

ΕΕ725

Ειδικά Θέματα Ψηφιακών Επικοινωνιών

12η διάλεξη

Δημήτρης-Αλέξανδρος Τουμπακάρης

Τμήμα ΗΜ&ΤΥ, Πανεπιστήμιο Πατρών

18 Μαΐου 2010

Αντιστοιχία με βιβλιογραφία

- R. van Nee & R. Prasad, OFDM for Wireless Multimedia Communications: 2.1 – 2.3.
- Cioffi: 4ο κεφάλαιο.

Περιεχόμενα σημερινού μαθήματος

- 1 Σχεδιασμός συστημάτων OFDM
 - Δομή πομπού και δέκτη
 - Παρεμβολή σε γειτονικές συχνότητες
 - Σχεδιασμός ασύρματων συστημάτων OFDM
- 2 Παραδείγματα συστημάτων OFDM
 - IEEE802.11a
 - DVB-T
 - ADSL
- 3 Ανασκόπηση μαθήματος

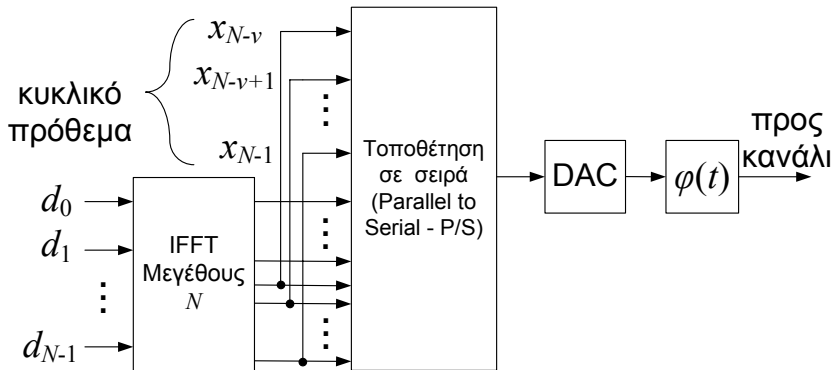
Ανακεφαλαίωση προηγούμενου μαθήματος

- Στέλνουμε N σήματα σε χρόνο $T + T_{CP}$ ($T = 1/f_0$ είναι το εύρος ζώνης κάθε υποφέρουσας).
- Το συνολικό φάσμα που χρησιμοποιείται είναι της τάξης των $N/T = Nf_0$.
- Το κυκλικό πρόθεμα κοστίζει σε χρόνο (χρησιμοποιούμε $T + T_{CP}$ αντί για T) και σε ενέργεια (χρησιμοποιούμε $(T + T_{CP})\bar{P}$ αντί για $T\bar{P}$ για N σύμβολα).
- Σύγκριση με συστήματα απλής φέρουσας ("single carrier" -- SC) σε κανάλι AWGN ($T_{CP} = 0$).
 - SC: 1 σύμβολο διάρκειας $\sim T/N$. Χρήση εύρους ζώνης $\sim N/T$ για κάθε σύμβολο (όλο το διαθέσιμο φάσμα).
 - OFDM: N σύμβολα διάρκειας T (χρήση όλου του διαθέσιμου χρόνου). Χρήση εύρους ζώνης της τάξης T/N .
 - Εάν θεωρήσουμε μια ομάδα N συμβόλων, το συνολικό φάσμα που χρησιμοποιούμε και στις δύο περιπτώσεις είναι N/T . Επίσης, ο συνολικός χρόνος που χρησιμοποιούμε είναι T

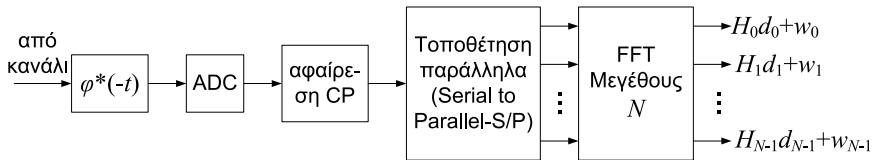
Τι καταφέραμε :

- Στέλνουμε d_n , $n = 0, 1, \dots, N - 1$. Λαμβάνουμε $H_n d_n + w_n$, όπου το H_n εξαρτάται μόνο από το κανάλι στη συχνότητα n/T (w_n είναι ο θόρυβος) \rightarrow σημαντική απλοποίηση του ισοσταθμιστή δέκτη.
- Ευκολότερη προσαρμογή (adaptation) δέκτη. Καθώς το κανάλι αλλάζει, αρκεί να μεταβάλουμε τον ισοσταθμιστή (δηλαδή το $H_n^*/|H_n|^2$) σε κάθε υποφέρουσα. Αυτό είναι πολύ απλούστερο σε σχέση με τη χρήση προσαρμοστικού DFE σε συστήματα απλής φέρουσας.
- Ευκολότερη χρήση βέλτιστης κατανομής ισχύος στον πομπό όταν αυτός γνωρίζει το κανάλι (περισσότερα στη συνέχεια).
- Επίσης, το OFDM επεκτείνεται εύκολα σε σύστημα πρόσβασης πολλών χρηστών (OFDMA: IEEE802.16d/e, 3GPP-LTE).
- Φυσικά, το κόστος είναι ο FFT/IFFT (αν και το κόστος υλοποίησης συνεχώς ελαττώνεται), αυξημένη ευαισθησία σε απόκλιση συχνότητας φέρουσας (CFO), μεγάλο PAR.

Αρχιτεκτονική Συστήματος OFDM – Πομπός



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 υποφερουσών. 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 ακόμη 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)

Λύσεις

- Μεγαλύτερη απομόνωση του συστήματος OFDM από γειτονικά συστήματα που λειτουργούν σε γειτονικές φέρουσες με χρήση ζωνών φύλαξης (guard bands) → 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 αντιμετωπίσει το σύστημα.

Windowing στο χρόνο

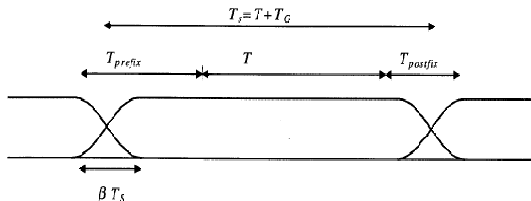
- Η ιδέα: Να πολλαπλασιάσουμε το σύμβολο OFDM στο χρόνο με μια συνάρτηση $w(t)$ η οποία θα ελαττώσει το πλάτος του σήματος στα όρια του συμβόλου ούτως ώστε οι αλλαγές μεταξύ συμβόλων να είναι λιγότερο "απότομες".

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

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

- 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 βT_s .

Windowing στο χρόνο (2)



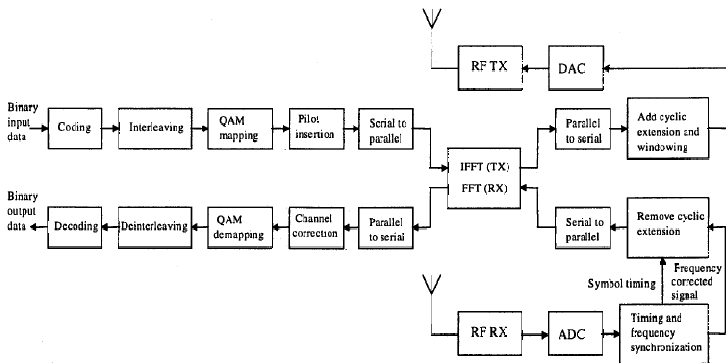
(Σχήμα από Van Nee & Prasad)

- 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 αντιμετωπίσει ένα σύστημα. Συνεπώς, ο σχεδιασμός της $w(t)$ και η επιλογή των T_s και β 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, ελαπώνεται 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 \rightarrow 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 στο doppler
 - 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 υποφερουσών N .
 - Για δεδομένο εύρος ζώνης W : $N \sim \frac{W}{(1/T)}$
 - Για δεδομένο ρυθμό μετάδοσης R :
$$N \sim \frac{R}{(\text{ρυθμός μετάδοσης ανά υποφέρουσα})}$$

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) $\sim \frac{1}{\text{delay spread}} = 2 \text{ MHz}$ → επιλέγεται εύρος ζώνης υποφέρουσας (subcarrier bandwidth) = 312.5 kHz \ll 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 υποφερουσών: $64 \rightarrow$ συνολικό εύρος ζώνης $= 64 \times 312.5$ kHz $= 20$ MHz.
- Από τις 64 υποφέρουσες, 12 είναι εικονικές, 48 χρησιμοποιούνται για μετάδοση δεδομένων και 4 είναι υποφέρουσες-πυλότει (για εκτίμηση καναλιού και συγχρονισμό του δέκτη).
- Μέγεθος FFT: $64 \rightarrow 64$ μιγαδικά δείγματα στο χρόνο (εάν θεωρηθεί το βαθυπερατό 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 κωδικοποιούνται αρχικά 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 bit/υποφέρουσα) $\times 48 \times 1/2$
 $\times \left(\frac{1}{4\mu s} \text{ σύμβολα OFDM ανά δευτερόλεπτο} \right) = 24 \times 2.5 \cdot 10^5 = 6$
Mbps.
- Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης (64QAM με κώδικα $r = 3/4$):
(6 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 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 πολυδιόδευση. Ωστόσο, σε δίκτυα μοναδικής συχνότητας (Single Frequency Networks - SFN) ο δέκτης ενδέχεται να λαμβάνει σήματα από περισσότερους από έναν πομπούς.
- Κυκλικό πρόθεμα: 7–224 μs (τα 224 μs αντιστοιχούν σε απόσταση 67 km από τον πιο απομακρυσμένο πομπό).
- Μπορούν να επιλεγούν δύο μεγέθη FFT, ανάλογα με την ταχύτητα Doppler. Συνήθως, για φορητά/κινητά τερματικά 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 πρόθεμα) $T = 896 \mu s$. 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).
- Η ασυμμετρία 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. Χρησιμοποιεί συχνότητες έως και τα 17.664 MHz.
 - Τόσο το ADSL2+ όσο και το VDSL χρησιμοποιούν OFDM (Το πρότυπο VDSL1 προέβλεπε και υλοποίηση ``single carrier``).
- Εύρος ζώνης υποφέρουσας: 4.3125 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 υποφερουσών $N = 256 \rightarrow$ 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)

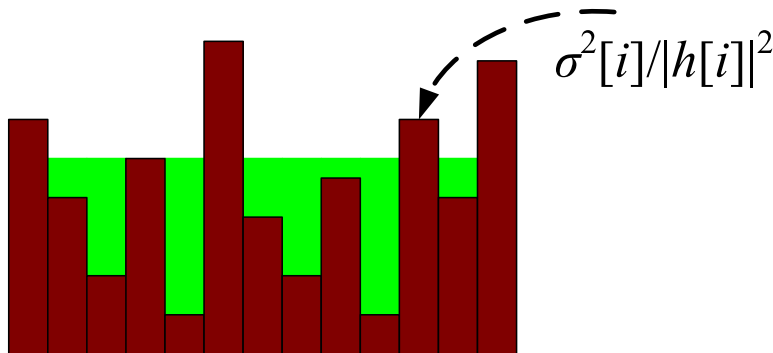
- Στην ουσία, ένα σύστημα DMT είναι ένα σύστημα OFDM στο οποίο εφαρμόζεται, επιπλέον, κατανομή ισχύος ανά υποφέρουσα στον πομπό, δηλαδή η ισχύς σε κάθε τόνο δεν είναι η ίδια, αλλά εξαρτάται από
 - Το λόγο σήματος προς θόρυβο σε κάθε τόνο (ο οποίος, με τη σειρά του εξαρτάται από την απόσβεση και τις παρεμβολές)
 - Τη συνολική διαθέσιμη ισχύ
 - Τυχόν περιορισμούς στη μέγιστη ισχύ που μπορεί να εκπνευθεί 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 χαλκού 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 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 ελάτπωση του ωφέλιμου ρυθμού μετάδοσης προκειμένου να ανταλλάγουν μηνύματα bit swapping είναι μικρή.

Ανασκόπηση μαθήματος

Θέματα που καλύψαμε στο μάθημα

- Επανάληψη βασικών εννοιών θεωρίας πιθανοτήτων και στοχαστικών ανεξίτητων.
- 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 διάλειαση Rayleigh. Τεχνικές Διαφορισμού.
- Διαμόρφωση OFDM.

Θέματα Ψηφιακών Επικοινωνιών που δεν καλύψαμε στο μάθημα

- Λεπτομερής ανάλυση και μελέτη σχεδιασμού ισοσταθμιστών.
- Συγχρονισμός (PLLs, ανάκτηση χρονισμού, ανάκτηση φάσης φέρουσας).
- Ακολουθιακή ανίχνευση: Αλγόριθμοι Viterbi, APP, SOVA, επαναληπτική αποκωδικοποίηση (iterative decoding).
- Κωδικοποίηση Καναλιού: Συνελικτικοί κώδικες, κώδικες Trellis, κώδικες block, κώδικες Turbo, κώδικες LDPC.
- Γενικευμένος Ισοσταθμιστής με ανάδραση αποφάσεων (GDFE).
- 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).