

ΕΕ725 - Ειδικά Θέματα Ψηφιακών

Επικοινωνιών

Δημήτρης - Αλέξανδρος Τουμπακάρης

13ο Μάθημα – 1 Ιουνίου 2009

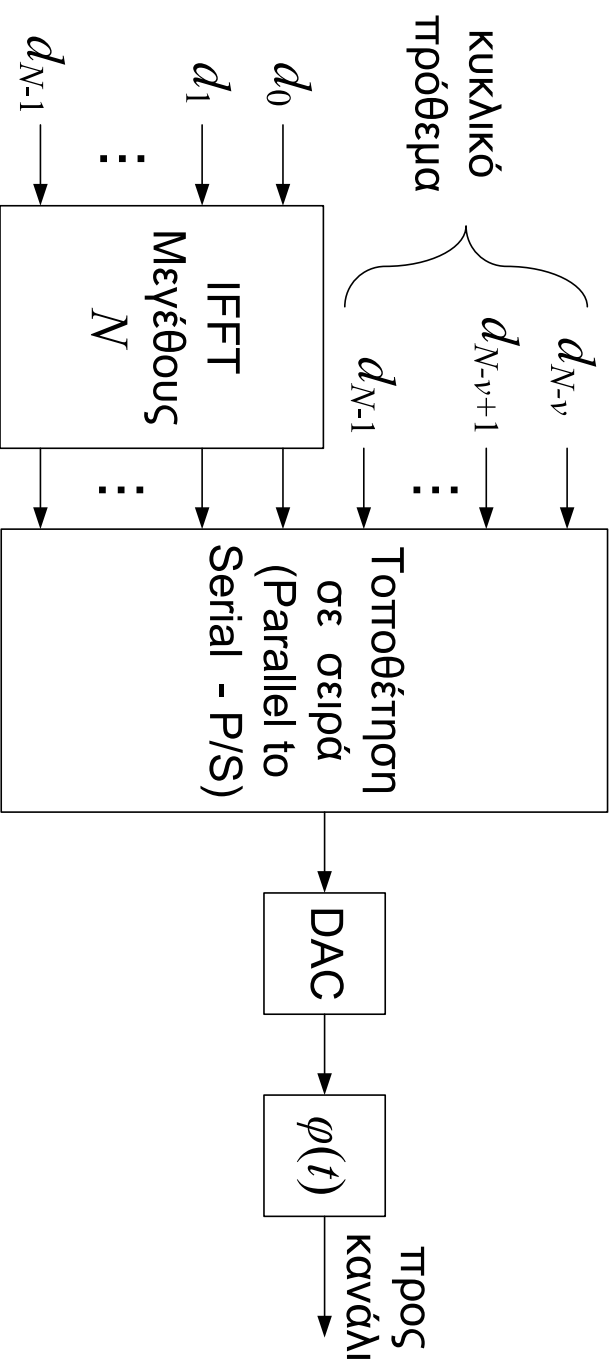
## Περιεχόμενα Μαθήματος

---

- Αρχιτεκτονική και σχεδιασμός πομποδέκτη **OFDM**
  - Van Nee & Prasad, Ch.2, Cioffi, Ch. 4
- Ανασκόπηση Μαθήματος

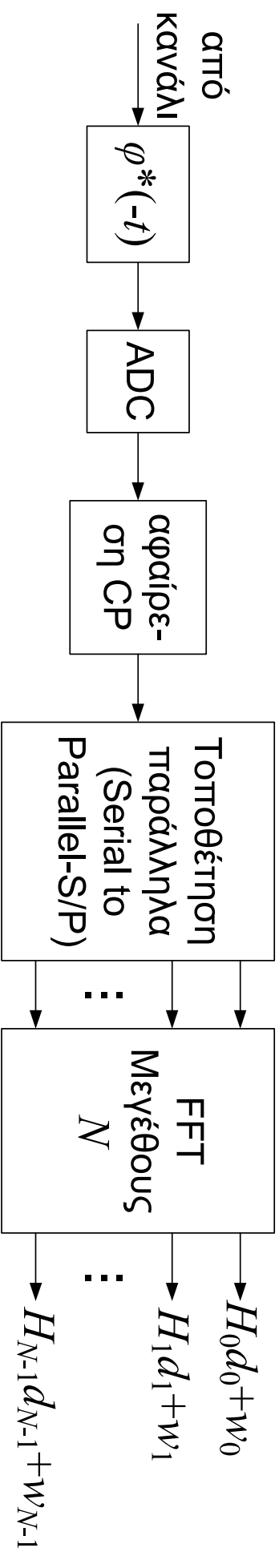
# Αρχιτεκτονική Συστήματος **OFDM** – Ιιομπός

---



# Αρχιτεκτονική Συστήματος **OFDM** – Δέκτης

---



## Παρεμβολή σε γειτονικές συχνότητες

---

- Είδαμε ότι το φάσμα ενός μεμονωμένου συμβόλου OFDM είναι ένα άθροισμα sinc γύρω από τις συχνότητες των υποπερουσών. Επομένως, το φάσμα ενός συμβόλου OFDM δεν περιορίζεται μόνο στην περιοχή συχνοτήτων πλάτους  $\frac{N}{T}$ , αλλά εκτείνεται και έξω από αυτήν.
- Παρατηρούμε ότι όσο λιγότερο διαρκεί ένα σύμβολο OFDM, όσο στενότερα, δηλαδή, είναι τα sinc, τόσο πιο αργά 'πέφτει' το φάσμα του συμβόλου έξω από τις υποφέρουσες.
- Το φασματικό περιεχόμενο έξω από το βασικό εύρος ζώνης  $\frac{N}{T}$  είναι ακόμμη μεγαλύτερο στην πράξη λόγω των διαδοχικών συμβόλων OFDM που μεταδίδονται. Οι (απότομες) αλλαγές των κυματομορφών στα όρια των συμβόλων οδηγούν στη δημιουργία υψηλών συχνοτήτων στο φάσμα.

## Παρεμβολή σε γειτονικές συχνότητες (συνέχεια)

---

- Δύσεις
  - Μεγαλύτερη απομόνωση του συστήματος **OFDM** από γειτονικά συστήματα που λειτουργούν σε γειτονικές φέρονσες με χρήση ζωνών φύλαξης → φασματική απώλεια.
  - Χρήση λιγότερης ισχύος ώστε να μειωθούν οι παρεμβολές ή/και εικονικών υποφερουσών (**virtual subcarriers**) → απώλεια ρυθμού μετάδοσης.
  - **Windowing** (παραθύρωση) → παραμόρφωση σήματος, ελάττωση **delay spread** το οποίο μπορεί να αντιστραφεί το σύστημα.

## Windowing στο χρόνο

---

- Η ιδέα: Να πολλαπλασιάσουμε το σύμβολο **OFDM** στο χρόνο με μια συνάρτηση  $w(t)$  η οποία θα ελαττώσει το πλάτος του σήματος στα όρια του συμβόλου ούτως ώστε οι αλλαγές μεταξύ συμβόλων να είναι λιγότερο 'απότομες'.

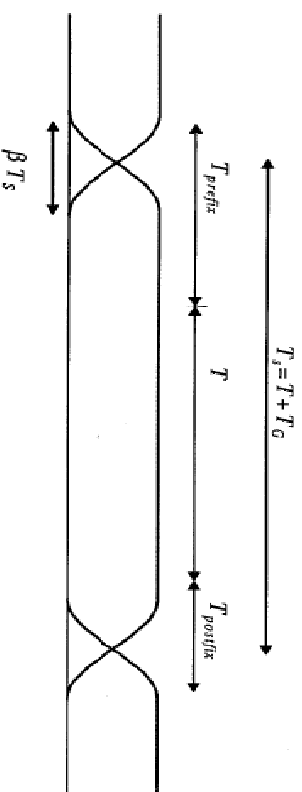
$$s(t) = \Re \left\{ w(t - t_s) \sum_{i=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} d_{i+\frac{N}{2}} \exp \left( j2\pi \left( f_c - \frac{i+0.5}{T} \right) (t - t_s - T_{CP}) \right) \right\},$$
$$t_s \leq t \leq t_s + T_s(1 + \beta)$$

$$s(t) = 0, t < t_s \text{ και } t > t_s + T_s(1 + \beta)$$

- Η περίοδος μετάδοσης συμβόλων **OFDM**,  $T_s$ , είναι μικρότερη από τη διάρκεια του συμβόλου **OFDM** η οποία περιλαμβάνει το σύμβολο, το κυκλικό πρόθεμα και, πιθανώς, κυκλικό επίθεμα (**postfix**). Δηλαδή, διαδοχικά σύμβολα **OFDM** επικαλύπτονται στο χρόνο.
- Το μήκος της περιοχής επικάλυψης στο όριο δύο συμβόλων ισούται με  $\beta T_s$ .

## Windowing στο χρόνο (2)

---



(Σχρήμα από Van Nee & Prasad)

- Ένας από τους τύπους παραθύρου που χρησιμοποιείται συχνά είναι το ανυψωμένο συνημίτονο (**raised cosine**) (βλ. π.χ. Van Nee & Prasad, 2.4).
- Εναλλακτικά, το **windowing** μπορεί να γίνει με χρήση φίλτρου (συνέλιξη στο χρόνο).
- Η χρήση **windowing** οδηγεί σε παραμόρφωση και, επομένως, σε ελάττωση του **delay spread** το οποίο μπορεί να αντιστραφεί ένα σύστημα. Συνεπώς, ο σχεδιασμός της  $w(t)$  και η επιλογή των  $T_s$  και  $\beta$  απαιτεί προσοχή.



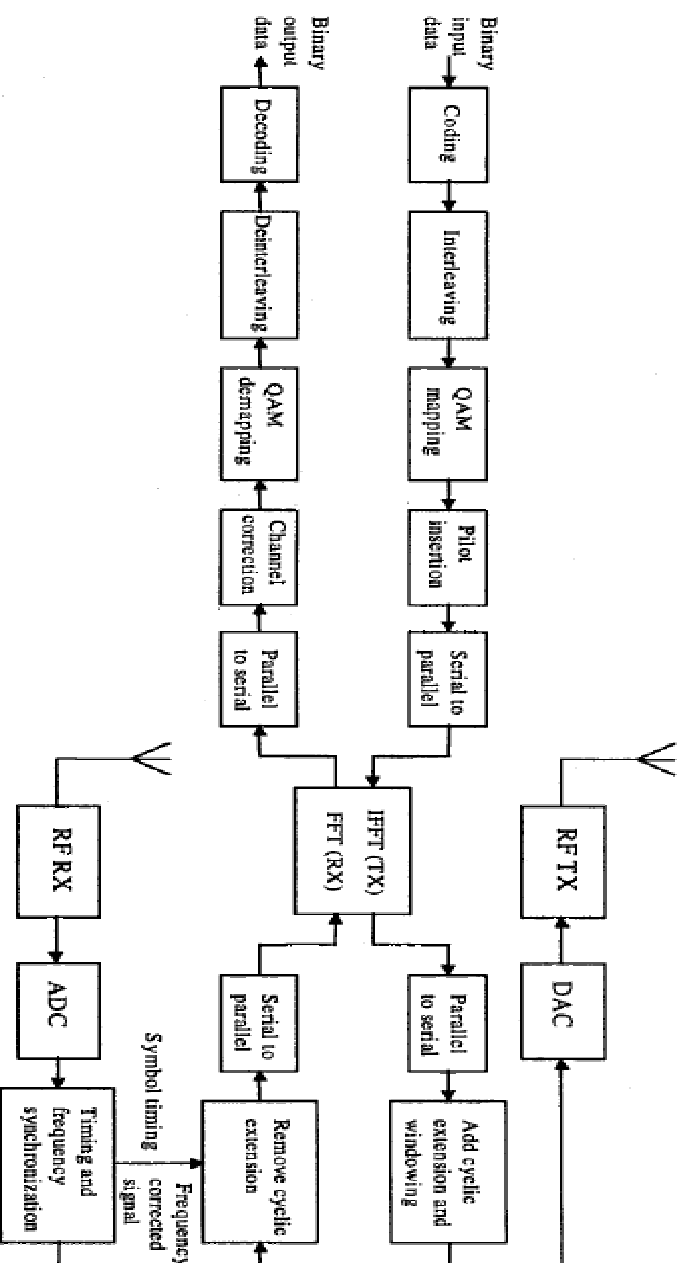
## Χρήση εικονικών υποφερουσών (**Virtual Subcarriers**)

---

- Η ιδέα: Δε γίνεται μετάδοση (και, επομένως, δε χρησιμοποιείται ισχύς) σε κάποιες από τις υποφέρουσες στα άκρα των συμβόλων OFDM.
- Επομένως, ελαττώνεται το φάσμα του σήματος στις παρυφές του συμβόλου.
- Το τίμημα είναι η απώλεια ρυθμού μετάδοσης.

# Συνολική αρχιτεκτονική συστήματος OFDM (ασύρματα συστήματα)

---



(Σχήμα από Van Nee & Prasad)

## Πώς επιλέγονται οι παράμετροι ενός συστήματος **OFDM**;

---

- Ο σχεδιασμός ενός συστήματος **OFDM** περιλαμβάνει ένα συμβιβασμό (**tradeoff**) μεταξύ αντικρουόμενων στόχων.
- Βασικές παράμετροι: 1) Εύρος ζώνης 2) Ρυθμός μετάδοσης 3) **delay spread**.
- **delay spread** → καθορισμός κυκλικού προθέματος. Συνήθως,  $T_{CP} \sim 2 - 4 \times \tau_{rms}$ .

## Πώς επιλέγονται οι παράμετροι ενός συστήματος **OFDM**; (2)

---

- Διάρκεια συμβόλου  $T$ . Θέλουμε να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη, ώστε να ελαχιστοποιήσουμε την απώλεια ρυθμού μετάδοσης και ισχύος λόγω του κυκλικού προθέματος. Ωστόσο, μεγάλο  $T$  συνεπάγεται και μικρότερο εύρος ζώνης υποφέρουσας  $\frac{1}{T}$  και, συνεπώς,
  - Μεγαλύτερη πολυπλοκότητα συστήματος (περισσότερες υποφέρουσες για δεδομένο διαθέσιμο συνολικό εύρος ζώνης)
  - Μεγαλύτερη ευαισθησία σε θόρυβο φάσης και απόκλιση συχνότητας φέρουσας
  - Μεγαλύτερο λόγο μέγιστου προς μέσο σήμα (PAR)

Συνήθως, επιδιώκουμε να ισχύει  $T > 5T_{CP}$ .

## Πώς επιλέγονται οι παράμετροι ενός συστήματος **OFDM**; (3)

---

- Αριθμός υποφρεουσών  $N$ .
  - Για δεδομένο εύρος ζώνης  $W$ :  $N \sim \frac{W}{(1/T)}$
  - Για δεδομένο ρυθμό μετάδοσης  $R$ :  $N \sim \frac{R}{(\text{ρυθμός μετάδοσης ανά υποφρέουσα})}$

## Παράδειγμα συστήματος **OFDM: IEEE802.11a**

---

- Τα συστήματα **IEEE802.11a** λειτουργούν στην περιοχή των **5 GHz**. Προσφέρουν ρυθμό μετάδοσης έως και **54 Mbps** (συμμετρικό) σε ακτίνα της τάξης των **100 m**.
- Τυπικό **delay spread** περιβάλλοντος **LAN** στα **5 GHz**: **50 – 500 ns** → επιλέγεται κυκλικό πρόθεμα μήκους **800 ns**.
- Εύρος ζώνης συμφωνίας (**coherence bandwidth**)  $\sim \frac{1}{\text{delay spread}}$  = **2 MHz**  
→ επιλέγεται εύρος ζώνης υποφέρουσας (**subcarrier bandwidth**) = **312.5 kHz** << **coherence bandwidth**.
- Διάρκεια συμβόλου στο χρόνο (χωρίς κυκλικό πρόθεμα):  $T = \frac{1}{312.5 \text{ kHz}} = 3.2 \mu\text{s}$ .

## Παράδειγμα συστήματος **OFDM: IEEE802.11a** (2)

---

- Συνολική διάρκεια συμβόλου:  $T + T_{CP} = 4 \mu s$ .
- Αριθμός υποφρεουσών:  $64 \rightarrow$  συνολικό εύρος ζώνης =  $64 \times 312.5 \text{ kHz} = 20 \text{ MHz}$ .
- Από τις 64 υποφρεουσες, 12 είναι εικονικές, 48 χρησιμοποιούνται για μετάδοση δεδομένων και 4 είναι υποφρεουσες-πιλότοι (για εκτίμηση καναλιού και συγχρονισμό του δέκτη).
- Μέγεθος **FFT**:  $64 \rightarrow 64$  μυαδικά δείγματα στο χρόνο (εάν θεωρηθεί το βαθύτερατό ισοδύναμο) + 16 για κυκλικό πρόθεμα (σύνολο 80).

## Παράδειγμα συστήματος **OFDM: IEEE802.11a** (3)

---

- Διαμόρφωση: **QAM** (**BPSK** έως και **64QAM**) σε συνδυασμό με συνελκτικό κώδικα (**convolutional code**)  $r = 1/2$  η  $3/4$ .
- $r$ : Ο λόγος ψηφίων πληροφορίας προς τα συνολικά (κωδικοποιημένα) ψηφία που μεταδίδονται στο κανάλι.
- Τα **bits** πληροφορίας κατ' αρχήν κωδικοποιούνται με χρήση του συνελκτικού κώδικα και, στη συνέχεια, απεικονίζονται (**mapped**) σε σύμβολα **QAM**.
- Η ίδια διαμόρφωση χρησιμοποιείται και στις 48 υποφέρουσες που μεταφέρουν δεδομένα.



## Παράδειγμα συστήματος **OFDM: IEEE802.11a** (4)

---

- Ελάχιστος ρυθμός μετάδοσης (BPSK με κώδικα  $r = 1/2$ ):  $(1 \text{ bit/υποφέρουσα}) \times 48 \times 1/2 \times \left(\frac{1}{4\mu s} \text{ σύμβολα OFDM ανά δευτερόλεπτο}\right) = 24 \times 2.5 \cdot 10^5 = 6 \text{ Mbps}$ .
- Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης (64QAM με κώδικα  $r = 3/4$ ):  $(6 \text{ bits/υποφέρουσα}) \times 48 \times 3/4 \times \left(\frac{1}{4\mu s} \text{ σύμβολα OFDM ανά δευτερόλεπτο}\right) = 216 \times 2.5 \cdot 10^5 = 54 \text{ Mbps}$ .

## Παράδειγμα συστήματος **OFDM: DVB-T**

---

- Στις συμβατικές τηλεοπτικές συχνότητες στις οποίες λειτουργούν τα συστήματα **DVB-T** και λόγω οπτικής επαφής πομπού-δέκτη δεν εμφανίζεται σημαντική πολυδιάδοση. Ωστόσο, σε δίκτυα μοναδικής συχνότητας (**Single Frequency Networks - SFN**) ο δέκτης ενδέχεται να λαμβάνει σήματα από περισσότερους από έναν πομπούς.
- Κυκλικό πρόβλημα:  $7-224 \mu s$  (τα  $224 \mu s$  αντιστοιχούν σε απόσταση  $67 \text{ km}$  από τον πιο απομακρυσμένο πομπό).
- Μπορούν να επιλεγούν δύο μεγέθη **FFT**, ανάλογα με την ταχύτητα **Doppler**. Συνήθως, για φορητά/κινητά τελεματικά χρησιμοποιείται **FFT 2-K** (2048), ενώ για σταθερούς δέκτες χρησιμοποιείται **FFT 8-K** (8192).

## Παράδειγμα συστήματος **OFDM: DVB-T (2)**

---

- Λειτουργία σε 8-K: Εύρος ζώνης υποφέρουσας = 1.116 kHz  $\rightarrow$  διάρκεια συμβόλου στο χρόνο (χωρίς το κυκλικό πρόβλημα)  $T = 896 \mu s$ . Σε 2-K: Εύρος ζώνης υποφέρουσας = 4.464 kHz  $\rightarrow$  μικρότερη διάρκεια συμβόλου ( $224 \mu s$ ).
- Συνολικό εύρος ζώνης (σε 8-K) =  $8192 \times 1.116 = 9.142$  MHz.
- Ρυθμοί μετάδοσης: 4.98 – 31.67 Mbps.

## Παράδειγμα συστήματος **OFDM: ADSL (ITU-T G.992.1)**

---

- **ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Loop.** *Asymmetric:* Ο ρυθμός μετάδοσης προς το χρήστη (downstream) είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό μετάδοσης προς το κέντρο (uplink).
- Αποτελεί σχεδιαστική επιλογή. Άλλα συστήματα (π.χ. **VDSL**) μπορούν να προσφέρουν και συμμετρικές υπηρεσίες.
- Προσφέρει ταχύτητες από 500 kbps έως 12 Mbps (downstream) μέσω συνεστραμμένου ζεύγους καλωδίων χαλκού (twisted pair) σε αποστάσεις έως και 3 km. Χρησιμοποιεί τις συχνότητες από 0 έως 1.104 MHz → μετάδοση βασικής ζώνης (baseband).

## Παράδειγμα συστήματος **OFDM: ADSL (2)**

---

- Νεότερες γενιές/πρότυπα **DSL** προσφέρουν υψηλότερες ταχύτητες.
  - **ADSL2+**: Έως **24 Mbps** (downstream), με χρήση φάσματος έως τα **2.208 MHz**.
  - **VDSL2**: Τυπικές ταχύτητες **50 Mbps**. Μπορεί να υπερβεί τα **100 Mbps** ανά κατεύθυνση για μικρά μήκη βρόχου. Το εύρος ζώνης επεκτείνεται έως και τα **17.664 MHz**.
  - Τόσο το **ADSL2+** όσο και το **VDSL** χρησιμοποιούν **OFDM** (στο **VDSL1** η υλοποίηση μπορούσε να γίνει και ως σύστημα “single carrier”).
- Εύρος ζώνης υποφέρουσας:  $4.3125 \text{ kHz} \rightarrow T = 231.9 \mu\text{s}$ . Στο **DSL** οι υποφέρουσες ονομάζονται και τόνοι (tones).

## Παράδειγμα συστήματος **OFDM: ADSL (3)**

---

- Κυκλικό πρόθεμα:  $\sim 18.1 \mu s \rightarrow T + T_{CP} = 250 \mu s$ .
- Αριθμός υποφρεουσών  $N = 256 \rightarrow$  συνολικό εύρος ζώνης  $= 256 \times 4.3125 \text{ kHz} = 1.104 \text{ MHz}$ .
- Με βάση το θεώρημα δειγματοληψίας, χρειαζόμαστε τουλάχιστον  $2f_h (T + T_{CP}) = 2 \times 1.104 \cdot 10^6 \times 250 \cdot 10^{-6} = 552$  δείγματα ανά σύμβολο (512 + 40).
- **upstream**: Τόνοι 0-31. Μέγιστη συχνότητα: 138 kHz. Επομένως, για τη μετάδοση **upstream**, μπορεί να χρησιμοποιηθεί FFT 32 σημείων. Επίσης, η δειγματοληψία μπορεί να γίνει στα 276 kHz (64+5 δείγματα/σύμβολο).
- Μέγιστο μέγεθος αστερισμού:  $b = 15$  bits (32K-QAM)

## Παράδειγμα συστήματος **OFDM: ADSL (4)**

---

- Προαιρετικά, χρησιμοποιείται και κώδικας Trellis ο οποίος εφαρμόζεται σε κάθε σύμβολο (στο πεδίο της συχνότητας).
- Μέγιστη ισχύς: 20.5 dBm downstream, 14.5 dBm upstream.
- Συνήθως τα συστήματα DSL που βασίζονται σε OFDM αποκαλούνται συστήματα Discrete Multitone Modulation (DMT).

## Παράδειγμα συστήματος **OFDM: ADSL (5)**

---

- Στην ουσία, ένα σύστημα **DMT** είναι ένα σύστημα **OFDM** στο οποίο εφαρμόζεται, επιπλέον, κατανομή ισχύος ανά υποφέρουσα στον πομπό, δηλαδή η ισχύς σε κάθε τόνο δεν είναι η ίδια, αλλά εξαρτάται από
  - Το λόγο σήματος προς θόρυβο σε κάθε τόνο (ο οποίος, με τη σειρά του εξαρτάται από την απόσβεση και τις παρεμβολές)
  - Την συνολική διαθέσιμη ισχύ
  - Τυχόν περιορισμούς στη μέγιστη ισχύ που μπορεί να εκπνεφθεί σε κάθε τόνο (**PSD masks**).
- Επομένως, το μέγεθος του αστερισμού σε κάθε τόνο (και, κατά συνέπεια, ο αριθμός μεταδιδόμενων **bits**) μεταβάλλεται, στη γενική περίπτωση.



## Παράδειγμα συστήματος **OFDM: ADSL (6)**

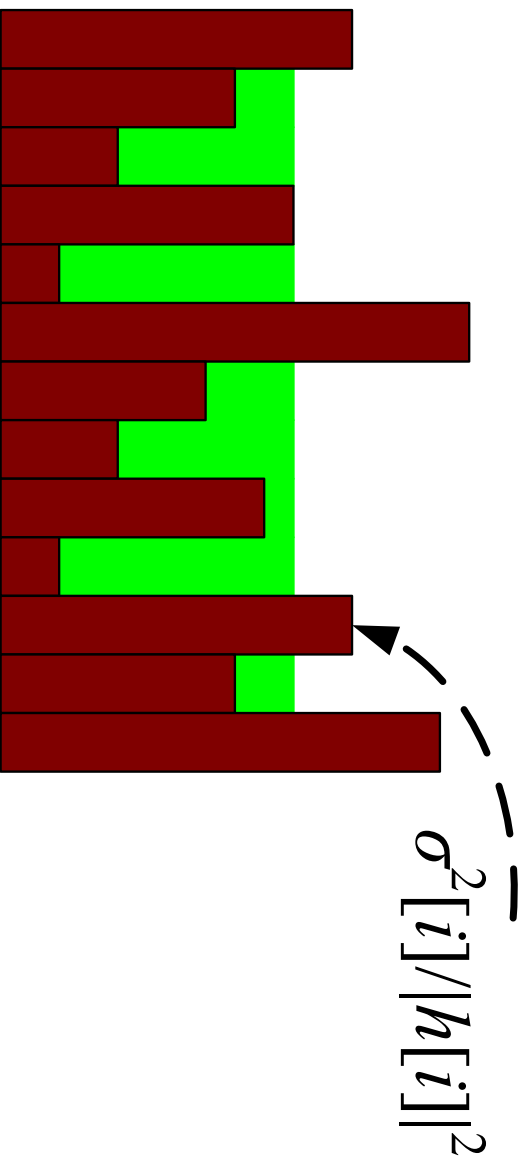
---

- Η κατανομή ισχύος στον πομπό επιτρέπει καλύτερη προσέγγιση της χωρητικότητας του καναλιού. Ωστόσο, απαιτεί γνώση του καναλιού στον πομπό και γι' αυτό το λόγο στην πράξη είναι εύκολα εφαρμόσιμη μόνο σε ενσύρματα συστήματα ή σε ασύρματα συστήματα όπου το κανάλι μεταβάλλεται πολύ αργά.
- Από τη Θεωρία Πληροφορίας προκύπτει ότι η κατανομή ισχύος πρέπει να γίνει έτσι ώστε στους τόνους με μεγαλύτερο **SNR** να χρησιμοποιείται περισσότερη ισχύς. Υπάρχει περίπτωση κάποιοι τόνοι με μεγάλη απόσβεση ή μεγάλο θόρυβο να μη χρησιμοποιηθούν καθόλου.
- Για παράδειγμα, στο **DSL**, για μεγάλα μήκη γραμμής δε χρησιμοποιούνται τόνοι σε υψηλές συχνότητες όπου η απόσβεση των καλωδίων χαλακού είναι μεγάλη (και, συνεπώς, το **SNR** είναι μικρό).

## Παράδειγμα συστήματος **OFDM: ADSL** (7)

---

- Η κατανομή ισχύος βασίζεται στον αλγόριθμο “waterfilling”) (ή waterpouring), όπου, κατά κάποιο τρόπο, η διαθέσιμη ισχύς ‘γεμίζει’ δοχεία με ύψος αντιστρόφως ανάλογο του SNR.



## Παράδειγμα συστήματος **OFDM: ADSL (8)**

---

- Στην πράξη, ο αλγόριθμος (Levin-Campello) που χρησιμοποιείται στα συστήματα **DSL** είναι τροποποιημένο “waterfilling” ούτως ώστε
  - Ο αριθμός **bits** ανά τόνο να είναι ακέραιος
  - Να μην παραβιάζονται τυχόν **PSD masks**.
- Η κατανομή ισχύος γίνεται κατά την αρχικοποίηση και βασίζεται στο γεγονός ότι το κανάλι δεν αλλάζει γρήγορα ή αλλάζει σπάνια (π.χ. εμφάνιση παρεμβολής σε κάποιους τόνους λόγω διαφωνίας από χρήστη που ανάβει ή σβήνει το δικό του **modem**).

## Παράδειγμα συστήματος **OFDM: ADSL (9)**

---

- Ωστόσο, στα συστήματα DSL η κατανομή bits στους τόνους μπορεί να μεταβάλλεται με αργό τρόπο **bit swapping**.
  - Η ιδέα: Κάθε φορά να επιτρέπεται η αφαίρεση 1 bit από ένα τόνο και η μεταφορά του σε άλλον (εάν θέλουμε ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης να παραμένει σταθερός).
  - Με τον τρόπο αυτό δεν επηρεάζεται η ροή της μετάδοσης. Ταυτόχρονα, η ελάττωση του ωφέλιμου ρυθμού μετάδοσης προκειμένου να ανταλλαγούν μηνύματα **bit swapping** είναι μικρή.

## Ανασκόπηση Μαθήματος

---

- Αρχιτεκτονική και σχεδιασμός πομποδέκτη OFDM
- Ανασκόπηση Μαθήματος

## Ανασκόπηση μαθήματος

---

### Θέματα που καλύψαμε στο μάθημα

- Επανάληψη βασικών εννοιών θεωρίας πιθανοτήτων και στοχαστικών ανελίξεων.
- Επανάληψη βασικών εννοιών θεωρίας σημάτων και συστημάτων.
- Αναπαράσταση κυματομορφών ως διανύσματα. Διαμόρφωση/Αποδιαμόρφωση.
- Θόρυβος και επίδραση στα Ψηφιακά Συστήματα Επικοινωνιών.
- Ανίχνευση στο δέκτη (MAP, ML).
- Εξειδίκευση στο κανάλι AWGN: Κατηγορίες αστερισμών και ανάλυση πιθανότητας σφάλματος στο δέκτη. PAM και QAM.
- Διασυμβολική παρεμβολή: Μοντελοποίηση και ισοστάθμιση καναλιού. Κριτήριο Nyquist.
- Κανάλια κινητών επικοινωνιών. Πιθανότητα σφάλματος σε κανάλια με επίπεδη διάκριση Rayleigh. Τεχνικές Διαφορισμού.
- Διαμόρφωση OFDM.

## Θέματα Ψηφιακών Επικοινωνιών που δεν καλύψαμε στο μάθημα

---

- Δεπτομερής ανάλυση και μελέτη σχεδιασμού ισοσταθμιστών.
- Συγχρονισμός (**PLLs**, ανάκτηση χρονισμού, ανάκτηση φάσης φέροντας).
- Ακολουθιακή ανίχνευση: Αλγόριθμοι **Viterbi**, **APP**, **SOVA**, επαναληπτική αποκωδικοποίηση (**iterative decoding**).
- Κωδικοποίηση Καναλιού: Συνελκτικοί κώδικες, κώδικες Πλέγματος, κώδικες **Trellis**, κώδικες **block**, κώδικες **Turbo**, κώδικες **LDPC**.
- Γενικευμένος Ισοσταθμιστής με ανάδραση αποφάσεων (**GDFF**).
- Ψηφιακά συστήματα πολλών χρηστών (**multi-user**): Κανάλι πολλαπλής πρόσβασης (**MAC**), ευρυεκπομπής (**broadcast**) και παρεμβολών (**interference**).

## Σχετικά μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Πάτρας

---

- Θεωρία Πληροφορίας/Προχωρημένα Θέματα Θεωρίας Πληροφορίας.
- Τηλεπικοινωνιακά Ηλεκτρονικά/Ειδικά Κεφάλαια Τηλεπικοινωνιακών Ηλεκτρονικών.
- Εισαγωγή στη Θεωρία Εκτίμησης και Ανίχνευσης.
- Συστήματα Ψηφιακής Επεξεργασίας.
- Προχωρημένα Θέματα Τηλεπικοινωνιών (Η/Υ).
- Ψηφιακά Συστήματα Επικοινωνιών: Προχωρημένα Θέματα (Η/Υ).



# ΚΑΛΗΣ ΔΙΑΚΟΠΗΣ!