



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Κινητά Δίκτυα Επικοινωνιών

Ενότητα 4: Διαμόρφωση Πολλαπλών Φερουσών και
OFDM

Καθ. Κώστας Μπερμπερίδης

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Μηχανικών Η/Υ & Πληροφορικής

Σκοποί ενότητας

- Η εξοικείωση του φοιτητή με τις τεχνικές διαμόρφωσης πολλαπλών φερουσών και ειδικότερα με την τεχνική OFDM



Περιεχόμενα ενότητας

Διαμόρφωση Πολλαπλών Φερουσών και OFDM



Διαμόρφωση Πολλαπλών Φερουσών και OFDM

Διαμόρφωση μιας Φέρουσας

- Είδαμε ότι τα πραγματικά κανάλια (και ιδιαίτερα τα κινητά) εισάγουν **διασυμβολική παρεμβολή**
- Πότε συμβαίνει αυτό;
 - όταν η περίοδος συμβόλου είναι μικρότερη της χρονικής διασποράς της κρουστικής απόκρισης του καναλιού
 - όταν το κανάλι είναι συχνοτικά επιλεκτικό (ακόμα χειρότερα όταν έχουμε απότομα βυθίσματα στο φάσμα)
- Χρησιμοποιούμε **ισοσταθμιστή**, αλλά συχνά παραμένει κάποια υποβάθμιση της επίδοσης (εκτός αν αυξήσουμε την πολυπλοκότητα στον δέκτη)
- Έχουμε θεωρήσει ως τώρα χρήση **μιας φέρουσας συχνότητας**, δηλαδή:
 - αν το κανάλι είναι ζωνοπερατό και με συγκεκριμένο εύρος ζώνης,
 - τότε το σήμα πληροφορίας (βασικής ζώνης) διαμορφώνεται και μετατοπίζεται στις συχνότητες της ζώνης διέλευσης του καναλιού

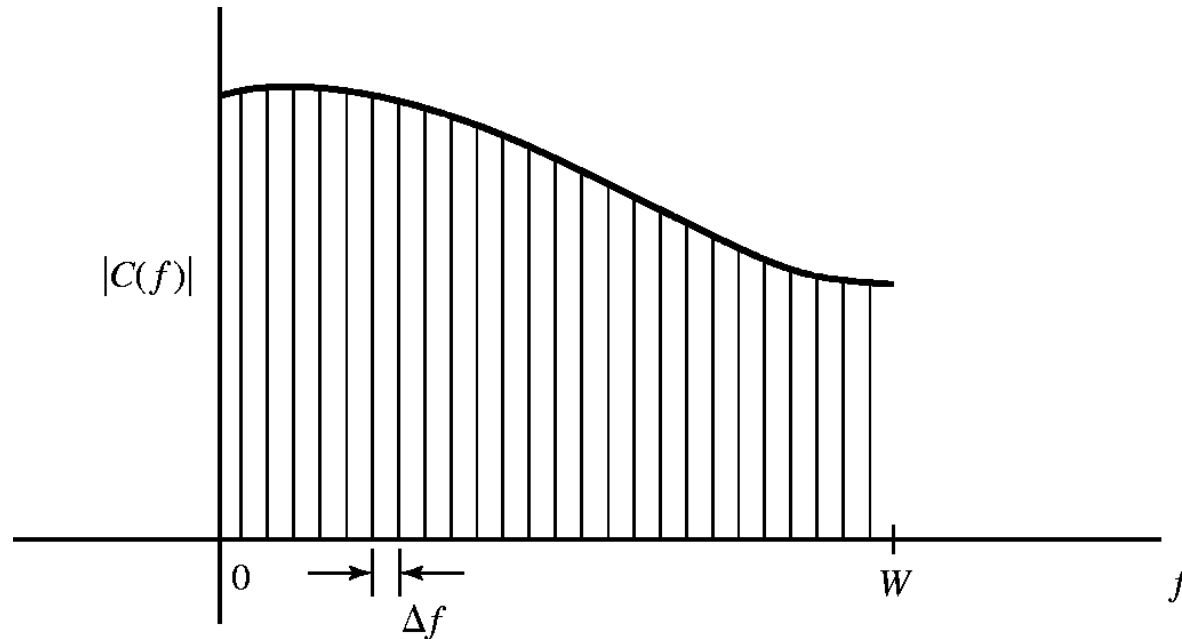
Διαμόρφωση Πολλών Φερουσών

- Εναλλακτικά, μπορούμε να διαιρέσουμε το διαθέσιμο εύρος ζώνης W (βασικής ζώνης ή ζωνοπερατό):
 - σε K υποκανάλια
 - ίσου εύρους ζώνης

$$\Delta f = \frac{W}{K}$$

- Εφόσον το εύρος ζώνης κάθε υποκαναλιού είναι αρκετά στενό:
 - η **απόκριση συχνότητας** μπορεί να θεωρηθεί σταθερή
 - Αυτό, στο πεδίο του χρόνου, σημαίνει ότι η **κρουστική απόκριση του υποκαναλιού** είναι αρκετά περιορισμένη
 - άρα, μπορεί η **ISI** που υπεισέρχεται να είναι πολύ μικρή έως ασήμαντη
- **Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (FDM)**: σε κάθε υποκανάλι, μπορεί να μεταδοθεί διαφορετικό σύμβολο πληροφορίας

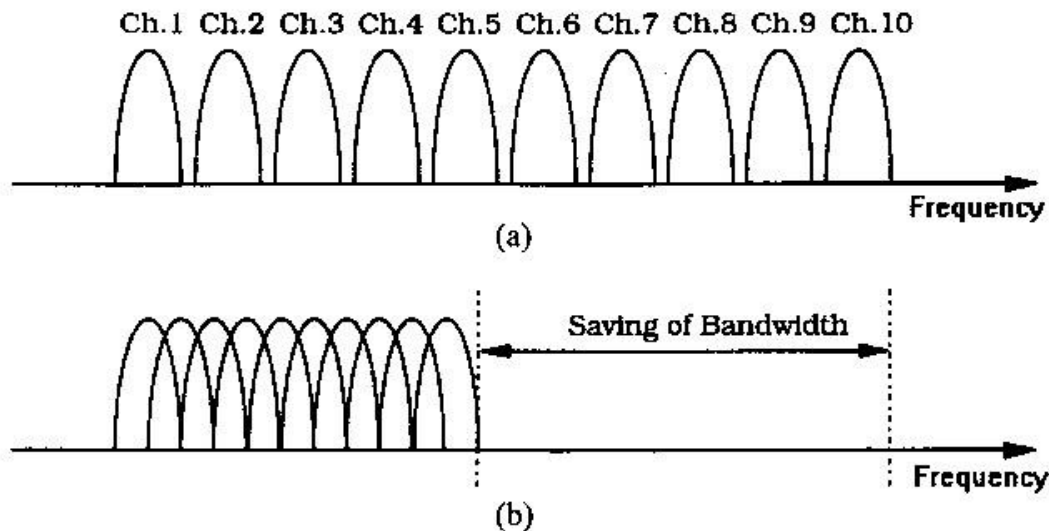
Διαίρεση εύρους ζώνης καναλιού



- Το εύρος ζώνης W διαιρείται σε K υποκανάλια
- Τα υποκανάλια έχουν περιορισμένο εύρος ζώνης
- Επιστροφή στο FDM ; Ναι αλλά σε μια εξελιγμένη του μορφή

Ορθογώνια FDM: Γενικά

- Στο σύστημα OFDM τα φάσματα των υπο-φερουσών επικαλύπτονται χωρίς όμως αυτό να προκαλεί το φαινόμενο inter-carrier interference.
- Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει οι υπο-φέρουσες να είναι μαθηματικά ορθογώνιες (αρκεί να απέχουν στη συχνότητα απόσταση ίση με k/T , όπου T η διάρκεια του OFDM συμβόλου).



Ορθογώνια FDM

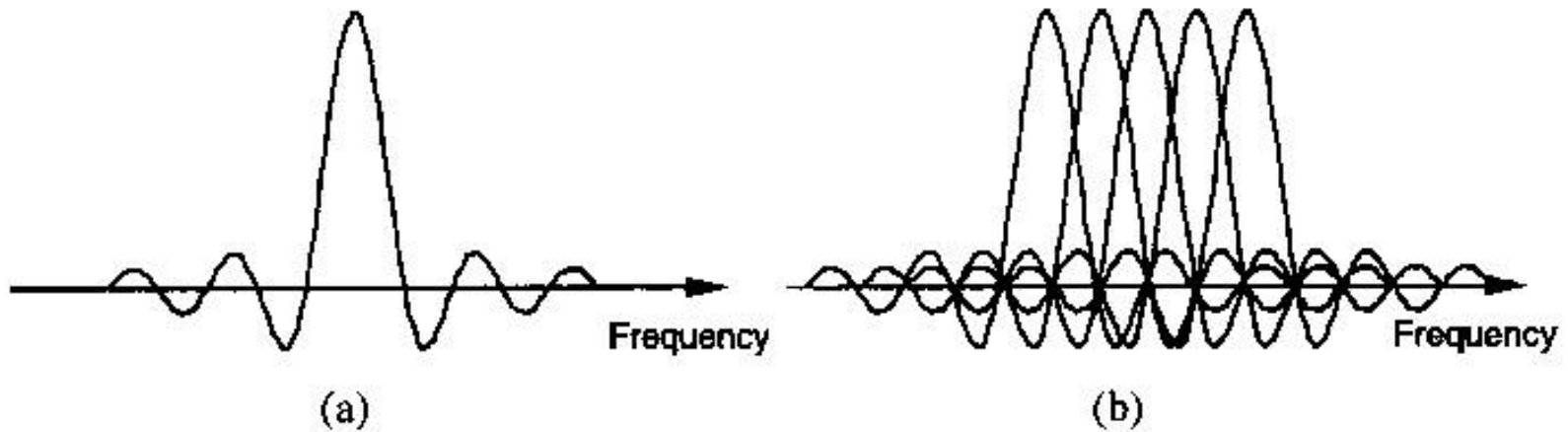
- Σε κάθε υποκανάλι k , χρησιμοποιείται διαφορετική φέρουσα

$$y_k(t) = \cos(2\pi f_k t), \quad k = 0, 1, \dots, K - 1$$

όπου f_k η κεντρική συχνότητα του υποκαναλιού

- Αν η διαφορά συχνότητας μεταξύ διαδοχικών υποκαναλιών είναι (κατ' ελάχιστο) $\Delta f = 1/T$, όπου T ο ρυθμός συμβόλων σε κάθε υποκανάλι,
 - τότε οι υποφέρουσες είναι **ορθογώνιες** μεταξύ τους ανεξάρτητα από τις φάσεις τους
- $$\int_0^T \cos(2\pi f_k + \varphi_k) \cos(2\pi f_j + \varphi_j) dt = 0$$
- Τότε, έχουμε ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας
 - **Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM**

Ορθογώνια FDM



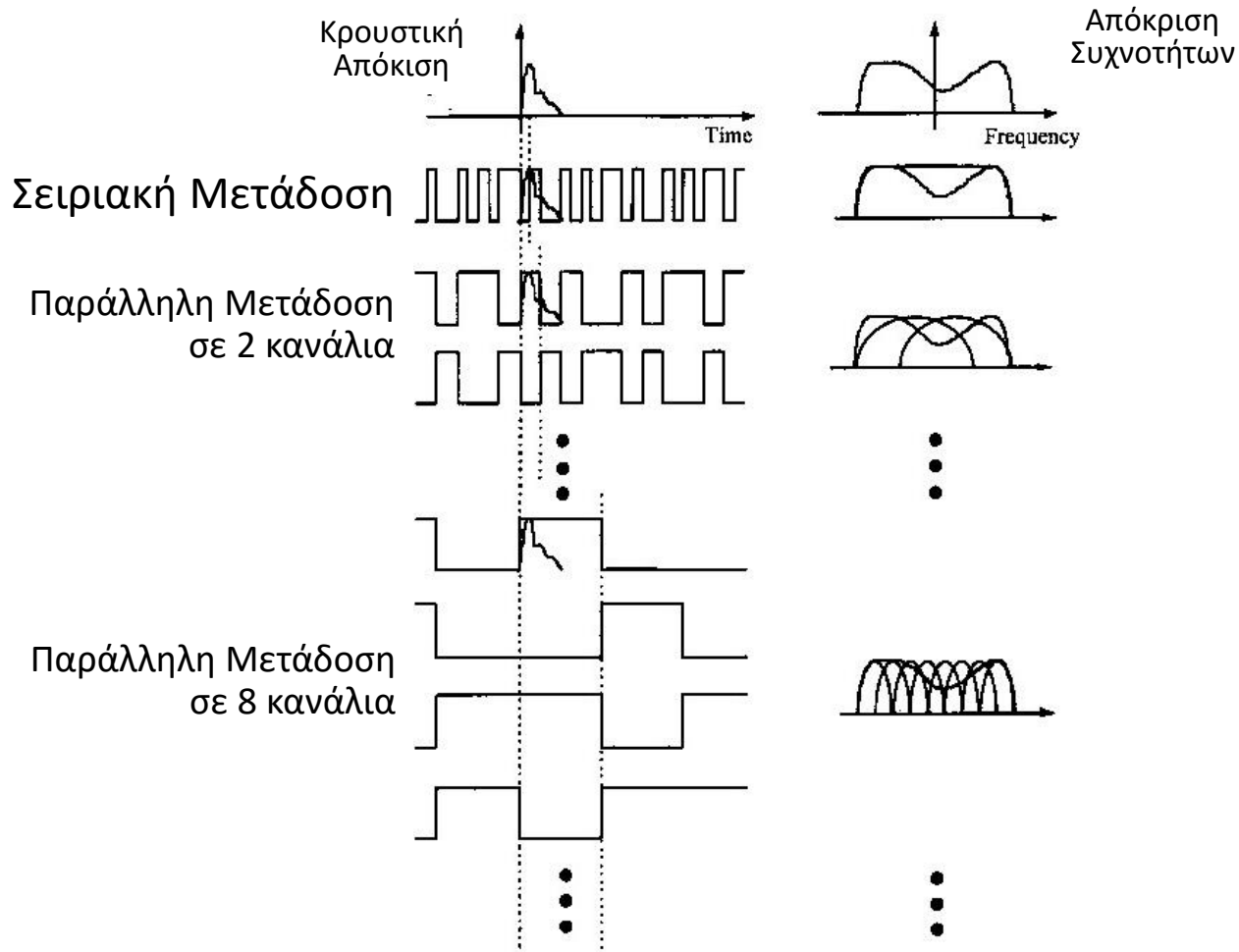
- Στο σχήμα (α) βλέπουμε το φάσμα ενός OFDM sub-channel
- ενώ στο σχήμα (β) το φάσμα του συνολικού σήματος OFDM.

Ορθογώνια FDM

- Σε ένα τέτοιο σύστημα,
 - ο ρυθμός συμβόλων σε κάθε υποκανάλι **μειώνεται κατά K** σε σχέση με το σύστημα μιας φέρουσας
 - άρα, η περίοδος συμβόλου στο OFDM γίνεται $T = KT_s$ όπου T_s η περίοδος των αρχικών συμβόλων
- Αν το K είναι αρκετά μεγάλο,
 - το διάστημα συμβόλου μπορεί να γίνει σημαντικά μεγαλύτερο της χρονικής διάρκειας του υποκαναλιού
 - και να μην εμφανίζεται ISI
- Έτσι, αν επιλέξω αρκετά μεγάλο K , τότε κάθε υποκανάλι εμφανίζεται να έχει σταθερή απόκριση συχνότητας

$$C(f_k) \approx C_k$$

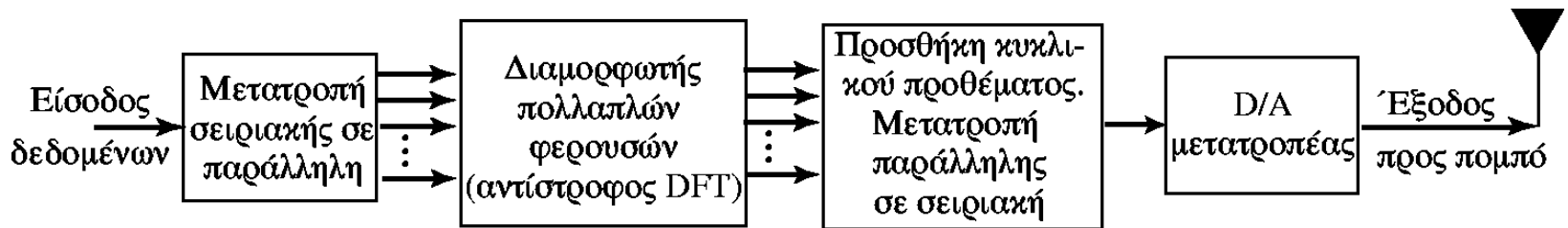
Ορθογώνια FDM



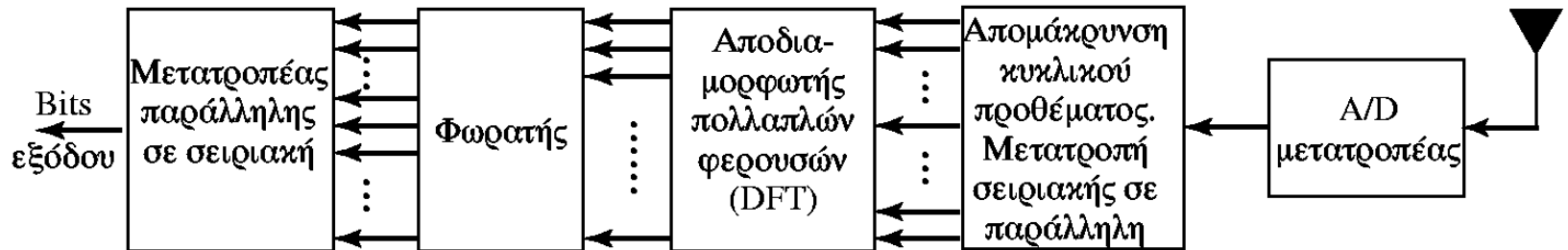
OFDM

- Με μια πρώτη ματιά, η υλοποίηση του OFDM φαίνεται ως μία εξαιρετικά περίπλοκη διαδικασία που περιλαμβάνει K πομπούς και K δέκτες.
- Όμως, ο διαμορφωτής και ο αποδιαμορφωτής OFDM μπορούν να υλοποιηθούν ως μια συστοιχία φίλτρων με τη βοήθεια του **διακριτού μετασχηματισμού Fourier (DFT)** – (σημαντική διαπίστωση)
- Αν το K είναι αρκετά μεγάλο, τότε τα παραπάνω υλοποιούνται αποδοτικά με χρήση του **Γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier (FFT)**

Σύστημα OFDM



(α) Πομπός



(β) Δέκτης

Ο ρόλος του IFFT στο OFDM

$$x(n) = \sum_{k=0}^{K-1} X(k) e^{j\frac{2\pi}{K}k \cdot n}$$

$$x(0) = X(0)e^{j\frac{2\pi}{4}0 \cdot 0} + X(1)e^{j\frac{2\pi}{4}1 \cdot 0} + X(2)e^{j\frac{2\pi}{4}2 \cdot 0} + X(3)e^{j\frac{2\pi}{4}3 \cdot 0}$$

$$x(1) = X(0)e^{j\frac{2\pi}{4}0 \cdot 1} + X(1)e^{j\frac{2\pi}{4}1 \cdot 1} + X(2)e^{j\frac{2\pi}{4}2 \cdot 1} + X(3)e^{j\frac{2\pi}{4}3 \cdot 1}$$

$$x(2) = X(0)e^{j\frac{2\pi}{4}0 \cdot 2} + X(1)e^{j\frac{2\pi}{4}1 \cdot 2} + X(2)e^{j\frac{2\pi}{4}2 \cdot 2} + X(3)e^{j\frac{2\pi}{4}3 \cdot 2}$$

$$x(3) = X(0)e^{j\frac{2\pi}{4}0 \cdot 3} + X(1)e^{j\frac{2\pi}{4}1 \cdot 3} + X(2)e^{j\frac{2\pi}{4}2 \cdot 3} + X(3)e^{j\frac{2\pi}{4}3 \cdot 3}$$

- Οι έξοδοι του IDFT αποστέλλονται μία-προς-μία (P/S) και το σήμα που προκύπτει είναι ένα σύμβολο OFDM
- Το οποίο ουσιαστικά είναι η υπέρθεση των διαμορφωμένων (με τα QAM σύμβολα) υπο-φερουσών
- Παρατηρούμε ότι κάθε αρχικό σύμβολο QAM μεταδίδεται μέσω μίας συγκεκριμένης υπο-φέρουσας (γινόμενο της αντίστοιχης συνάρτησης βάσης του IDFT με μία κοινή φέρουσα) για K-πλάσιο χρόνο

Πρόβλημα OFDM: PAR

- Σημαντικό πρόβλημα OFDM: ο μεγάλος λόγος κορυφής – προς – μέση τιμή ισχύος (**Peak-to-Average Ratio, PAR**) στο μεταδιδόμενο σήμα
- Τι σημαίνει αυτό;
 - Μεταδιδόμενο σήμα: K παράλληλα υποσήματα
 - Κάθε υποσήμα έχει μια δυναμική περιοχή τιμών
 - Αν τύχει πολλά υποσήματα ταυτόχρονα να έχουν μεγάλες τιμές και οι υποφέρουσές τους να είναι συμφασικές
 - Η στιγμιαία τιμή του συνολικού μεταδιδόμενου σήματος μπορεί να γίνει πολύ μεγάλη
 - Τότε, ο ενισχυτής του πομπού λειτουργεί στην περιοχή κόρου, όπου εμφανίζει μη γραμμική συμπεριφορά
- Για να το αντιμετωπίσουμε αυτό, πρέπει να **μειώσουμε την ισχύ εκπομπής**, γεγονός που επηρεάζει το λαμβανόμενο SNR και την πιθανότητα σφάλματος στο δέκτη. Υπάρχουν πάντως και καλύτεροι τρόποι (ωστόσο γενικά παραμένει ανοιχτό πρόβλημα)

Σύστημα OFDM: Adaptive Transmission

- Ο πομπός συγκεντρώνει ένα πλαίσιο B_f bits. Αυτά χωρίζονται σε K ομάδες, και σε κάθε ομάδα εκχωρούνται b_i bits,

$$\sum_{i=1}^K b_i = B_f$$

- Στη γενική περίπτωση, σε κάθε υποκανάλι μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαφορετικός αριθμός bits/σύμβολο (δηλαδή, χρησιμοποιείται QAM- $M_i=2^{b_i}$ σε κάθε υποκανάλι). Π.χ.
 - αν ένα κανάλι έχει **χαμηλό SNR**, τότε μπορώ να χρησιμοποιήσω **QAM-4**
 - σε ένα άλλο κανάλι με **υψηλότερο SNR**, μπορώ να χρησιμοποιήσω **QAM-16**
- Η παραπάνω διαδικασία του **adaptive power and bit allocation** δεν είναι απλή και απαιτεί γνώση στην πλευρά του πομπού
- **Εφαρμόζεται IFFT** σε όλα τα σύμβολα των υποκαναλιών

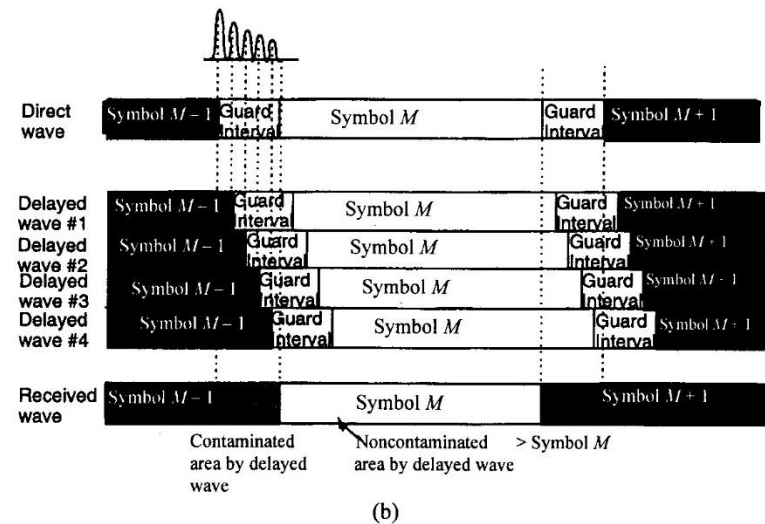
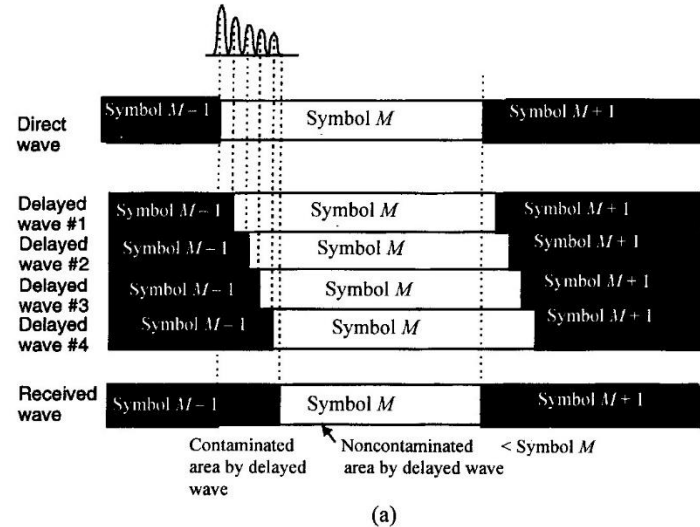
Σύστημα OFDM

Εξάλειψη Παρεμβολής Πλαισίων

- Σε κάθε υποκανάλι παρουσιάζεται (σχεδόν) επίπεδη εξασθένιση, οπότε δεν εμφανίζεται διασυμβολική παρεμβολή
- Ωστόσο, τα σύμβολα δύο πλαισίων παρεμβάλλονται και εμφανίζεται **Inter-Block Interference (IBI)**
- Για να το αποφύγουμε αυτό, ανάμεσα σε δύο διαδοχικά πλαίσια,
 - είτε αφήνουμε ένα διάστημα σιωπής (**zero prefix**)
 - είτε εισάγουμε ένα **κυκλικό πρόθεμα (cyclic prefix)**
- Αφού εισαχθεί το CP, το σήμα μεταδίδεται σειριακά

Σύστημα OFDM

- Δίπλα φαίνεται ο λόγος εισαγωγής του ZP (με μήκος L όσο είναι και το εκτιμώμενο μήκος του καναλιού)
- Ωστόσο ενώ αποφεύγεται το IBI εξακολουθεί να υπάρχει ICI (intercarrier interference) λόγω απώλειας ορθογωνιότητας
- Η λύση είναι η εισαγωγή CP
- CP: στην αρχή του κάθε πλαισίου (OFDM symbol) μπαίνουν ως πρόθεμα τα τελευταία L δείγματα του πλαισίου)



Σύστημα OFDM

- Ο δέκτης συγκεντρώνει τα σειριακά δείγματα και **‘πετάει’** τα L πρώτα που αντιστοιχούν στο CP, όπου L το μήκος της κρουστικής απόκρισης του συνολικού καναλιού
- Έτσι εξαφανίζεται η όποια παρεμβολή μεταξύ των πλαισίων
- Γίνεται παράλληλη αποδιαμόρφωση όλων των υποκαναλιών με **χρήση του FFT**
- Το σήμα κάθε υποκαναλιού λαμβάνεται πλέον ως
$$\hat{X}(k) = C_k X(k) + N(k)$$
- Το κανάλι θα πρέπει να **αντισταθμιστεί**, εφόσον προηγουμένως
 - το υποκανάλι έχει εκτιμηθεί με κάποια διαδικασία εκτίμησης (αν είναι μεταβαλλόμενο χρησιμοποιείται κάποιος προσαρμοστικός τρόπος)
- Εξάγεται απόφαση για κάθε σύμβολο

Σύστημα OFDM

- Το SNR σε κάθε υποκανάλι είναι

$$SNR_k = \frac{TP_k |C_k|^2}{\sigma_{nk}^2}$$

- T η διάρκεια συμβόλου
 - P_k η μέση μεταδιδόμενη ισχύς στο k -υποκανάλι
 - $|C_k|^2$ η απόκριση συχνότητας του υποκαναλιού k
 - σ_{nk}^2 η διασπορά του θορύβου στο υποκανάλι k
- Όπως ήδη αναφέρθηκε, ανάλογα με το SNR σε κάθε υποκανάλι, μπορούμε να επιλέξουμε διαφορετικό P_k ή/και άρα διαφορετικούς αστερισμούς QAM

OFDM: Γενική αξιολόγηση

- **Βασικά πλεονεκτήματα:**

- Καλύτερη αξιοποίηση του φάσματος
- Διάχυση του προβλήματος της επιλεκτικής και γρήγορης απόσβεσης. Έτσι αποφεύγονται burst errors.

- **Μειονεκτήματα:**

- Ευαισθησία σε carrier frequency offset (λόγω jitter και Doppler)
- Δεν διασφαλίζεται η σταθερή περιβάλλουσα και συνεπώς η τεχνική είναι ευαίσθητη σε μη γραμμικές παραμορφώσεις του διαύλου
- Απαραίτητη η ύπαρξη κωδικοποίησης καναλιού (COFDM)

OFDMA

- Το σύστημα OFDM έχει επινοηθεί πρωτίστως ως ένα σύστημα φασματικά αποδοτικής διαμόρφωσης.
- Ωστόσο, η βασική ιδέα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλαπλή προσπέλαση, δηλαδή κοινή χρήση του μέσου από πολλούς χρήστες. Αυτό γίνεται αναθέτοντας ομάδες υποφερουσών σε διαφορετικούς χρήστες (ενδεχομένως με διαφορετικές απαιτήσεις σε QoS).

Εφαρμογές OFDM

- Το OFDM έχει εφαρμοστεί σε διάφορα συστήματα, όπως:
 - **Discrete MultiTone Modulation - DMT**
 - για υψίρρυθμη μετάδοση σε τηλεφωνικές γραμμές, όπως οι ψηφιακές συνδρομητικές γραμμές ADSL
 - σε αυτήν την περίπτωση λέγεται διακριτή πολυτονική διαμόρφωση (Discrete MultiTone modulation)
 - **Digital Audio Broadcasting – DAB**
 - για ψηφιακή εκπομπή ήχου
 - **Digital Video Broadcasting – DVB (HDTV)**
 - για ψηφιακή εκπομπή βίντεο
 - Ασύρματα Δίκτυα LAN : **IEEE 802.11, HIPERLAN**
και MAN : **IEEE 802.16, HIPERMAN**
 - **Power Line Communications**
 - **Ultra Wide-band (UWB) Communications**

Συναφή συστήματα

- SC-FDMA (Single-Carrier FDMA)
Χρησιμοποιεί:
 - Single-Carrier Modulation
 - DFT-spread orthogonal frequency multiplexing
 - Frequency-Domain Equalization
- Filter Bank-based Multi-Carrier (FBMC)
 - Υλοποίηση της παράλληλης μετάδοσης σε υπο-φέρουσες με **bank of filters** αντί DFT

Τέλος Ενότητας

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Πατρών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την 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.



Σημειώματα

Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.00.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, Καθ. Κώστας Μπερμπερίδης 2014.

Κώστας Μπερμπερίδης. «Κινητά Δίκτυα Επικοινωνιών. Διαμόρφωση Πολλαπλών Φερουσών και OFDM».

Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2014.

Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:

<https://eclass.upatras.gr/courses/CEID1109/>



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

Οι εικόνες στις σελίδες: 7, 14,

έχουν δημιουργηθεί με βάση αντίστοιχες εικόνες του βιβλίου: «Συστήματα Επικοινωνιών» των J. G. Proakis και M. Salehi, μετάφραση στα ελληνικά από τους Κ. Καρούμπαλο, Ε. Ζέρβα, Σ. Καραμπογιά και Ε. Σαγκριώτη, εκδόσεις Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών.