

ΕΕ725

Ειδικά Θέματα Ψηφιακών Επικοινωνιών

9η διάλεξη

Δημήτρης-Αλέξανδρος Τουμπακάρης

Τμήμα ΗΜ&ΤΥ, Πανεπιστήμιο Πατρών

6 Μαΐου 2010

Αντιστοιχία με βιβλιογραφία

- Cioffi: 3.6, 3.8.1
- Proakis & Salehi, Communication Systems Engineering (2nd ed.): 8.6, 10.1.1
- Tse & Vishwanath, Fundamentals of Wireless Communication: 2ο κεφάλαιο.

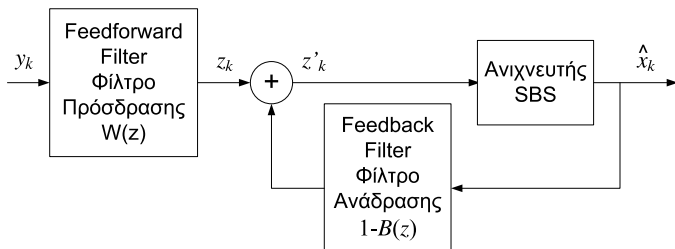
Περιεχόμενα σημερινού μαθήματος

- 1 Ισοστάθμιση (Equalization)
 - Ισοσταθμιστής Ανάδρασης Αποφάσεων - DFE
 - Ο προκωδικοποιητής (precoder) Tomlinson-Harashima

- 2 Το ασύρματο (wireless) κανάλι
 - Φαινόμενα που επηρεάζουν τη μετάδοση στο ασύρματο κανάλι
 - Πολυδιόδευση (Multipath Propagation)

Decision Feedback Equalizer - DFE

- Οι ZF-LE και MMSE-LE είναι γραμμικά φίλτρα.
- Ο DFE είναι ένα μη γραμμικό φίλτρο το οποίο αποτελείται από 2 γραμμικά φίλτρα και ένα κύκλωμα απόφασης (ανιχνευτής Symbol-by-Symbol).
- Η ιδέα: Εάν σε ένα κανάλι έχουμε εκτιμήσει σωστά τα προηγούμενα x_k που μεταδόθηκαν (έως και το x_{k-1}), μπορούμε να τα αφαιρέσουμε από το y_k με αποτέλεσμα η ποσότητα που απομένει να εξαρτάται μόνο από το προς εκτίμηση σύμβολο x_k .



Decision Feedback Equalizer - DFE (2)

- Η συμπεριφορά του DFE εξαρτάται από το αν οι αποφάσεις του ανιχνευτή είναι σωστές. Όταν γίνουν σφάλματα, επηρεάζουν και μελλοντικές αποφάσεις. Το πρόβλημα αυτό που χαρακτηρίζει τους εξισωτές DFE ονομάζεται διάδοση σφαλμάτων (error propagation).
- Η ανάλυση και η σχεδίαση του DFE γίνεται υποθέτοντας ότι δε γίνονται λάθη στις αποφάσεις, με αποτέλεσμα να μπορούν να εφαρμοστούν τεχνικές γραμμικών συστημάτων.
- Όπως και στα γραμμικά φίλτρα, υπάρχουν δύο τύποι DFE, ο ZF-DFE και ο MMSE-DFE. Στα επόμενα θα αναφερθούμε στον MMSE-DFE του οποίου ο ZF-DFE είναι ειδική περίπτωση (και μπορεί να υπολογιστεί θέτοντας $SNR \rightarrow \infty$).

Decision Feedback Equalizer -- DFE (3)

- Όπως και στον MMSE-LE, σκοπός του MMSE-DFE είναι η ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος $e_k = x_k - z'_k$ (βλ. σχήμα DFE σε προηγούμενη διαφάνεια).
- Αποδεικνύεται ότι τα φίλτρα πρόσδρασης (feedforward filter) και ανάδρασης (feedback) ισούνται με

$$W(z) = \frac{1}{\|p\| \gamma_0 G^*(z^{-*})}, \text{ και } B(z) = G(z), \text{ αντίστοιχα,}$$

όπου $G(z)$ είναι ο μοναδικός κανονικός παράγοντας της φασματικής παραγοντοποίησης $Q(z) + \frac{1}{\text{SNR}_{\text{MFB}}} = \gamma_0 G(z) G^*(z^{-*})$.

Ορισμός Κανονικός παράγοντας (canonical factor): Απιατός ($g_k = 0$ για $k < 0$), monic ($g_0 = 1$) και ελάχιστης φάσης (όλοι οι πόλοι εντός του μοναδιαίου κύκλου και όλα τα μηδενικά επάνω η μέσα στο μοναδιαίο κύκλο).

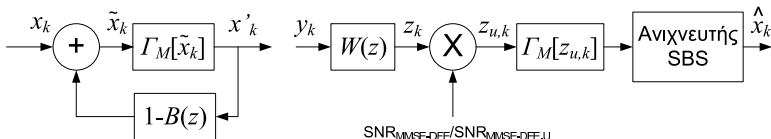
Decision Feedback Equalizer -- DFE (4)

- Αποδεικνύεται ότι η έξοδος z_k του φίλτρου πρόσδρασης εξαρτάται μόνο από εισόδους για χρονικές στιγμές $\leq k$. Οπότε, εάν έχουμε βρει τα x_l , $l < k$, χωρίς σφάλμα, μπορούμε να τα αφαιρέσουμε από τη z_k (με κατάλληλα βάρη που δίνονται από τη $G(z)$) ώστε να ανακτήσουμε, τελικά, τη $z'_k = x_k + e_k$.
- Ο MMSE-DFE είναι πολωμένος (biased).
- Αποδεικνύεται ότι $\text{SNR}_{\text{MMSE-DFE,U}} = \gamma_0 \text{SNR}_{\text{MFB}} - 1$, όπου $\gamma_0 = \frac{1 + \frac{1}{\text{SNR}_{\text{MFB}}}}{1 + \sum_{i=1}^{\infty} |g_i|^2}$.
- Εάν δε γίνονται λάθη στην εκτίμηση των x_k , ο MMSE-DFE είναι τουλάχιστον όσο καλός είναι και ένας MMSE-LE, δεδομένου ότι ο τελευταίος είναι μια ειδική περίπτωση MMSE-LE με $B(z) = 1$.
- Ωστόσο, η επίδοση του MMSE-DFE μπορεί να μην είναι καλή σε κανάλια με σχετικά υψηλή πιθανότητα σφάλματος όπου εμφανίζεται συχνά διάδοση σφαλμάτων.

Προ-ισοστάθμιση στον πομπό:

Ο προκωδικοποιητής (precoder) Tomlinson-Harashima

- Ένας τρόπος για να αντιμετωπιστεί η διάδοση σφαλμάτων στον DFE είναι η χρήση προκωδικοποιητή Tomlinson-Harashima.
- Μπορεί να αποδειχθεί ότι ο συνδυασμός πομπού και δέκτη του σχήματος έχει ίδια απόδοση με τον DFE, χωρίς να εμφανίζεται διάδοση σφάλματος. Ο $\Gamma_M(\cdot)$ είναι ο τελεστής υπολοίπου (modulo operator). $\Gamma_M(x) = x - Md \lfloor \frac{x + \frac{Md}{2}}{Md} \rfloor$ για PAM και SQ-QAM.
- Το κόστος: Μικρή αύξηση της απαιτούμενης ισχύος για τη μετάδοση: κατά $\frac{M^2}{M^2-1}$ για QAM, περισσότερο για μη τετραγωνικούς αστερισμούς.
- Πάντως, η αύξηση της ισχύος είναι της τάξης των λίγων dB.



Το ασύρματο (wireless) κανάλι

- Ισοστάθμιση (Equalization)
 - Ισοσταθμιστής Ανάδρασης Αποφάσεων - DFE
 - Ο προκωδικοποιητής (precoder) Tomlinson-Harashima

- 2 Το ασύρματο (wireless) κανάλι
 - Φαινόμενα που επηρεάζουν τη μετάδοση στο ασύρματο κανάλι
 - Πολυδιόδευση (Multipath Propagation)

Το ασύρματο (wireless) κανάλι

- Μέχρι τώρα είδαμε πώς μπορούμε να μεταδώσουμε από ένα σημείο σε ένα άλλο (point-to-point). Θεωρήσαμε σταθερό και δεδομένο κανάλι, γνωστό τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη. Η μόνη άγνωστη ποσότητα (επιπλέον των μεταδιδόμενων μηνυμάτων) ήταν ο θόρυβος.
- Στην πράξη, το κανάλι μπορεί να μην είναι γνωστό στον πομπό ή στο δέκτη ή και στους δύο. Για να επιτευχθεί επικοινωνία με σύμφωνη (coherent) μετάδοση πρέπει να εκτιμηθεί το κανάλι στο δέκτη, αλλιώς πρέπει χρησιμοποιηθεί ασύμφωνη (non-coherent) μετάδοση.
- Εάν το κανάλι είναι γνωστό όχι μόνο στο δέκτη, αλλά και στον πομπό, ενδέχεται να είναι δυνατή περαιτέρω αύξηση του ρυθμού μετάδοσης με χρήση βελτιστοποίησης εκπεμπόμενου σήματος (transmit optimization).
- Πολλά ασύρματα κανάλια όχι μόνο δεν είναι γνωστά εκ των προτέρων, αλλά, επιπλέον, μεταβάλλονται στο χρόνο.

Το ασύρματο (wireless) κανάλι (2)

Στη συνέχεια θα δούμε

- Ποια φαινόμενα επηρεάζουν τα σήματα στα ασύρματα κανάλια;
- Πώς μοντελοποιούμε τα ασύρματα κανάλια;
- Τι είδους προβλήματα και προκλήσεις παρουσιάζει η χρήση ασύρματων καναλιών;
- Κάποιους από τους τρόπους αύξησης του ρυθμού μετάδοσης ή της αξιοπιστίας μετάδοσης σε ασύρματα κανάλια.

Μετά τη (σχετικά σύντομη) αναφορά στα ασύρματα κανάλια, θα ολοκληρώσουμε το μάθημα με περιγραφή της μεθόδου διαμόρφωσης OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) η οποία χρησιμοποιείται τόσο σε ενσύρματα (και σχετικά αμετάβλητα) κανάλια, όσο και σε ασύρματα (και, γενικά, μεταβαλλόμενα) κανάλια. Εάν μείνει χρόνος, ίσως επιστρέψουμε και πάλι στα ασύρματα κανάλια για να μιλήσουμε για συστήματα πολλαπλών εισόδων και εξόδων (Multiple Input Multiple Output -- MIMO).

Το ασύρματο κανάλι κινητών τηλεπικοινωνιών (mobile wireless channel)

- Θα επικεντρωθούμε σε αυτό το κανάλι λόγω της μεγάλης εφαρμογής των συστημάτων κινητών επικοινωνιών (κινητή τηλεφωνία, ασύρματα τοπικά/μητροπολιτικά δίκτυα).
- Το ασύρματο κανάλι κινητών τηλεπικοινωνιών μεταβάλλεται στο χρόνο και στη συχνότητα.
- Δύο βασικά φαινόμενα:
 - Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (large-scale fading): λόγω απωλειών διαδρομής (path loss) και σκίασης (shadowing) λόγω απορρόφησης ενέργειας από εμπόδια όπως κτίρια και φυσικά εμπόδια (π.χ. λόφοι). Το κανάλι μεταβάλλεται σε αποστάσεις της τάξης του μέγθους της κυψέλης και, συνήθως, η μεταβολή του δεν εξαρτάται από τη συχνότητα.
 - Διαλείψεις μικρής κλίμακας (small-scale fading): λόγω συμβολής πολλαπλών ανακλάσεων του ίδιου σήματος. Το κανάλι μεταβάλλεται σε αποστάσεις της τάξης του μήκους κύματος της φέρουσας συχνότητας και η μεταβολή εξαρτάται από τη συχνότητα.

Απώλειες διαδρομής και σκίαση

- Απώλειες διαδρομής (path loss): Λόγω σφαιρικής διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.
 - Στον ελεύθερο χώρο, η ισχύς μειώνεται με το τετράγωνο της απόστασης r από την πηγή: $P(r) \sim \frac{1}{r^2}$.
 - Σε περιβάλλοντα με ανακλάσεις η απόσβεση ενδέχεται να είναι ακόμα μεγαλύτερη: της τάξης του $\frac{1}{r^4}$ (ύπαιθρος), ακόμα και $\frac{1}{r^6}$, ανάλογα με την πυκνότητα των εμποδίων που συναντούν τα κύματα.
- Σκίαση (shadowing) : Με τον όρο αυτό εννοούμε τις (τυχαίες) διακυμάνσεις της ενέργειας του σήματος λόγω των αλλαγών στο περιβάλλον (αριθμός εμποδίων, θέση, συντελεστής απορρόφησης κλπ.).

Απώλειες διαδρομής και σκίαση (2)

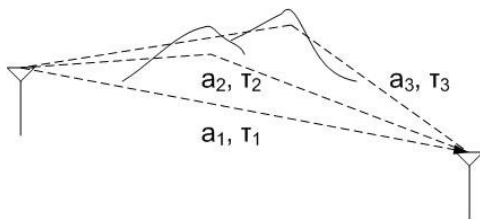
- Η μεταβολή του καναλιού λόγω σκίασης και απωλειών διαδρομής είναι της τάξης δευτερολέπτων ή ακόμα και λεπτών, σε αντίθεση με τις διαλείψεις μικρής κλίμακας.
- Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας λαμβάνονται υπόψη κυρίως για τον καθορισμό της τοπολογίας του συστήματος (αριθμός κυψελών, τοποθέτηση σταθμών βάσης), για τον υπολογισμό της απαιτούμενης ισχύος εκπομπής καθώς και για την επιλογή μεθόδων πολυπλεξίας, αντιμετώπισης διακυψελικής παρεμβολής κλπ.
- Αντίθετα, όπως θα δούμε, οι διαλείψεις μικρής κλίμακας επηρεάζουν τις μεθόδους (απο)διαμόρφωσης και (απο)κωδικοποίησης.

Τα δύο βασικά φαινόμενα σε ένα κανάλι κινητών επικοινωνιών

- Σε ένα κανάλι κινητών επικοινωνιών διακρίνουμε δύο βασικά φαινόμενα τα οποία, γενικά, εμφανίζονται ταυτόχρονα.
- Λόγω της κίνησης του πομπού ή/και του δέκτη ή/και των αντικειμένων πάνω στα οποία ανακλάται ή σκεδάζεται το σήμα, το κανάλι μεταβάλλεται στο χρόνο (fading) και έχουμε εμφάνιση φαινομένου Doppler.
- Λόγω των πολλών μονοπατιών που ενδέχεται να ακολουθεί κάθε σήμα στη διαδρομή του μεταξύ πομπού και δέκτη (πολυδιαδρομική διάδοση) εμφανίζεται διασπορά της κρουστικής απόκρισης (multipath delay spread), με αποτέλεσμα το κανάλι να μην είναι επίπεδο στη συχνότητα (frequency selectivity).
- Η μεταβολή στο χρόνο και στη συχνότητα δεν είναι, απαραίτητα, επιβλαβής. Πολλές φορές προσφέρει τη δυνατότητα να βελτιώσουμε τη μετάδοση/λήψη με χρήση τεχνικών διαφορισμού (diversity).

Πολυδιαδρομική διάδοση (ή πολυδιόδευση) (Multipath propagation)

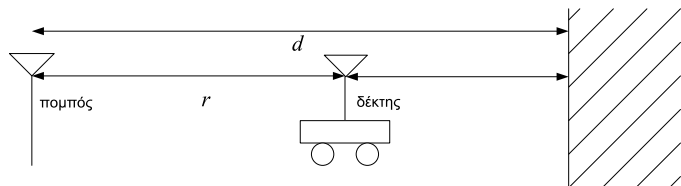
- Έστω ότι ένα σήμα διέρχεται από διαφορετικά μονοπάτια, με αποτέλεσμα διαφορετικά αντίγραφα του να φτάνουν στο δέκτη με διαφορετικό πλάτος και φάση, καθώς και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.
- Έστω ότι μεταδίδουμε μια εκθετική συνάρτηση (θεωρούμε το βαθυπερατό ισοδύναμο ζωνοπερατού συστήματος) $\phi(t) = \exp(j2\pi f_c t)$, $y(t) = \sum_i a_i(t, f_c)\phi(t - \tau_i(t, f_c))$, όπου η μιγαδική σταθερά $a_i(t, f_c)$ (πλάτος και φάση) και η καθυστέρηση $\tau_i(t, f_c)$ αντιστοιχούν στο μονοπάτι i .



Πολυδιαδρομική διάδοση (Multipath propagation) (2)

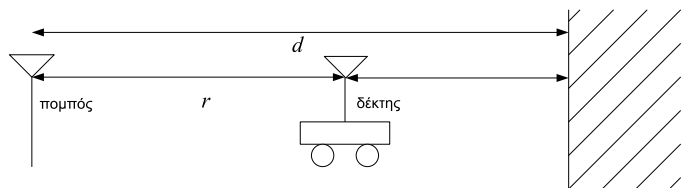
- Εάν υποθέσουμε ότι οι $a_i(t, f)$ και $\tau_i(t, f)$ δε μεταβάλλονται σημαντικά με τη συχνότητα f στο εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση και εκφράσουμε το μεταδιδόμενο σήμα ως άθροισμα συναρτήσεων της μορφής $\phi(t) = \exp(j2\pi ft)$ (αρχή της υπέρθεσης) μπορούμε να γράψουμε $y(t) = \sum_i a_i(t)x(t - \tau_i(t))$.
- Παρατηρήστε ότι το κανάλι αλλάζει στο χρόνο λόγω κίνησης \Rightarrow Μοντελοποιείται ως γραμμικό, χρονικώς μεταβαλλόμενο σύστημα.
- $y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau, t)x(t - \tau)d\tau$, όπου $h(\tau, t) = \sum_i a_i(t)\delta(\tau - \tau_i(t))$.
- Δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε απόκριση συχνότητας $H(f)$, εκτός αν συμπεριλάβουμε την εξάρτηση από το χρόνο: $H(f, t) = \mathcal{F}\{h(\tau, t)\}$ για δεδομένο t .
- Εάν δεν έχουμε κίνηση, $y(t) = \sum_i a_i x(t - \tau_i)$ (γραμμικό, χρονικώς αμετάβλητο). $h(t) = \sum_i a_i \delta(\tau - \tau_i)$.
- Το κανάλι δεν είναι επίπεδο στη συχνότητα ακόμα και όταν δε μεταβάλλεται με το χρόνο (γιατί;)

Παράδειγμα (Tse): Τοίχος με ανάκλαση



- Ο δέκτης δεν κινείται.
- Πεδίο στο δέκτη: $E_r(f, t) = \frac{\alpha \cos 2\pi f(t - \frac{r}{c})}{r} - \frac{\alpha \cos 2\pi f(t - \frac{2d-r}{c})}{2d-r}$.
 α : Κέρδος κεραίας. Θεωρούμε ότι η απώλεια διαδρομής είναι η ίδια και για τα δύο κύματα.
- Η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο κυμάτων ισούται με $\Delta\theta = \left(\frac{2\pi f(2d-r)}{c} + \pi\right) - \left(\frac{2\pi fr}{c}\right) = \frac{4\pi f}{c}(d-r) + \pi$.

Παράδειγμα (Tse): Τοίχος με ανάκλαση (2)



- $\Delta\theta = \frac{4\pi f}{c}(d - r) + \pi$.
- Εάν η $(d - r)$ αλλάξει κατά $\frac{\lambda}{4}$ η διαφορά φάσης αλλάζει κατά π . Επομένως, εάν για κάποια τιμή της $(d - r)$ η $E_r(f, t)$ μεγιστοποιείται, σε απόσταση $\frac{\lambda}{4}$ θα ελαχιστοποιηθεί.
- Για $f = 2.4$ GHz (π.χ. IEEE 802.11b), $\frac{\lambda}{4} \approx 3.1$ cm!

Διασπορά λόγω πολυδιόδευσης (multipath spread) και εύρος ζώνης συμφωνίας (coherence bandwidth)

Ορισμός Multipath Delay Spread $T_d \triangleq \max_{i,j} |\tau_i(t) - \tau_j(t)|$: Το μέγιστο μήκος καναλιού στο χρόνο. Σχετίζεται με τη διασυμβολική παρεμβολή (και την "επιλεκτικότητα" στη συχνότητα).

- Συνήθως είναι ανάλογο του μεγέθους της κυψέλης (cell). Για LANs με μονοπάτια μήκους λίγων km, $T_d \sim 1 - 2 \mu s$. Τυπικές τιμές: macro-cellular: $100 ns - 10 \mu s$ (μεγάλες τιμές στις αστικές περιοχές, μικρές σε ανοικτούς χώρους). Indoor και micro-cellular: Λιγότερο από $1 \mu s$.
- Στο προηγούμενο παράδειγμα, $T_d = \frac{2d-r}{c} - \frac{r}{c}$.

Διασπορά λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath spread) και εύρος ζώνης συμφωνίας (coherence bandwidth) (2)

Ορισμός Coherence bandwidth $W_c \triangleq \frac{1}{2T_d}$. Όσο μεγαλύτερο το μέγιστο μήκος καναλιού, τόσο πιο γρήγορα μεταβάλλεται το κανάλι στη συχνότητα. Μικρό $W_c \rightarrow$ γρήγορη μεταβολή στη συχνότητα (frequency selectivity).

- Στο προηγούμενο παράδειγμα, $\Delta\theta = \left(\frac{2\pi f(2d-r)}{c} + \pi\right) - \left(\frac{2\pi fr}{c}\right) = \frac{4\pi f}{c}(d-r) + \pi$. Επομένως, η φάση αλλάζει κατά π εάν η συχνότητα f αλλάξει κατά $\frac{1}{2} \left(\frac{2d-r}{c} - \frac{r}{c}\right)^{-1} = \frac{1}{2T_d}$.

Flat/frequency-selective fading

- Παρατηρήστε ότι η μορφή διαλείψεων εξαρτάται τόσο από το εύρος ζώνης συμφωνίας, W_c , όσο και από το εύρος ζώνης που χρησιμοποιεί το σύστημα.
- Όταν το εύρος ζώνης W που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση είναι $\ll W_c$ (π.χ. W_1), έχουμε *επίπεδη διάλειψη* (flat fading). Αλλιώς η διάλειψη ονομάζεται *επιλεκτική στη συχνότητα* (frequency-selective fading).
- Διαισθητικά: Όταν μεταδίδουμε αργά (και δειγματοληπούμε αραιά στην έξοδο του προσαρμοσμένου φίλτρου) δεν μπορούμε να διαχωρίσουμε τα μονοπάτια μεταξύ τους και βλέπουμε απλώς την ενέργεια του λαμβανόμενου σήματος να μεταβάλλεται.

