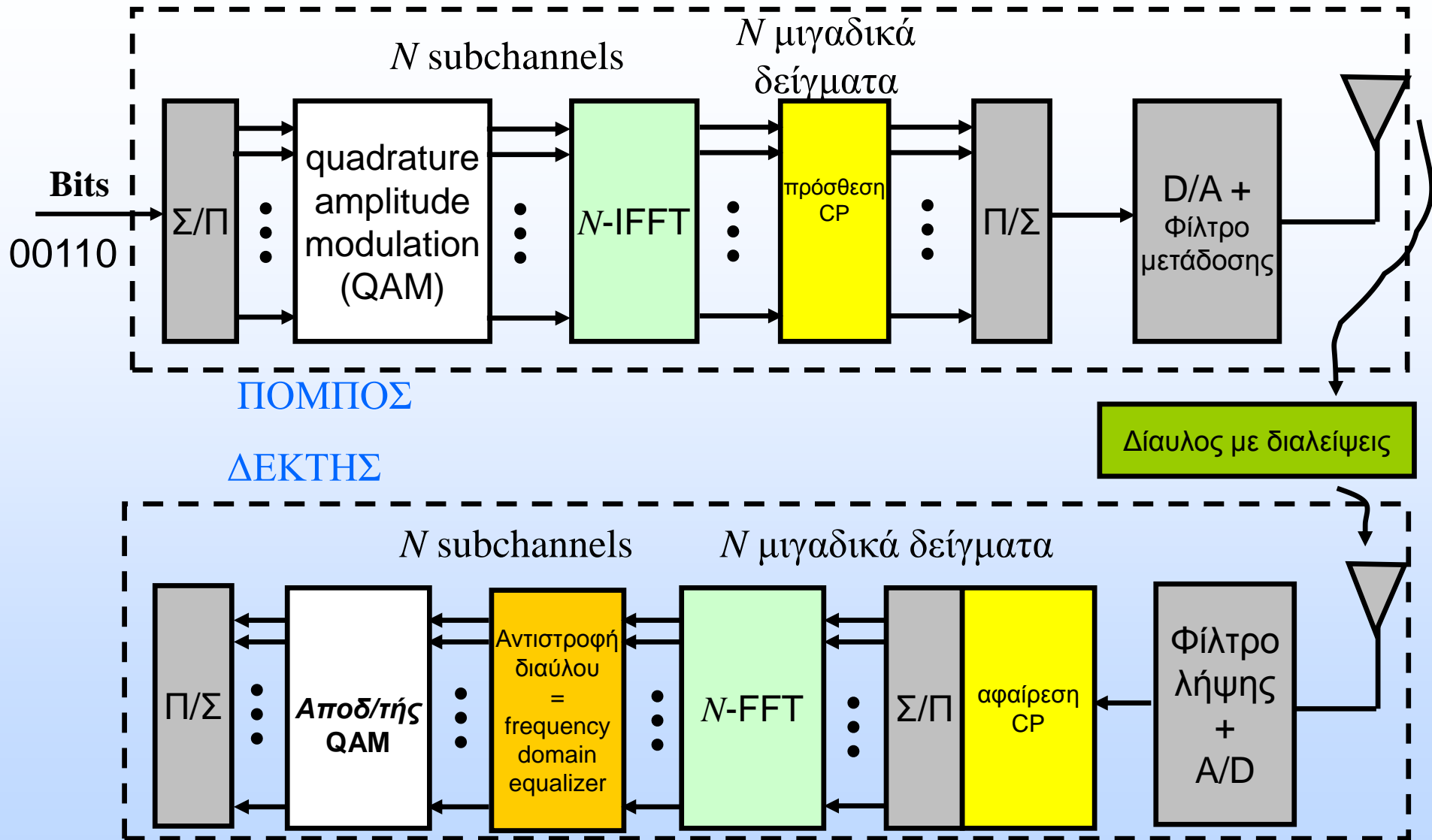
$$Y[k] = H[k] \cdot X[k]$$

Στο πεδίο της συχνότητας το κανάλι το επιλεκτικό ως προς τη συχνότητα διασπάται σε αριθμό από παράλληλα κανάλια. Απλοποίηση του σχεδιασμού του δέκτη και της εκτίμησης του καναλιού

Εφαρμογή

- Υποθέτουμε ότι στέλνουμε 10^6 σύμβολα/sec χρησιμοποιώντας συμβατική διαμόρφωση με ένα φέρον
 - Διάρκεια κάθε συμβόλου 1 μ s.
 - Προβλήματα συγχρονισμού και διασυμβολικής παρεμβολής
- Αν τα σύμβολα αυτά μεταδοθούν μέσω 1000 φερόντων η διάρκεια κάθε συμβόλου αυξάνεται κατά έναν παράγοντα 1000.
- Το εύρος ζώνης μετάδοσης και για τις δύο περιπτώσεις είναι ίδιο.
- Χρησιμοποιούμε χρόνο φύλαξης ίσο με το 1/8 της διάρκειας κάθε συμβόλου
- Δεν υπάρχει διασυμβολική παρεμβολή όταν η εξάπλωση καθυστέρησης (time spread) είναι μικρότερη από το χρόνο φύλαξης (125 μ s).

Παράδειγμα ενός Modem OFDM



Ισοστάθμιση σε συστήματα OFDM

- Ένα σύστημα OFDM το οποίο χρησιμοποιεί κυκλικό πρόθεμα μετασχηματίζει έναν επιλεκτικό ως προς τη συχνότητα δίαυλο με διαλείψεις σε N παράλληλους διαύλους με επίπεδες διαλείψεις
 - N ο αριθμός των φερόντων σημάτων.
- Το γεγονός αυτό καθιστά πολύ ευκολότερη τη διαδικασία της ισοστάθμισης.
 - Ο ισοσταθμιστής πολλαπλασιάζει κάθε φέρον (ουσιαστικά κάθε συντελεστή Fourier) με έναν σταθερό μιγαδικό αριθμό
- Εφαρμογή: Θεωρούμε το προηγούμενο παράδειγμα συστήματος OFDM με $N = 1000$ φέροντα σήματα
- Ο ισοσταθμιστής πραγματοποιεί έναν μιγαδικό πολλαπλασιασμό ανά φέρον και σύμβολο
 - $N = 1000$ μιγαδικοί πολλαπλασιασμοί ανά σύμβολο OFDM
 - $N \log_2 N = 10000$ μιγαδικοί πολλαπλασιασμοί ανά σύμβολο OFDM με χρήση FFT.
- Στην περίπτωση διαμόρφωσης με απλό φέρον και εξάπλωση καθυστέρησης $125\mu s$ απαιτούνται από τον ισοσταθμιστή 125.000 πολλαπλασιασμοί ανά σύμβολο.

Κώδικες διόρθωσης σφαλμάτων σε συστήματα OFDM

- **Η διόρθωση σφαλμάτων είναι απαραίτητη σε συστήματα OFDM**
- **Forward error correction (FEC)**
 - Εισαγωγή επιπρόσθετης πληροφορίας (redundancy) στον προς μετάδοση συρμό δεδομένων
 - Παραδείγματα: Συνελικτικοί κώδικες, Μπλοκ κώδικες
 - Καταπολέμηση της επίδρασης σφαλμάτων που εισάγονται κατά την μετάδοση
 - Μείωση του ρυθμού απόδοσης (throughput) σύμφωνα με το ρυθμό κωδικοποίησης $R = k/n$
- **Automatic repeat request (ARQ)**
 - Προσθήκη δυνατότητας ανίχνευσης σφαλμάτων σε συρμό μετάδοσης
 - Παράδειγμα: 16-bit κυκλικός κώδικας (CRC)
 - Χρησιμοποιείται για ανίχνευση σφαλμάτων σε σύμβολο OFDM
 - Τα εσφαλμένα πακέτα αναμεταδίδονται
 - ARQ χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με FEC
 - Μειονέκτημα: Μη αποτελεσματικό σε συστήματα broadcast

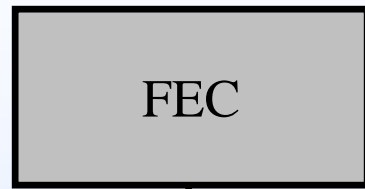
Εφαρμογή

- Υποθέτουμε ότι στέλνουμε 10^6 σύμβολα/sec χρησιμοποιώντας συμβατική διαμόρφωση με ένα φέρον
 - Διάρκεια κάθε συμβόλου 1 μ s.
 - Προβλήματα συγχρονισμού και διασυμβολικής παρεμβολής
- Αν τα σύμβολα αυτά μεταδοθούν μέσω 1000 φερόντων η διάρκεια κάθε συμβόλου αυξάνεται κατά έναν παράγοντα 1000.
- Το εύρος ζώνης μετάδοσης και για τις δύο περιπτώσεις είναι ίδιο.
- Χρησιμοποιούμε χρόνο φύλαξης ίσο με το 1/8 της διάρκειας κάθε συμβόλου
- Δεν υπάρχει διασυμβολική παρεμβολή όταν η εξάπλωση καθυστέρησης (time spread) είναι μικρότερη από το χρόνο φύλαξης (125 μ s).

Αναδιατάκτες (interleavers) σε συστήματα OFDM

- **Αναδιάταξη (interleaving) στο πεδίο της συχνότητας**
 - Βελτιώνει τις ανοχές του συστήματος σε διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα
 - Αν ένα τμήμα από το συνολικό εύρος ζώνης του καναλιού βρίσκεται υπό την επίδραση διαλείψεων, τότε η αναδιάταξη μας εγγυάται ότι τα εσφαλμένα bits δεν θα είναι συγκεντρωμένα στο θεωρούμενο τμήμα
 - Τα σφάλματα κατανέμονται ομοιόμορφα στον συρμό των bits
- **Αναδιάταξη στο πεδίο του χρόνου**
 - Γειτονικά bits στον αρχικό συρμό μετάδοσης «απομακρύνονται» στο πεδίο του χρόνου
 - Καταπολέμηση της επίδρασης ισχυρών διαλείψεων πχ κατά την κίνηση με υψηλές ταχύτητες
- **Η αναδιάταξη στο πεδίο του χρόνου δεν βελτιώνει τις επιδόσεις του συστήματος στην περίπτωση αργών διαλείψεων**
- **Η αναδιάταξη στο πεδίο της συχνότητας δεν βελτιώνει τις επιδόσεις του συστήματος στην περίπτωση στενών διαύλων μετάδοσης με επίπεδες διαλείψεις**
- **OFDM χρησιμοποιεί αναδιάταξη για να αποφύγει την συγκέντρωση μεγάλου αριθμού εσφαλμένων bits στην είσοδο του κωδικοποιητή διόρθωσης σφαλμάτων**
 - Κώδικες διόρθωσης σφαλμάτων αδυνατούν να διορθώσουν μεγάλο αριθμό διαδοχικών σφαλμάτων

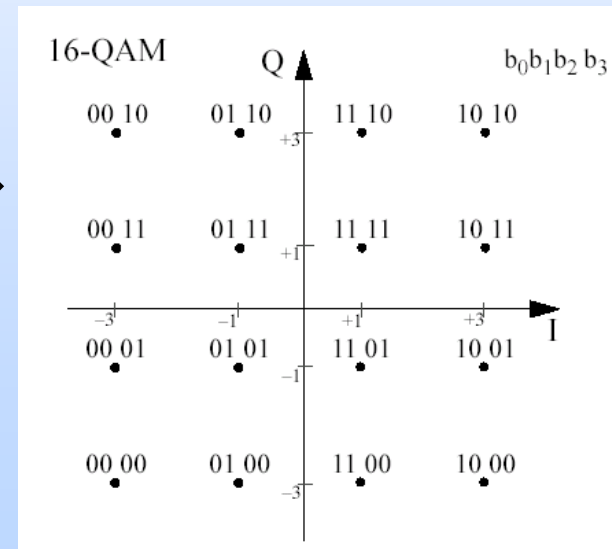
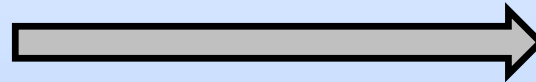
Βασικές διαδικασίες κωδικοποίησης σε πομπό OFDM



- Reed-Solomon και/ή συνελκτικός κώδικας



Ρυθμός κωδικοποίησης 1/2

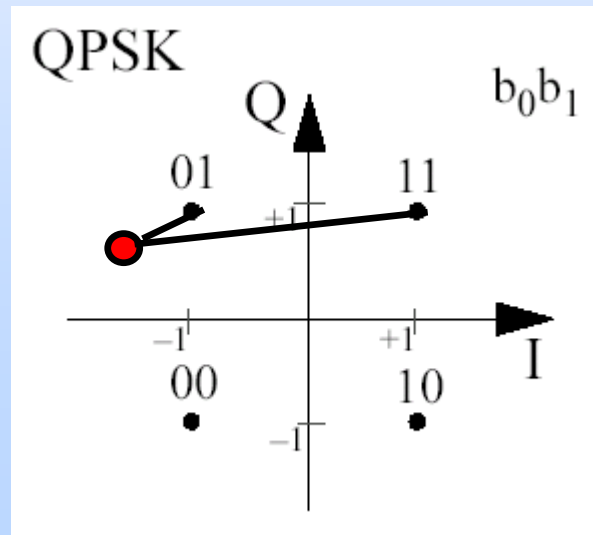
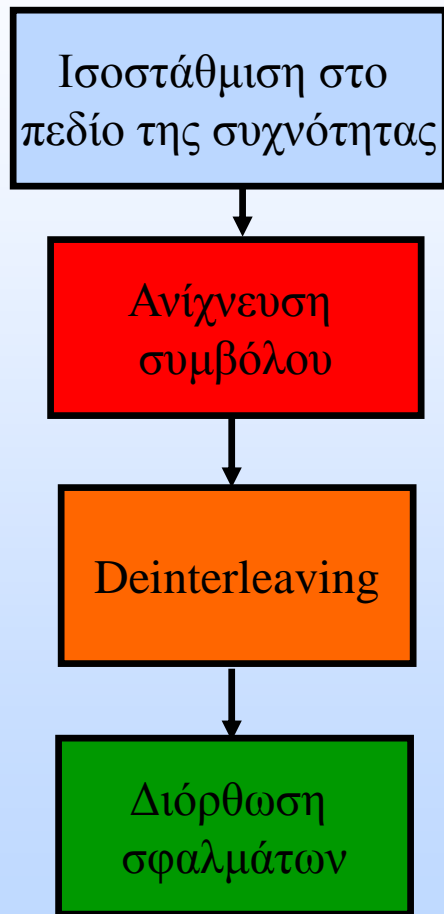


Βασικές διαδικασίες αποκωδικοποίησης σε δέκτη OFDM

- **Ανίχνευση συμβόλου**

- «Απαλή εκτίμηση» κάθε bit
- Βελτιωμένη διόρθωση σφαλμάτων

$$L(b_k) = \log \left(\frac{Pr(x|b_k = 1)}{Pr(x|b_k = 0)} \right)$$
$$\approx \log \left(\frac{\max_{s_k} Pr(x|b_k = 1, s_k)}{\max_{s_k} Pr(x|b_k = 0, s_k)} \right)$$



Προσαρμοζόμενη μετάδοση σε συστήματα OFDM

- **Η επίδοση ενός συστήματος OFDM βελτιώνεται αν χρησιμοποιηθεί ένας διάυλος επιστροφής (return channel) ο οποίος ανατροφοδοτεί την πληροφορία της εξόδου του συστήματος στην είσοδό του**
 - Προσαρμοζόμενη διαμόρφωση
 - Προσαρμοζόμενη κωδικοποίηση
 - Προσαρμοζόμενη ανάθεση ισχύος
- **Οι μηχανισμοί αυτοί μπορούν να εφαρμοστούν στο σύνολο ή σε καθένα ξεχωριστά από τα διαθέσιμα φέροντα**
- **Σε περίπτωση που μια διαμόρφωση/κωδικοποίηση έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλο αριθμό σφαλμάτων, το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιήσει διαφορετική διαθέσιμη διαμόρφωση/κωδικοποίηση**
 - Χαμηλότερος ρυθμός μετάδοσης με τίμημα τη βελτιωμένη αξιοπιστία του συστήματος

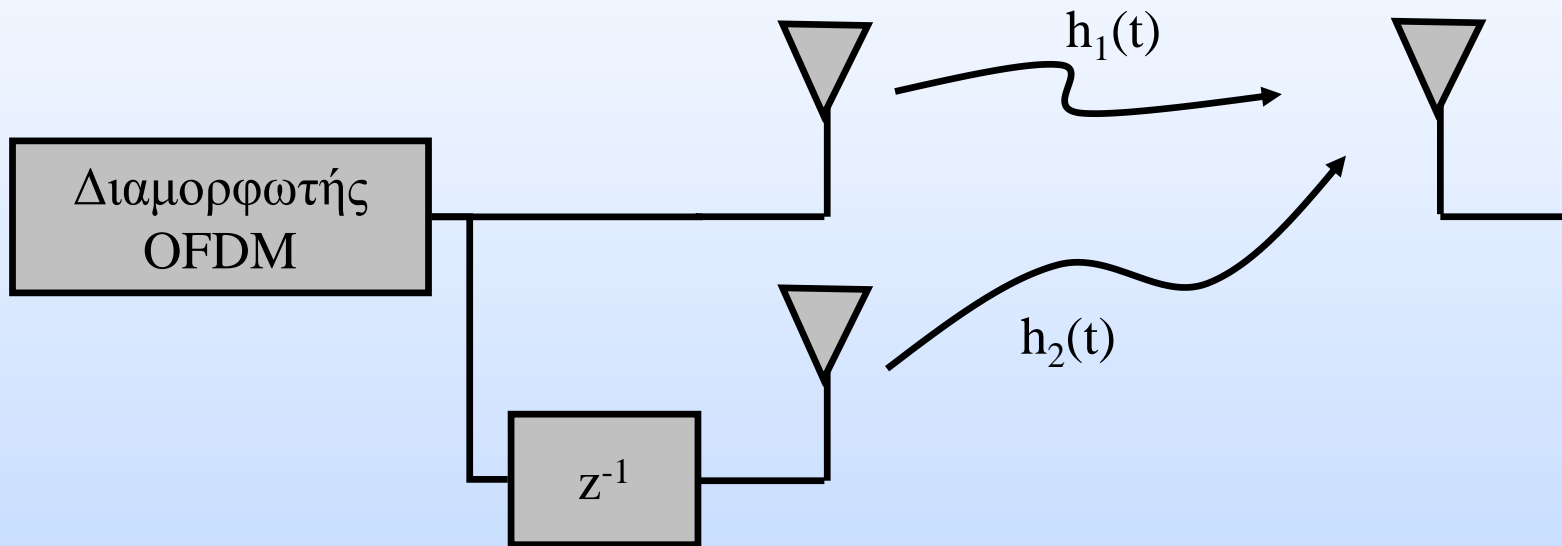
Παράδειγμα: IEEE 802.11a

Data rate (Mbits/s)	Modulation	Coding rate (R)	Coded bits per subcarrier (N_{BPSC})	Coded bits per OFDM symbol (N_{CBPS})	Data bits per OFDM symbol (N_{DBPS})
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216

- Το IEEE 802.11 χρησιμοποιεί προσαρμοζόμενη διαμόρφωση και κωδικοποίηση
 - Ο ρυθμός κωδικοποίησης και το είδος της διαμόρφωσης εξαρτώνται από την απόσταση του τερματικού από το σταθμό βάσης
 - Οι διαθέσιμοι ρυθμοί μετάδοσης ποικίλουν από 6 Mbps ως 54 Mbps

OFDM και συστήματα διαφορισμού (diversity)

- Οι τεχνικές διαφορισμού είναι διαδεδομένες για την καταπολέμηση των διαλείψεων
- Παράδειγμα: Διαφορισμός μετάδοσης με χρονική καθυστέρηση (*Transmit Delay Diversity*)

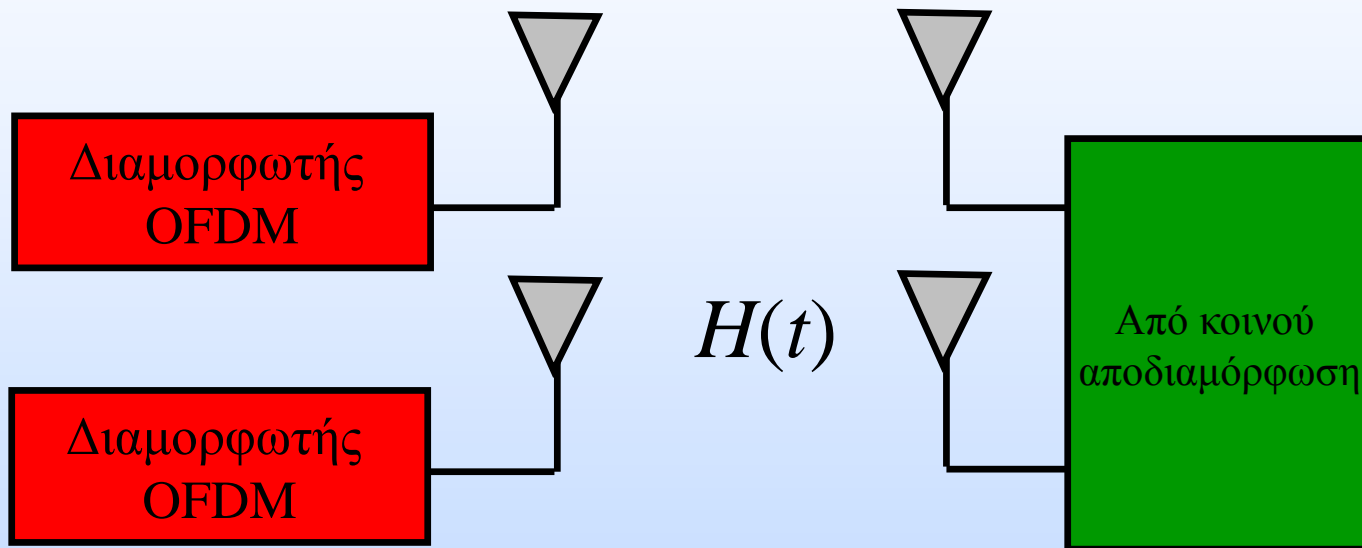


- Ο ισοδύναμος διάυλος είναι $h(t) = h_1(t) + h_2(t - D)$
- Περισσότερες βαθμίδες καθυστέρησης στον διάυλο (taps) = μεγαλύτερο κέρδος διαφορισμού
 - Η επιλογή της τιμής της καθυστέρησης D πρέπει να είναι μεγάλη

OFDM και συστήματα MIMO

- **Συστήματα MIMO**

- Χρήση πολλαπλών κεραιών στην εκπομπή και τη λήψη
- Ο δίαυλος μετάδοσης είναι στη μορφή πίνακα



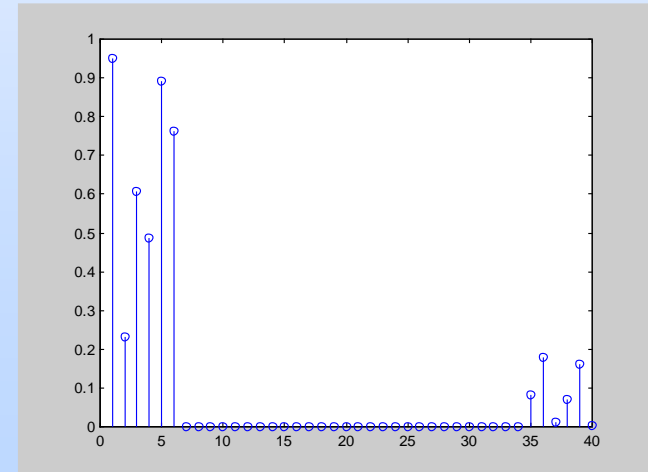
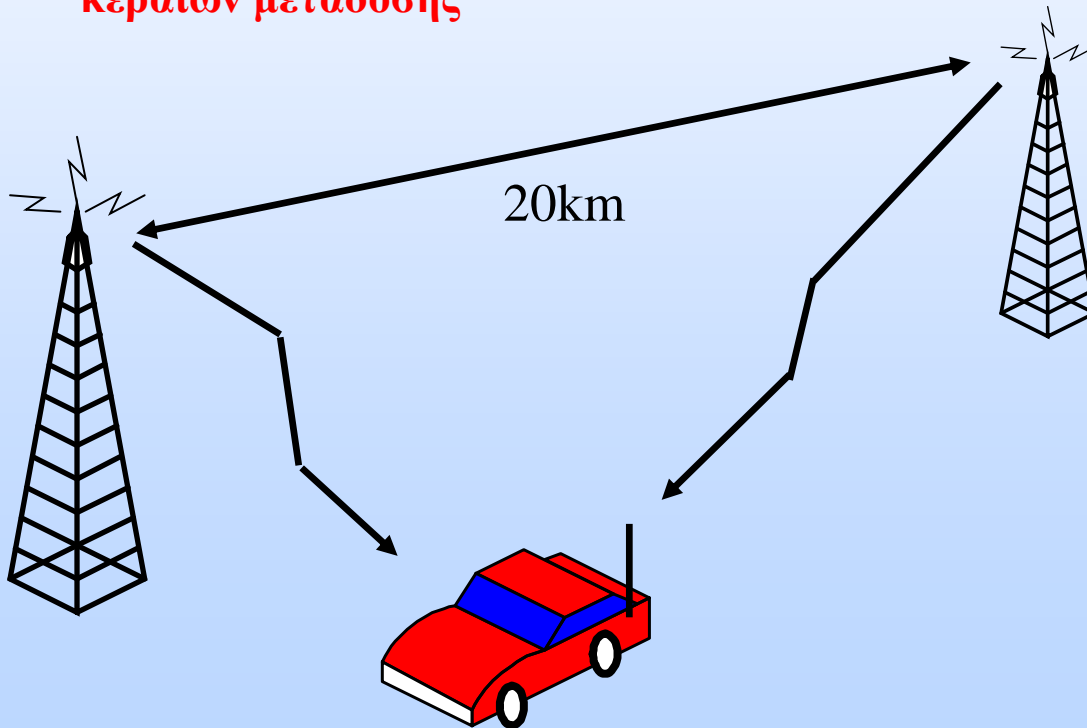
- Ισοδύναμο σύστημα για το φέρον υπ' αριθμόν k

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{v}_k$$

- Οι είσοδοι και οι έξοδοι είναι πλέον διανύσματα
- Εφαρμογή σε συστήματα IEEE 802.11n, WiMAX

OFDM σε συστήματα Broadcast

- **Δημιουργία δικτύου μίας συχνότητας Single Frequency Network (SFN)**
 - Πολλαπλές κεραιές μετάδοσης με γεωγραφική διασπορά
 - Επιτρέπει τη χρήση της ίδιας ραδιοφωνικής /τηλεοπτικής συχνότητας σε ένα κράτος
 - Τεχνητή δημιουργία μεγάλης εξάπλωσης καθυστέρησης – Το OFDM δεν αντιμετωπίζει προβλήματα
- **DVB: Επιλογή για 8000 φέροντα, επιτρέπει μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των κεραιών μετάδοσης**



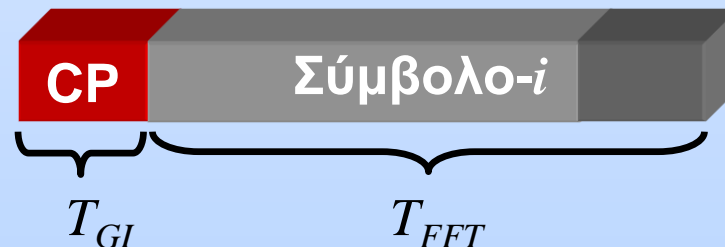
OFDM για πρόσβαση στο Internet με υψηλές ταχύτητες

- **Μετάδοση δεδομένων με υψηλές ταχύτητες**
 - Μεγάλο εύρος ζώνης -> υψηλός ρυθμός μετάδοσης, πολλοί υπολογισμοί
 - Μικρές περίοδοι δειγματοληψίας -> Η εξάπλωση καθυστέρησης μειώνει σημαντικά τις επιδόσεις του συστήματος
- **Το OFDM χρησιμοποιείται σε συνδέσεις ADSL που χρησιμοποιούν το πρότυπο G.DMT (ITU G.992.1)**
 - Οι ήδη υπάρχουσες χάλκινες γραμμές χρησιμοποιούνται για μετάδοση δεδομένων με υψηλές ταχύτητες.
 - Οι γραμμές μεγάλου μήκους παρουσιάζουν εξασθένιση ισχύος (line attenuation) σε υψηλές συχνότητες
 - Το OFDM μπορεί να αντιμετωπίσει την επιλεκτική ως προς τη συχνότητα εξασθένιση και την παρεμβολή στενής ζώνης

Παράδειγμα συστήματος OFDM: IEEE 802.11a WLAN (1)

- **Παράμετροι συστήματος**

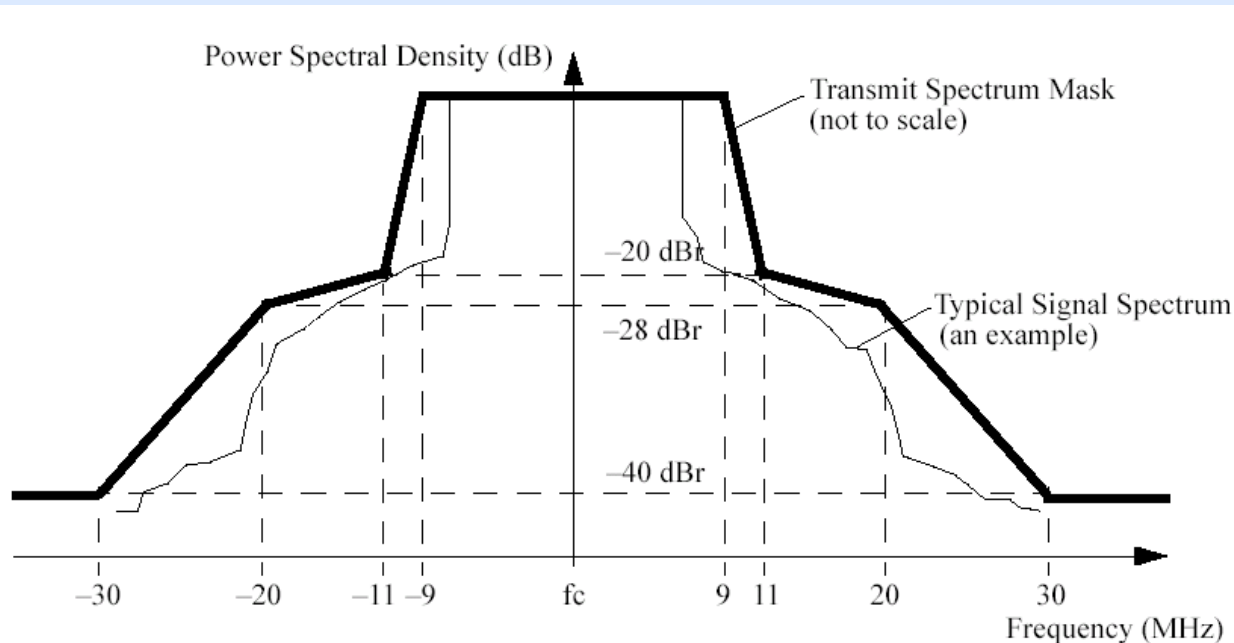
- Μέγεθος FFT : 64
- Αριθμός φερόντων: 52
- Φέροντα-πιλότοι 4 (Φέροντα μεταφοράς πληροφορίας 52-4 = 48)
- Εύρος ζώνης: 20MHz
- Απόσταση μεταξύ φερόντων : $\Delta_f = 20 \text{ MHz} / 64 = 312.5 \text{ kHz}$
- Διάρκεια συμβόλου OFDM: $T_{\text{FFT}} = 1/\Delta_f = 3.2\mu\text{s}$
- Διάρκεια κυκλικού προθέματος: $T_{\text{GI}} = 0.8\mu\text{s}$
- Διάρκεια σήματος: $T_{\text{signal}} = T_{\text{FFT}} + T_{\text{GI}}$



Παράδειγμα συστήματος OFDM: IEEE 802.11a WLAN (2)

- Διαμόρφωση: BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
- Ρυθμός κωδικοποίησης: 1 / 2, 2 / 3, 3 / 4
- FEC: Συνελκτικός κώδικας με $K=7$ (64 καταστάσεις)

Μπάντα συχνοτήτων (GHz)	Μέγιστη ισχύς εξόδου (κέρδος κεραίας 6dBi) (mW)
5.15 – 5.25	40
5.25 – 5.35	200
5.725-5.825	800



Μειονεκτήματα συστημάτων OFDM

- **Απαίτηση για υψηλής ποιότητας ενισχυτές ισχύος**
 - Ένα σήμα OFDM χαρακτηρίζεται από υψηλό PARP (Peak-To-Average Power Ratio)
 - Το PARP ορίζεται ως το πηλίκο της μέγιστης τιμής του πλάτους μιας κυματομορφής προς την ενεργό τιμή της
 - Η χαρακτηριστική μεταφοράς των ενισχυτών ισχύος πρέπει να παρουσιάζει μεγάλη γραμμικότητα και μεγάλη δυναμική περιοχή
 - Απαιτούνται υψηλής ανάλυσης DAC στον πομπό και ADC στο δέκτη
- **Μεγάλη ευαισθησία σε σφάλματα εκτίμησης συχνότητας**
 - Αυστηρές προδιαγραφές για τους τοπικούς ταλαντωτές στο δέκτη
 - Περιορισμοί επιδόσεων λόγω φαινομένου Doppler