

ΕΕ725 - Ειδικά Θέματα Ψηφιακών

Επικοινωνιών

Δημήτρης - Αλέξανδρος Τουμπακάρης

11ο Μάθημα – 18 Μαΐου 2009

## Περιεχόμενα Μαθήματος

---

- Μετάδοση στο ασύρματο κανάλι
  - Tse & Viswanath, Ch.3
  - Proakis, 4th ed., Ch 14

## Μετάδοση στο ασύρματο κανάλι

---

- Λόγω των διαλείψεων, η μετάδοση δια μέσου ενός καναλιού κινητών επικοινωνιών απαιτεί μεγαλύτερη ισχύ σε σχέση με ένα μη μεταβαλλόμενο κανάλι.
- Αυτό ισχύει ακόμα και στην περίπτωση που γνωρίζουμε το κανάλι σε κάθε χρονική στιγμή.
- Δηλαδή, η μείωση της απόδοσης οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι το κανάλι μεταβάλλεται και όχι στη μη τέλεια εκτίμηση καναλιού.
- Φυσικά, η ακριβής εκτίμηση καναλιού συμβάλλει στο να επιτευχθεί η βέλτιστη δυνατή μετάδοση.

## Παράδειγμα: **BPSK**

---

- Έστω κανάλι **AWGN** με σταθερό **SNR**. Γνωρίζουμε ότι, για μετάδοση **BPSK**,  $P_e = Q\left(\frac{d_{\min}}{2\sigma}\right) = Q\left(\frac{2\sqrt{E_x}}{2\sigma}\right) = Q(\sqrt{\text{SNR}})$ .
- Έστω, τώρα, μετάδοση **BPSK** σε κανάλι **Rayleigh**, **flat fading** με  $E[|h|^2] = 1$ . Δηλαδή,  $y[m] = h[m]x[m] + n[m]$ . Υποθέτουμε ότι ο δέκτης γνωρίζει την ακριβή τιμή όλων των (μυαδικών)  $h[m]$ . Επίσης, στο δέκτη,  $\overline{\text{SNR}} \triangleq E[\text{SNR}]$ .
- Προσαρμοσμένο φίλτρο:  $h^*[m]$ . Επομένως,  $r[m] \triangleq \Re\left\{\frac{h^*[m]}{|h[m]|}y[m]\right\} = |h[m]|x[m] + z[m]$ ,  $z \sim \mathcal{N}(0, \mathcal{N}_0/2)$ .
- Αποδεικνύεται ότι  $P_e = E_h[P_e|h] = \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{\overline{\text{SNR}}}{2+\overline{\text{SNR}}}}\right) \approx \frac{1}{2\overline{\text{SNR}}}$ .
- Το κανάλι διαλείψων έχει πολύ χειρότερη απόδοση σε σχέση με το κανάλι **AWGN**!

## Γιατί η μεγάλη διαφορά απόδοσης;

---

- Σε ένα κανάλι **AWGN** η πιθανότητα σφάλματος εξαρτάται μόνο από την πιθανότητα ο γκαουσιανός θόρυβος να υπερβεί την τιμή  $d_{\min}/2$ .
- Όταν ένα κανάλι με διαλείψεις έχει μεγάλο στιγμιαίο κέρδος,  $h[m]$ , η πιθανότητα σφάλματος οφείλεται σε εξαιρετικές περιπτώσεις μεγάλου θορύβου δεδομένου ότι η 'ουρά' της  $Q(\cdot)$  έχει μικρό εμβαδόν.
- Ωστόσο, όταν το κανάλι έχει μικρό στιγμιαίο κέρδος, η  $d_{\min}$  είναι ίδιας τάξης μεγέθους με την τυπική απόκλιση του θορύβου, με αποτέλεσμα η  $Q(\cdot)$  να παίρνει μεγάλες τιμές.
- Η πιθανότητα το στιγμιαίο κέρδος του καναλιού να είναι μικρό ώστε  $|h[m]|^2 \text{SNR} = 1$  ισούται με  $\int_0^{1/\text{SNR}} e^{-x} dx \approx \frac{1}{\text{SNR}}$ .
- Επομένως, στα κανάλια διαλείψεων έχουμε 2 φαινόμενα: θόρυβο **AWGN** και διαλείψεις. Η πιθανότητα μεγάλης διάλειψης (**deep fade**) καθορίζει, στην ουσία, την πιθανότητα σφάλματος.
- Όσο καλός και να είναι ο δέκτης δεν μπορούμε να κάνουμε τίποτα κατά τη διάρκεια των **deep fades!** (δεδομένου του καναλιού  $y[m] = h[m]x[m] + n[m]$ )

## Πώς μπορούμε να ελαττώσουμε την $P_e$ σε κανάλια με διαλείψεις;

---

- Ένας τρόπος είναι να δημιουργήσουμε με κάποιο τρόπο αντίγραφα του ίδιου σήματος  $\Rightarrow$  τεχνικές διαφορισμού (**diversity**).
  - Διαφορισμός στο χρόνο (**time diversity**): Μετάδοση σε περισσότερες από μια χρονικές στιγμές ώστε να εκμεταλλευόμαστε διαφορετικές τιμές των  $h[m]$ .
  - Διαφορισμός στη συχνότητα (**frequency diversity**): Μετάδοση σε περισσότερες από μια περιοχές του φάσματος (στην περίπτωση που έχουμε **multipath** και, επομένως, **frequency-selective fading**) ώστε να εκμεταλλευόμαστε διαφορετικές τιμές της απόκρισης συχνότητας  $H(f, m)$ .
  - Διαφορισμός στο χώρο (**space diversity**): Χρήση περισσότερων από μία κεραίων στον πομπό (**MISO**), στο δέκτη (**SIMO**) ή και στους δύο (**MIMO**) ώστε να έχουμε περισσότερα από ένα κανάλια (στην περίπτωση **MIMO**).

## Πώς μπορούμε να ελαττώσουμε την $P_e$ σε κανάλια με διαλείψεις; (2)

---

- Επίσης, εάν γνωρίζουμε το κανάλι στον πομπό, μπορούμε να μεταδώσουμε πιο ‘έξυπνα’: Να αποφύγουμε τις “κακές” περιοχές του καναλιού και να καταναείνουμε την ισχύ που εξοικονομείται στις “καλές” περιοχές.
- Αποδεικνύεται ότι, όταν ο πομπός δε γνωρίζει το κανάλι, για  $SNR \rightarrow \infty$  η χωρητικότητα του καναλιού **Rayleigh 1 tap** υπολείπεται κατά **0.83 bits/s/Hz (-2.5 dB)** του καναλιού **AWGN**. Για  $SNR \approx 0$ ,  $C \approx C_{avg}$ .
- Όταν ο πομπός γνωρίζει το κανάλι, για πολύ μικρά **SNR**, η χωρητικότητα υπερβαίνει αυτή του καναλιού **AWGN** γιατί η πολύ περιορισμένη ενέργεια που διαθέτουμε χρησιμοποιείται μόνο όταν το στιγμιαίο κέρδος του καναλιού είναι πολύ μεγάλο. Το κέρδος αυτό ελαττώνεται καθώς το **SNR** αυξάνει.
- Πρόβλημα: Καθυστερήση. Ενδέχεται να μην έχουμε την πολυτέλεια να περιμένουμε μέχρι να εμφανιστεί καλό κανάλι (ειδικά για πολύ μικρά **SNR**).

## Διαφορισμός Χώρου (space/antenna diversity)

---

- Τα συστήματα **MIMO** επιτυγχάνουν και κάτι περισσότερο: Εάν τα κανάλια που δημιουργούνται είναι ανεξάρτητα **Rayleigh**, ένα σύστημα  $N_t \times N_r$  όπου  $N_t$  και  $N_r$  ο αριθμός κεφαλών στον πομπό και στο δέκτη, αντίστοιχα, έχει χωρητικότητα  $\min(N_t, N_r)$  φορές μεγαλύτερη από αυτή του συστήματος **SISO**.
- Επομένως, με τα συστήματα **MIMO** αυξάνουμε τους βαθμούς ελευθερίας (degrees of freedom) του συστήματος.
- Μάλιστα, σε πολλές περιπτώσεις μπορούμε να “ανταλλάξουμε” βαθμούς ελευθερίας με κέρδος λόγω διαφορισμού (**diversity gain**).