



# ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ (Θ)

## Ενότητα 3: ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

Ευσταθίου Δημήτριος

Διδάκτορας Κινητών τηλεπικοινωνιών

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΤΕ





# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.





# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.





# Ενότητα 3

## ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

**ΕΥΣΤΑΘΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ  
ΔΙΔΑΚΤΟΡΑΣ ΚΙΝΗΤΩΝ  
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**



# Περιεχόμενα ενότητας

1. Ανάλυση της OFDM τεχνικής
2. Εισαγωγή κυκλικού OFDM προθέματος
3. Μαθηματική μοντελοποίηση του OFDM



# Σκοποί ενότητας

---



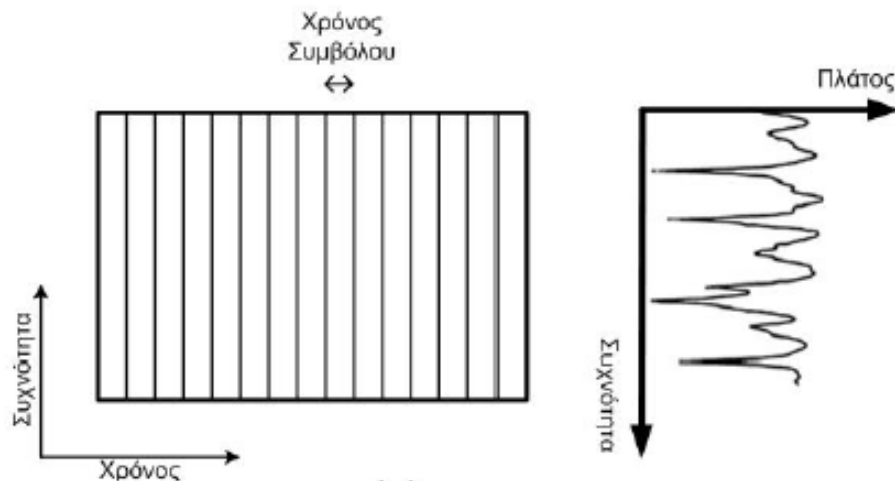
# Ευρυζωνικά Δίκτυα

## Ενότητα 3<sup>η</sup>



# Ανάλυση της OFDM τεχνικής

- Για ένα σύστημα **απλού φέροντος** (single carrier), οι χρονικές αποκρίσεις των συμβόλων επικαλύπτονται και συνεπώς προκαλούν ενδοσυμβολική παρεμβολή (ISI) και αυτό φαίνεται και από τις διαλείψεις σε συγκεκριμένες συχνότητες της απόκριση του ραδιοδιαύλου (frequency selective).



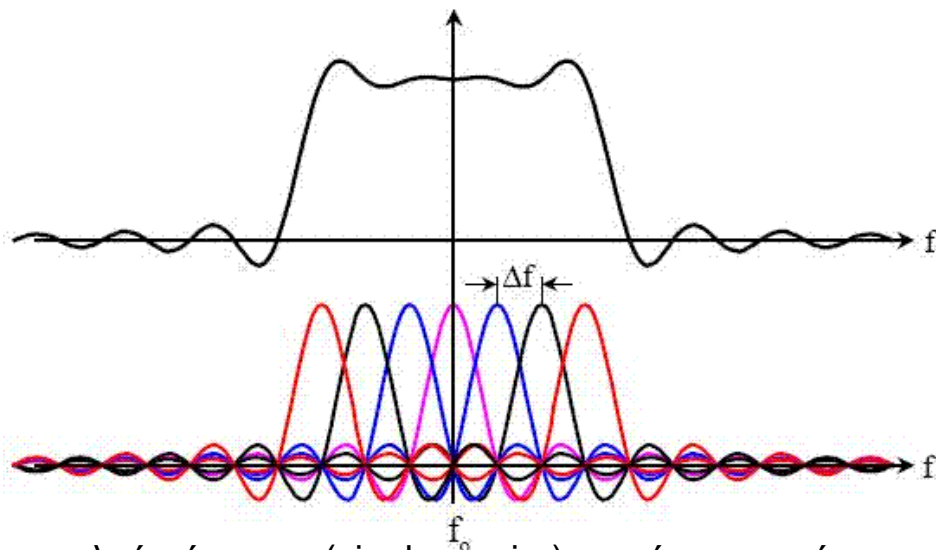
Εικόνα 3.1 Σύστημα απλού φέροντος σε δίαυλο με frequency selective απόκριση συχνότητας





# Ανάλυση της OFDM τεχνικής

- Για ένα δεδομένο ρυθμό πληροφορίας (data rate), **αυξάνοντας τον αριθμό φερόντων μειώνεται ο ρυθμός πληροφορίας που** κάθε μεμονωμένο φέρον πρέπει να μεταβιβάσει και ως εκ τούτου (για ένα δεδομένο σύστημα διαμόρφωσης) επιμηκύνει την περίοδο συμβόλων.

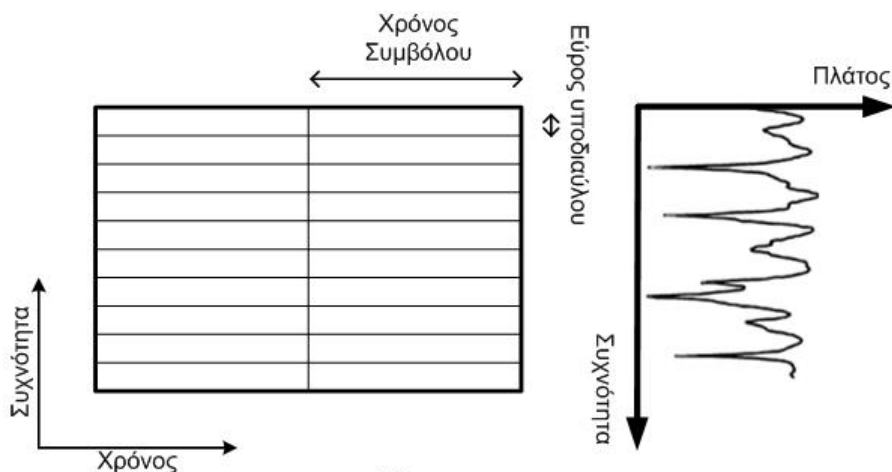


Εικόνα 3.2 Σύστημα απλού φέροντος (single-carrier) σε σύγκριση σύστημα πολλαπλού φέροντος (multi-carrier).



# Ανάλυση της OFDM τεχνικής

- Το multicarrier σύστημα είναι ανθεκτικό ενάντια σε αυτή τη φυσική επίδραση και οι επιπτώσεις της ενδοσυμβολικής παρεμβολής περιορίζονται.

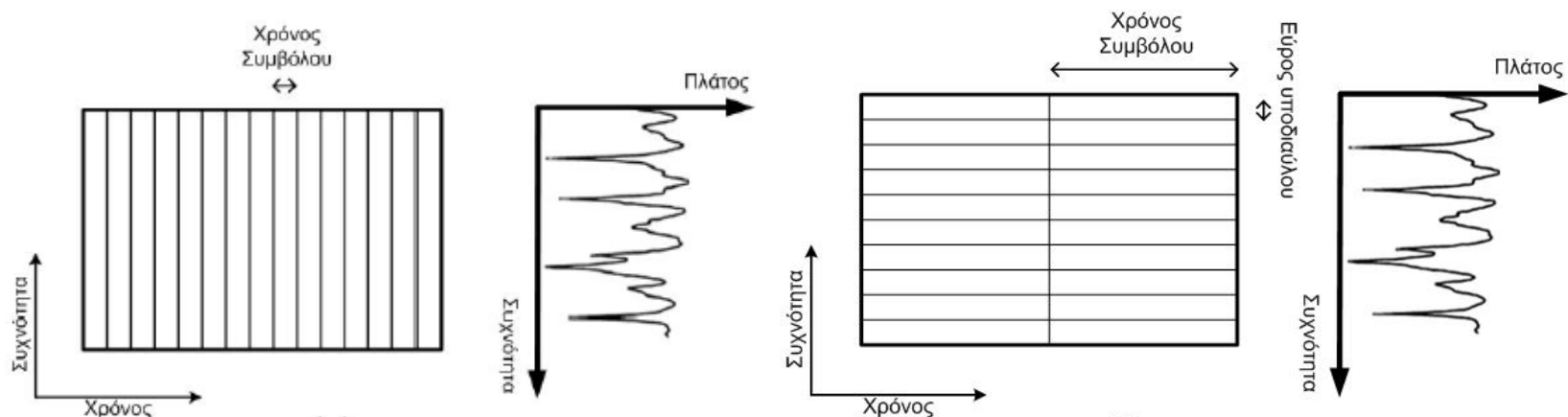


Εικόνα 3.3 Multi-carrier σύστημα σε δίαυλο με frequency selective απόκριση συχνότητας.



# Ανάλυση της OFDM τεχνικής

- **Σειριακό σύστημα μετάδοσης**
  - με το **φάσμα συχνότητας** κάθε συμβόλου πληροφορίας να επιτρέπεται να καταλαμβάνει ολόκληρο το διαθέσιμο εύρος ζώνης.
- **Παράλληλο σύστημα μετάδοσης**
  - τα σύμβολα διαβιβάζονται συγχρόνως

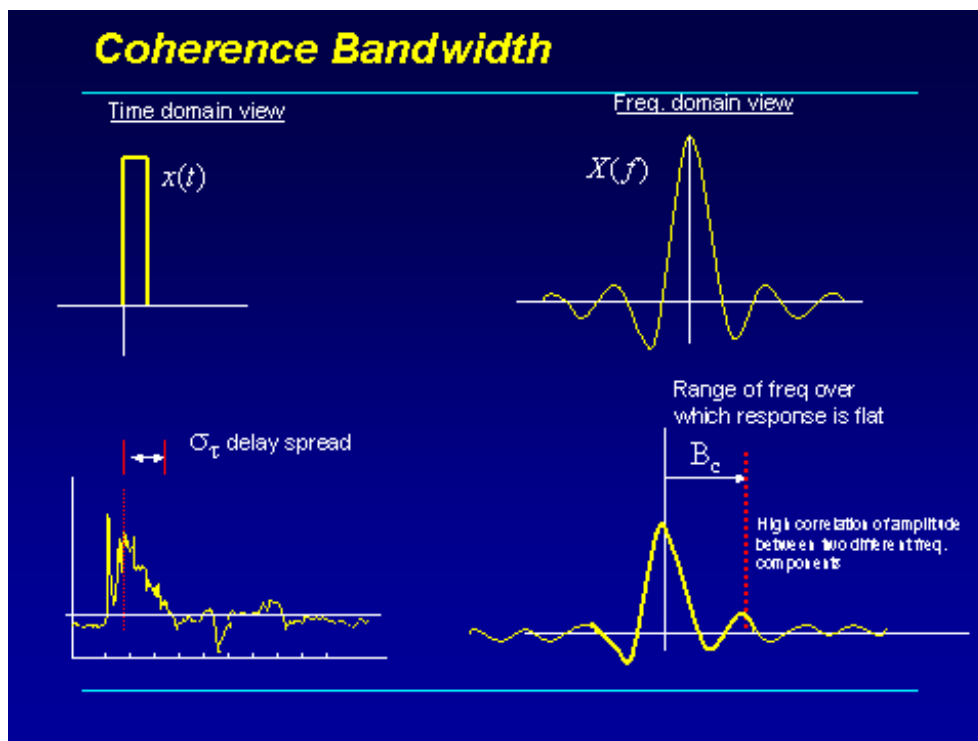


Εικόνα 3.4 Σειριακό σύστημα μετάδοσης και παράλληλο σύστημα μετάδοσης



# Ανάλυση της OFDM τεχνικής

- Το εύρος ζώνης του υποδιαύλου είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης συνοχής  $B_c$  (coherence bandwidth).



Εικόνα 3.5 Εύρος ζώνης συνοχής ενός ασύρματου ραδιοδιαύλου.



# Ανάλυση της OFDM τεχνικής

---

- Υπάρχουν 2 τρόποι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργήσουμε τις υποζώνες:
- **Τρόπος 1<sup>ος</sup>:** Χρήση φίλτρων για να χωριστούν εντελώς οι υποζώνες. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται από τη συμβατική τεχνολογία FDM.
- Ο περιορισμός της εφαρμογής φίλτρων αναγκάζει το εύρος ζώνης κάθε υποζώνης για να είναι ίσο με  $(1+a) \cdot f_m$ , όπου  $a$  είναι ο παράγοντας roll-off και  $f_m$  είναι το εύρος ζώνης Nyquist.
- Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι είναι δύσκολο να κατασκευαστεί ένα προσαρμοσμένο φίλτρο (matched filter) όταν ο αριθμός φερόντων είναι μεγάλος.



# Ανάλυση της OFDM τεχνικής

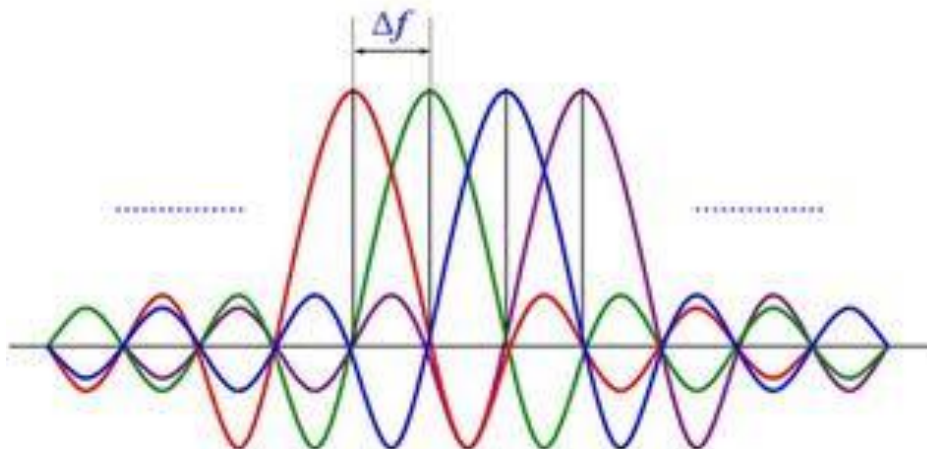
---

- **Τρόπος 2<sup>ος</sup>:** Χρήση **διακριτού μετασχηματισμού κατά Fourier** (DFT) για να διαμορφωθούν και να αποδιαμορφωθούν τα παράλληλα στοιχεία, κάτι που συνεπάγεται εκμετάλλευση της ορθογωνιότητας.
- Τα μεμονωμένα φάσματα είναι τώρα συναρτήσεις *sinc*. Η τεχνική FDM επιτυγχάνεται, όχι με το ζωνοπερατό φίλτράρισμα, αλλά με επεξεργασία του σήματος στην βασική ζώνη.
- Χρησιμοποιώντας αυτήν την μέθοδο, και ο πομπός και ο δέκτης μπορούν να κάνουν χρήση αποδοτικών τεχνικών FFT που μειώνουν τον αριθμό διαδικασιών από το  $N^2$  στον DFT, κάτω σε  $N \log N$ .



# Ανάλυση της OFDM τεχνικής

- Η τεχνική OFDM μπορεί να οριστεί απλά ως μια μορφή διαμόρφωση πολλαπλών φερόντων.
- Η ορθογωνιότητα μπορεί να επιτευχθεί με προσεκτική επιλογή των διαστημάτων μεταξύ των φερόντων, όπως να αφήσουμε τα διαστήματα που χωρίζουν τα φέροντα να είναι ίσα με το αντίστροφο της χρήσιμης περιόδου συμβόλων.



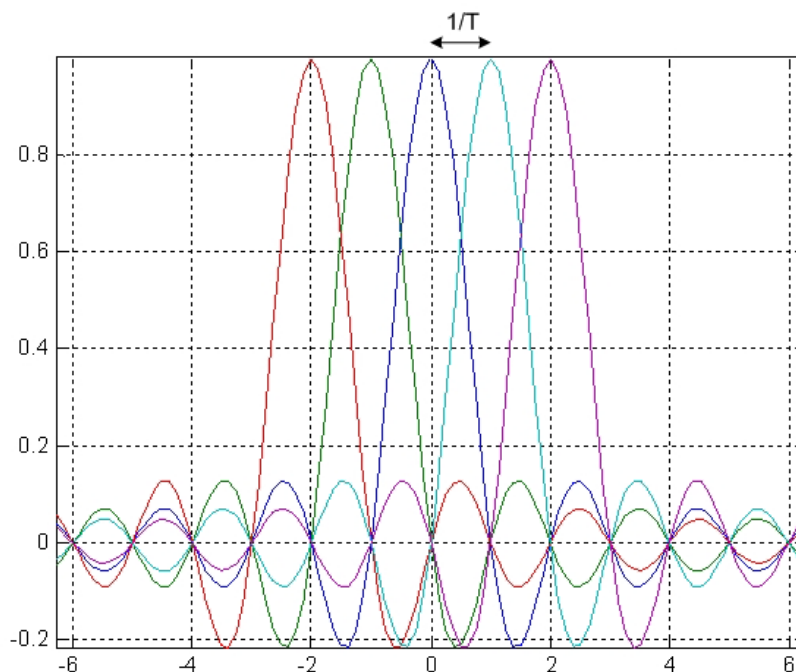
$$\Delta f = \frac{1}{T}$$

Εικόνα 3.6 Οι κεντρικές συχνότητες των φερόντων διαφέρουν κατά  $\Delta f$



# Ανάλυση της OFDM τεχνικής

- Η ενδοπαρεμβολή φερόντων (Inter-carrier Interference - ICI) είναι η παρεμβολή μεταξύ γειτονικών φερόντων, **που προκαλείται από την απώλεια της ορθογωνιότητας.**



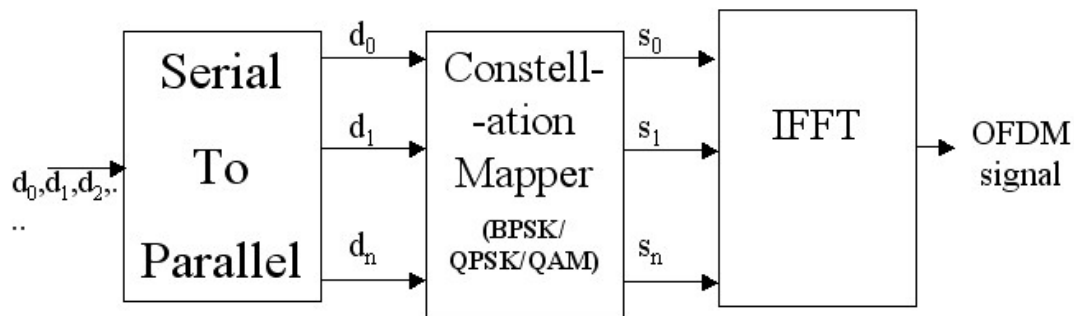
Εικόνα 3.7 Οι κεντρικές συχνότητες των φερόντων διαφέρουν κατά  $1/T$ .





# Ανάλυση της OFDM τεχνικής

- Στο πομπό, το σήμα θεωρείται ότι καθορίζεται στην **περιοχή συχνότητας** και χρησιμοποιείται αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier (IFFT), που έχει ως είσοδο σήματα στο πεδίο της συχνότητας.
- Είναι ένα **δειγματοληπτημένο ψηφιακό σήμα** και καθορίζεται έτσι ώστε το **διακριτό φάσμα Fourier** να υπάρχει μόνο στις διακριτές συχνότητες.

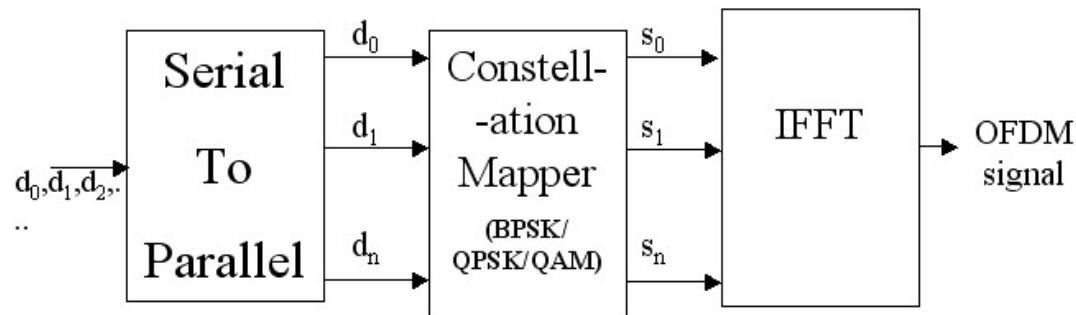


Εικόνα 3.7 Διάγραμμα OFDM πομπού βασικής ζώνης



# Ανάλυση της OFDM τεχνικής

- Κάθε φέρον OFDM αντιστοιχεί σε ένα στοιχείο αυτού του διακριτού φάσματος Fourier.
- Τα πλάτη και οι φάσεις των φερόντων εξαρτώνται από την ψηφιακή διαμόρφωση των στοιχείων πληροφορίας προς εκπομπή, και μπορεί να είναι BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM.



Εικόνα 3.7 Διάγραμμα OFDM πομπού βασικής ζώνης



# Εισαγωγή κυκλικού OFDM προθέματος

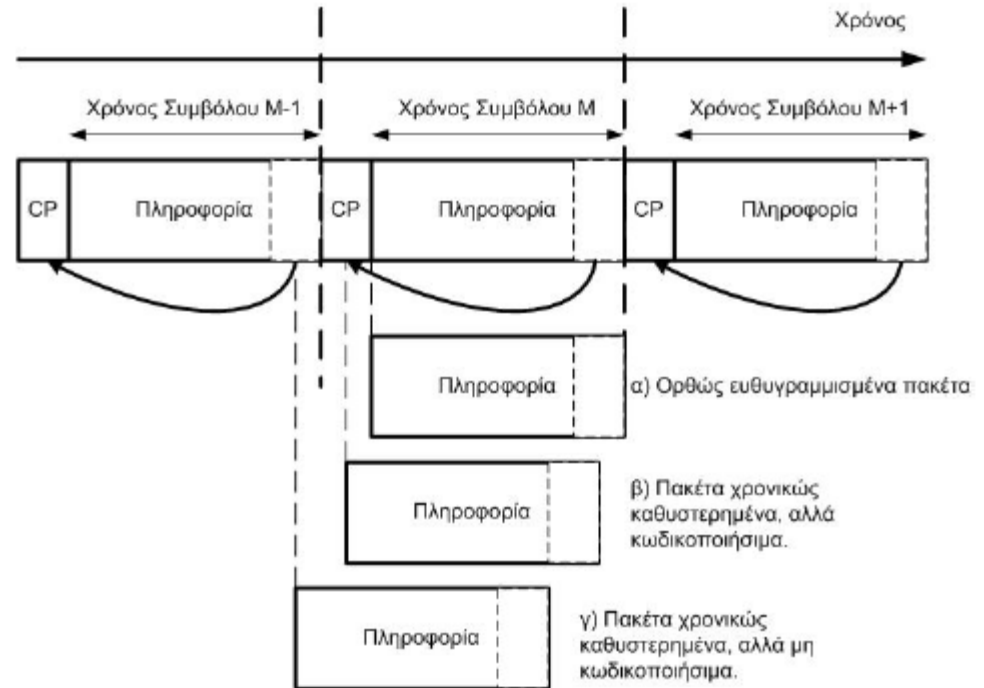
---

- Το φάσμα ενός OFDM σήματος δεν περιορίζεται (non-band limited) (λόγω της συνάρτησης  $\text{sinc}(f)$ ).
- Η **παραμόρφωση** που προκαλείται λόγω των πολλαπλών διοδεύσεων, προκαλεί **διασπορά** σε κάθε υποδιάυλο και έτσι διαδίδεται η ενέργεια στα γειτονικά κανάλια και συνεπώς προκαλείται ISI.



# Εισαγωγή κυκλικού OFDM προθέματος

- Προσθέτουμε ένα κυκλικά εκτεταμένο διάστημα προστασίας
- Η συνολική διάρκεια συμβόλων είναι τώρα  $T_{total} = T_g + T$ , όπου το  $T_g$  είναι το διάστημα προστασίας και το  $T$  είναι η χρήσιμη διάρκεια συμβόλων.



Εικόνα 3.8 Η επίδραση προσθήκης διαστήματος προστασίας.



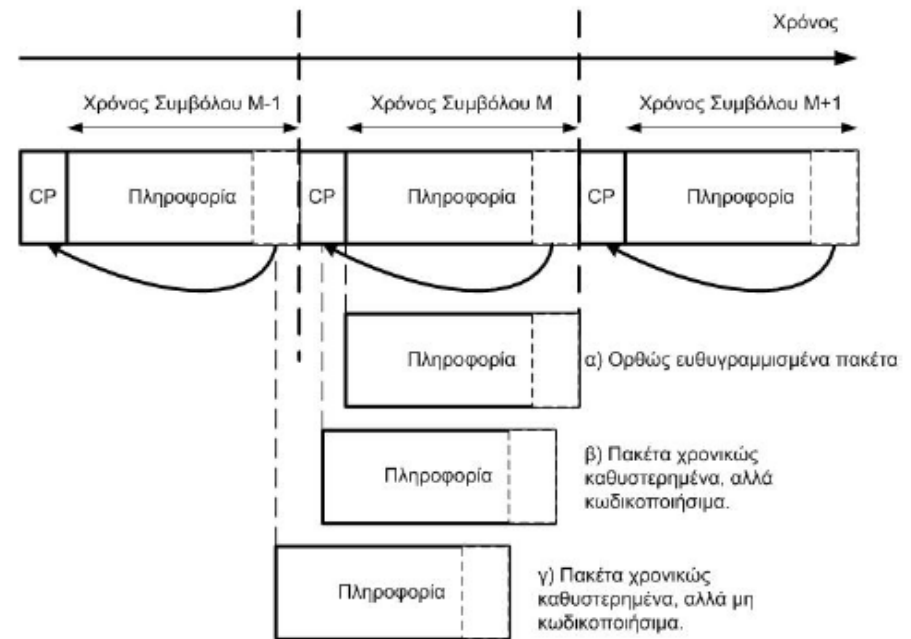
# Εισαγωγή κυκλικού OFDM προθέματος

- Η εισαγωγή διαστήματος προστασίας εισάγει και μια μείωση του SNR που δίνεται από τον τύπο:

$$SNR_{loss} = 10 \cdot \log_{10} \left( 1 - \frac{T_g}{T_{total}} \right)$$

- Επίσης μειώνεται ο ρυθμός της ωφέλιμης πληροφορίας σε

$$R \cdot \left( 1 - \frac{T_g}{T_{total}} \right)$$



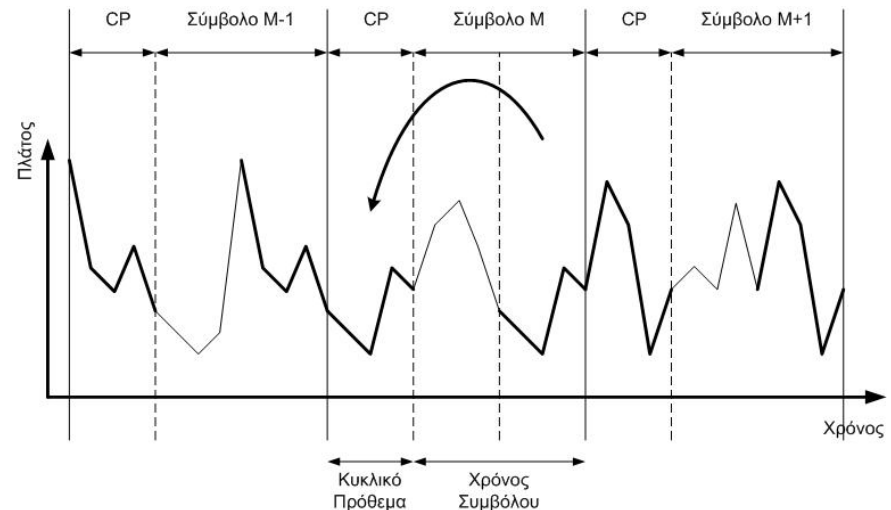
Εικόνα 3.8 Η επίδραση προσθήκης διαστήματος προστασίας.



# Εισαγωγή κυκλικού OFDM προθέματος

- Η αναλογία του διαστήματος προστασίας και χρήσιμης διάρκειας συμβόλων εξαρτάται από την εφαρμογή, όπου θα γίνει η χρήση του συστήματος OFDM, και πρέπει να γίνεται μία συνετή επιλογή της.
- Επειδή, η εισαγωγή του διαστήματος προστασίας θα μειώσει το ρυθμό bits και θα εισάγει μείωση του SNR, το  $T_g$  είναι συνήθως λιγότερο από  $T/4$ .

Εικόνα 3.9 Παράδειγμα διαστήματος προστασίας.





# Μαθηματική μοντελοποίηση του OFDM

- Ένα σήμα OFDM εκφράζεται ως ένα **άθροισμα παλμών χρονικά και συχνοτικά μετατοπισμένους**. Οι παλμοί είναι πολλαπλασιασμένοι με σύμβολα πληροφορίας που έχουν ήδη διαμορφωθεί από ένα ένα τύπο ψηφιακής διαμόρφωσης (QPSK, 16-QAM, 64-QAM).
- Σε μορφή συνεχούς χρόνου, το k-ιοστό OFDM σύμβολο γράφεται :

$$s_{RF,k}(t - kt) = \text{Re} \left\{ w(t - kt) \sum_{l=-N/2}^{N/2-1} x_{l,k} \exp \left( j 2\pi \left( f_c + \frac{l}{T_{FFT}} \right) (t - kt) \right) \right\}$$

- Για  $kT - T_{win} - T_{guard} < t < kT + T_{win} + T_{FFT}$

Σημείωση

$$F_n \equiv \sum_{k=0}^{N-1} f_k e^{-2\pi i n k / N}.$$

$$f_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} F_n e^{2\pi i k n / N}.$$



# Μαθηματική μοντελοποίηση του OFDM

$$s_{RF,k}(t-kt) = \text{Re} \left\{ w(t-kt) \sum_{i=-N/2}^{N/2-1} x_{i,k} \exp \left( j2\pi \left( f_c + \frac{i}{T_{FFT}} \right) (t-kt) \right) \right\}$$

Όπου

- $T$  = ο χρόνος συμβόλου
- $T_{FFT}$  = ο χρόνος χρήσιμου μέρους του συμβόλου (περιέχει πληροφορία)
- $T_{guard}$  = το χρονικό διάστημα προστασίας
- $T_{win}$  = ο χρόνος «παραθύρου»
- $f_c$  = η κεντρική συχνότητα φέροντων
- $N$  = το πλήθος των σημείων του FFT
- $k$  = ο δείκτης του μεταδοθέντος συμβόλου
- $i$  = ο δείκτης του υπό-φέροντος,  $i \in \{-N/2, -N/2+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, N/2-1\}$
- $x_{i,k}$  = το μιγαδικό σήμα διαμορφωμένο στο  $i$ -οστό υπο-φέρον του  $k$ -οστού συμβόλου.





# Μαθηματική μοντελοποίηση του OFDM

- Η συνάρτηση  $w(t)$  είναι (συνάρτηση windowing) :

$$w(t - kt) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[ 1 - \cos \pi \left( \frac{t + T_{win} + T_{guard}}{T_{win}} \right) \right] & , -T_{win} - T_{guard} \leq t \leq -T_{guard} \\ 1 & , -T_{guard} \leq t \leq T_{FFT} \\ \frac{1}{2} \left[ 1 - \cos \pi \left( \frac{t - T_{FFT}}{T_{win}} \right) \right] & , T_{FFT} \leq t \leq T_{FFT} + T_{win} \end{cases}$$

Τελικά, η ακολουθία OFDM συμβόλων ορίζεται :

$$s_{RF}(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} s_{RF,k}(t - kt)$$



# Τέλος Ενότητας

