

# **Ασύρματος Περιβάλλον στις Κινητές Επικοινωνίες**

## **Κυψελωτά Συστήματα και Παρεμβολές**

Οι διαφάνειες στηρίζονται σε υλικό από διαλέξεις του κ. Ρούσκα (Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων Πανεπιστήμιο Πειραιώς) και τα κεφάλαια 2 και 3 του βιβλίου «Δίκτυα Κινητών & Προσωπικών Επικοινωνιών» του Καθηγητή ΕΜΠ κ. Θεολόγου

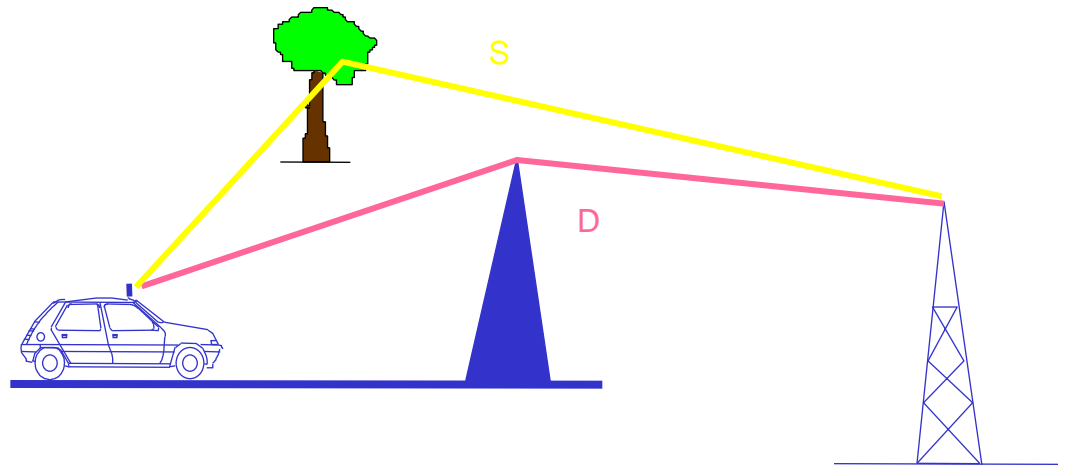
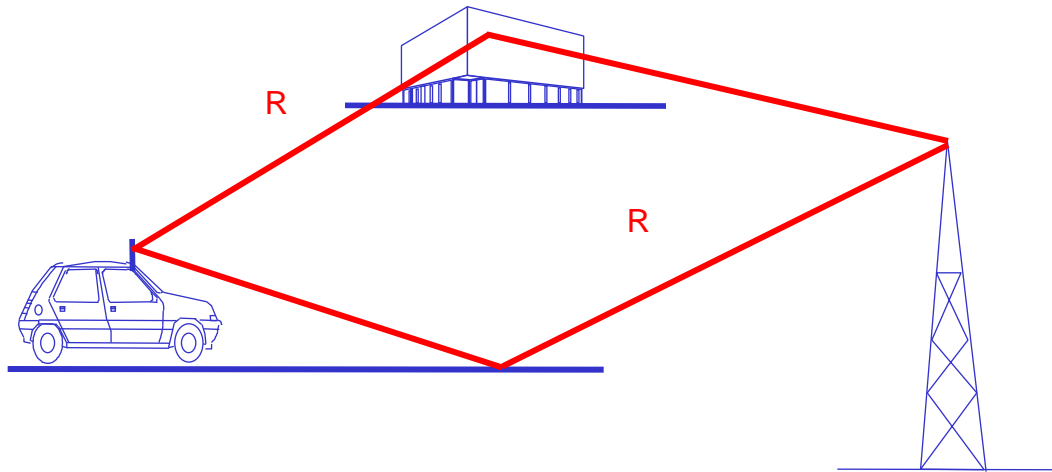
# Ραδιοδίαιυλοι

- Απαραίτητη η γνώση των χαρακτηριστικών τους προκειμένου να χρησιμοποιηθούν
  - κατάλληλα σχήματα διαμόρφωσης/κωδικοποίησης
  - κατάλληλοι εξισορροπητές (equalizers)
  - αντίστοιχες κεραίες για ελάττωση ανεπιθύμητων επιδράσεων
- Σε περιβάλλον κινητών επικοινωνιών όπου η οπτική επαφή πομπού και δέκτη δεν είναι εφικτή, είναι επιθυμητό το σήμα να μπορεί να λαμβάνεται από πολλές ανακλάσεις

# Μηχανισμοί Ραδιοδιάδοσης

- Ανάκλαση (reflection)
  - Πρόσκρουση ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε εμπόδιο μεγάλου μεγέθους σε σχέση με το μήκος κύματός του  $\gg \lambda$
- Περίθλαση ή διάθλαση (diffraction)
  - Παρεμβολή αδιαπέραστου σώματος  $\rightarrow$  παραγωγή δευτερογενών σημάτων πίσω από το εμπόδιο, τα οποία φθάνουν στο δέκτη ακόμα και χωρίς οπτική επαφή
- Σκέδαση (scattering)
  - Πρόσκρουση ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε εμπόδιο συγκρίσιμου και μικρότερου μεγέθους σε σχέση με το μήκος κύματος  $\leq \lambda$  (πχ φύλλα δέντρων/επιγραφές/φανάρια/λαμπτήρες)  
 $\rightarrow$  διάχυση  $\rightarrow$  η ενέργεια σε πολλές διαφορετικές κατευθύνσεις

# Μηχανισμοί Ραδιοδιάδοσης



# Μηχανισμοί Ραδιοδιάδοσης

- Ανάλογα με το περιβάλλον λαμβάνεται αντίστοιχο σήμα μέσω των παραπάνω μηχανισμών
- Καθώς το κινητό τερματικό κινείται σε μια περιοχή, οι τρεις μηχανισμοί διάδοσης επιδρούν κάθε στιγμή στο λαμβανόμενο σήμα κατά διαφορετικούς τρόπους.

# Τυπικό μοντέλο κυψελωτής επικοινωνίας

- Μία ή πολλές υπερυψωμένες κεραιές (Σταθμοί Βάσης)
- Μια ενδεχόμενη διαδρομή οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη (Line of Sight - LOS)
- Πολλές διαδρομές χωρίς οπτική επαφή
- Μια κεραία ενός ακίνητου ή κινούμενου συνδρομητή

Υπενθύμιση       $\lambda = \frac{c}{f}$

$\lambda$ : μήκος κύματος ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος

$c$ : ταχύτητα του φωτός ( $\approx 3 \cdot 10^8$  m/s)

$f$ : συχνότητα

# Επίδραση κινητικότητας

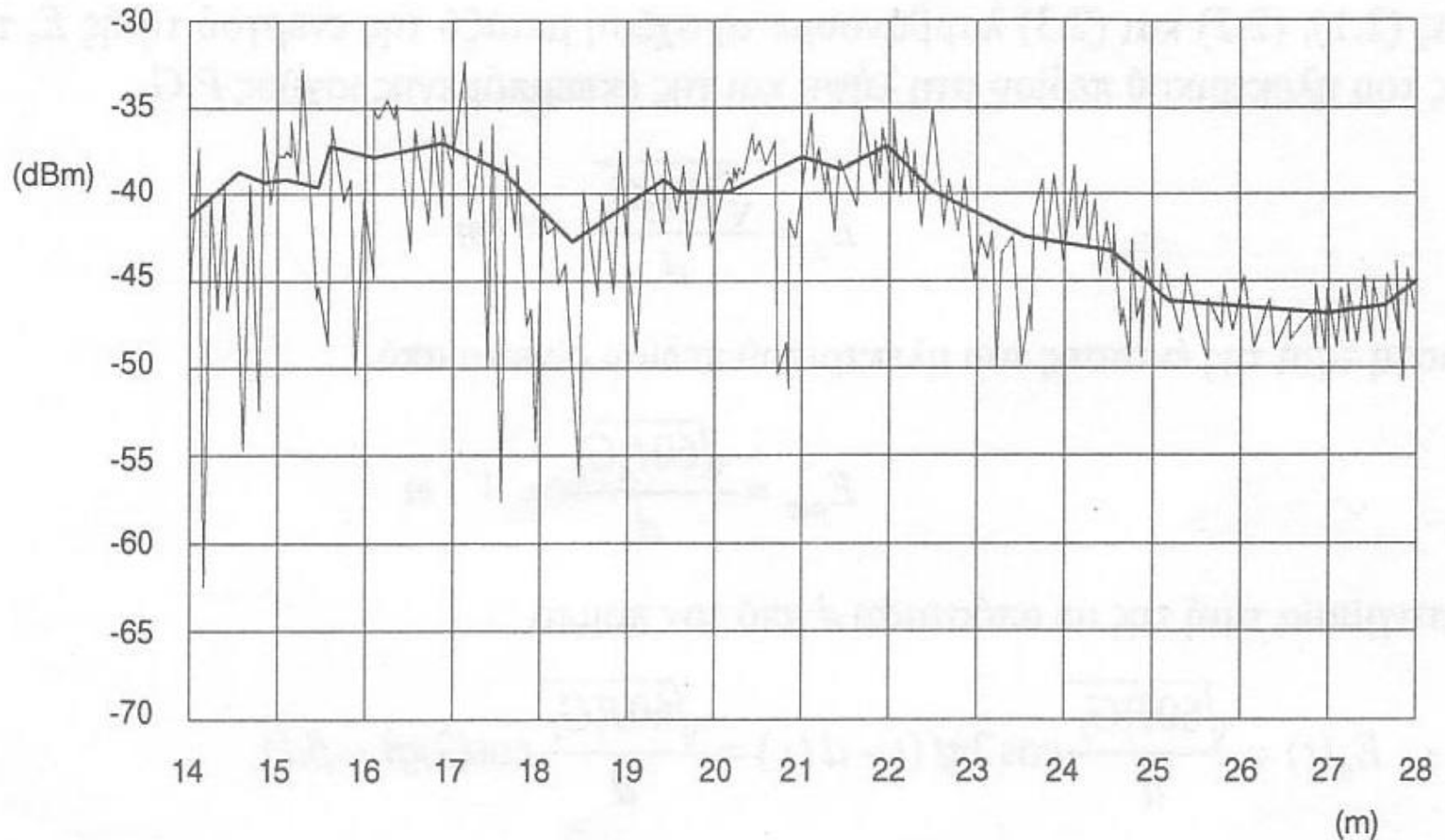
- Αν δεν είχαμε καμία κίνηση τότε οι πολλαπλές διαδρομές του σήματος θα ήταν αμετάβλητες χρονικά
- Αν ο χρήστης κινείται ή/και το περιβάλλον μεταβάλλεται κάθε διαδρομή μεταβάλλεται χρονικά προκαλώντας με τη σειρά τους χρονικά μεταβαλλόμενο λαμβανόμενο σήμα. (Κάποιες διαδρομές σημάτων εξασθενούν – άλλες εμφανίζονται)
- Ακόμη και αν διανύει μικρές αποστάσεις, η λαμβανόμενη στιγμιαία ισχύς μεταβάλλεται απότομα και εμφανίζονται βραχύχρονες διαλείψεις.

# Περιβάλλον κινητών επικοινωνιών

- Αγροτικές / Ημιαστικές / Αστικές Περιοχές
- Πλάτος κτιρίων 15~30m
- Ύψος κτιρίων 2~25m
- Για να έχουμε ανακλάσεις πρέπει το μήκος κύματος να είναι αρκετά μικρότερο των αντικειμένων πρόσκρουσης (διαφορετικά το σήμα «αγκαλιάζει» τα αντικείμενα και τα προσπερνά)
- Άρα: η συχνότητα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 30 MHz ή  $\lambda \leq 10\text{m}$  για να έχουμε σήμα (στο δέκτη) από πολλαπλές ανακλάσεις όπως είναι επιθυμητό στις κινητές επικοινωνίες



# Στάθμη λαμβανόμενου σήματος



Στάθμη του λαμβανόμενου σήματος συναρτήσσει της απόστασης πομπού-δέκτη

# Στάθμη λαμβανόμενου σήματος

- Λαμβανόμενο σήμα = υπέρθεση όλων των συνιστωσών-διαδρομών
- Βραχυχρόνιες Διαλείψεις: απότομη μεταβολή έως και 30-40dB για πολύ μικρές μετακινήσεις της τάξης κλάσματος κύματος
- Μεγάλης κλίμακας μεταβολή: εξασθένηση τοπικής μέσης ισχύος καθώς αυξάνει η απόσταση πομπού δέκτη

# Επίδραση περιβάλλοντος στη διάδοση

- Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε περιβάλλον κινητών επικοινωνιών χαρακτηρίζεται από τρία επιμέρους φαινόμενα:
  - Απώλειες διαδρομής (Path Loss)
  - Σκίαση (Shadowing)
  - Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών (Multipath Fading)

# Απώλειες διάδοσης στον ελεύθερο χώρο

- Η μέση ισχύς που λαμβάνεται από το κινητό τερματικό  $P_R$  δίνεται από τη σχέση

$$P_R = \frac{E_0^2}{120\pi} A_r \quad (W)$$

όπου  $A_r = G_R \lambda^2 / 4\pi$  είναι η ενεργός επιφάνεια της κεραίας του κινητού και  $G_R$  το κέρδος της κεραίας λήψης και  $E_0 = \frac{\sqrt{30P_T G_T}}{d}$  (V/m) η ενεργός τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

$$\Rightarrow P_R = \left( \frac{E_0 \cdot \lambda}{2\pi} \right)^2 \cdot \frac{G_R}{120} \quad (W)$$

- Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει η σχέση μεταξύ της λαμβανόμενης και εκπεμπόμενης ισχύος

$$P_R = P_T G_R G_T \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \Rightarrow P_R = P_T G_R G_T \left( \frac{c}{4\pi} \right)^2 \left( \frac{1}{d} \right)^2 \left( \frac{1}{f} \right)^2$$

# Απώλειες διάδοσης στον ελεύθερο χώρο

Απώλειες διάδοσης ή απώλειες διαδρομής είναι ο λόγος της ισχύος που ακτινοβολείται από την κεραία του σταθμού βάσης προς την ισχύ που λαμβάνεται από την κεραία του κινητού. Όταν το σύστημα λειτουργεί στον ελεύθερο χώρο οι απώλειες διάδοσης  $L_f$  για ισοτροπικές κεραίες με μοναδιαίο κέρδος ( $G_R = G_T = 1$ ) δίνονται από την σχέση

$$L_f = \frac{P_T}{P_R} = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = \left( \frac{4\pi d}{c/f} \right)^2 \quad (8)$$

και σε dB

$$\begin{aligned} L_f (dB) &= 10 \log_{10} \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = 10 \log_{10} \left( \frac{4\pi d}{c/f} \right)^2 \\ &= 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d}{c/f} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi}{c} \right) + 20 \log_{10} d + 20 \log_{10} f \end{aligned}$$

Η παραπάνω σχέση δείχνει ότι οι απώλειες εξαρτώνται από το τετράγωνο της απόστασης του κινητού τερματικού από τον σταθμό βάσης. Επίσης, όταν μειώνεται το μήκος κύματος, δηλ. αυξάνεται η συχνότητα εκπομπής αυξάνουν και οι απώλειες διάδοσης

Power (dBm)	Power (W)
-30 dBm	0.0000010 W
-20 dBm	0.0000100 W
-10 dBm	0.0001000 W
0 dBm	0.0010000 W
1 dBm	0.0012589 W
2 dBm	0.0015849 W
3 dBm	0.0019953 W
4 dBm	0.0025119 W
5 dBm	0.0031628 W
6 dBm	0.0039811 W
7 dBm	0.0050119 W
8 dBm	0.0063096 W
9 dBm	0.0079433 W
10 dBm	0.0100000 W
20 dBm	0.1000000 W
30 dBm	1.0000000 W
40 dBm	10.0000000 W
50 dBm	100.0000000 W

# σχετική στάθμη ισχύος

για εκφράσουμε τη σχετική ισχύ  $P_{Rel}$  της  
 προς μια συγκεκριμένη στάθμη αναφοράς  $P_{Ref}$

$$P_{Rel} = 10 \log_{10} \left( \frac{P}{P_{Ref}} \right)$$

η  $P$  και  $P_{ref}$  εκφράζονται στις ίδιες μονάδες

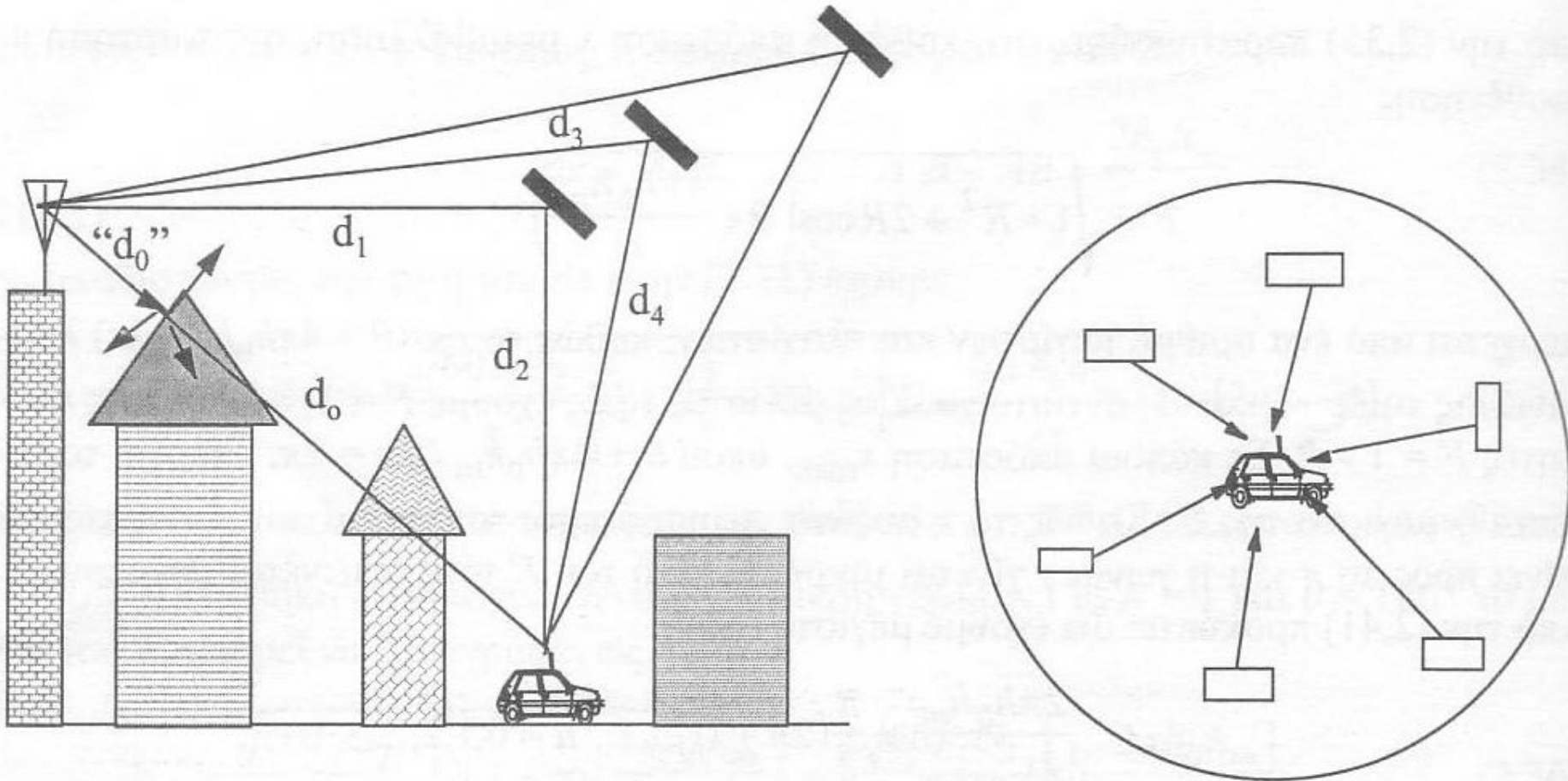
W τότε η στάθμη  $P_{Rel}$  εκφράζεται σε *dBm* δηλ.

$$P_{dBm} = 10 \log_{10} \left( \frac{P}{1mW} \right)$$

ή τότε η στάθμη  $P_{Rel}$  εκφράζεται σε *dBW* δηλ.

$$P_{dBW} = 10 \log_{10} \left( \frac{P}{1W} \right)$$

# Απώλειες διάδοσης σε συστήματα διάδοσης μη-οπτικής και οπτικής επαφής



*Περιβάλλον διάδοσης επίγειων κινητών επικοινωνιών*

# Απώλειες διάδοσης σε συστήματα διάδοσης μη-οπτικής και οπτικής επαφής

- Απώλειες διάδοσης LOS + N-LOS:

$$L(d) \propto L_f \left( \frac{d}{d_0} \right)^n$$

Όπου

$n$  : εκθέτης των απωλειών διαδρομής

$d$  : απόσταση μεταξύ κεραιών εκπομπής και λήψης

$d_0$  : απόσταση αναφοράς ή απόσταση μέχρι την οποία ισχύει LOS

$L_f$  : Απώλειες διαδρομής σε απόσταση  $d_0$  και διάδοση LOS

$L$  : απώλειες διαδρομής για συνδυασμένη διάδοση LOS + NLOS

εσωτερικοί χώροι:  $2 \leq n \leq 4$ ,  $d_0 \approx 1-3\text{m}$

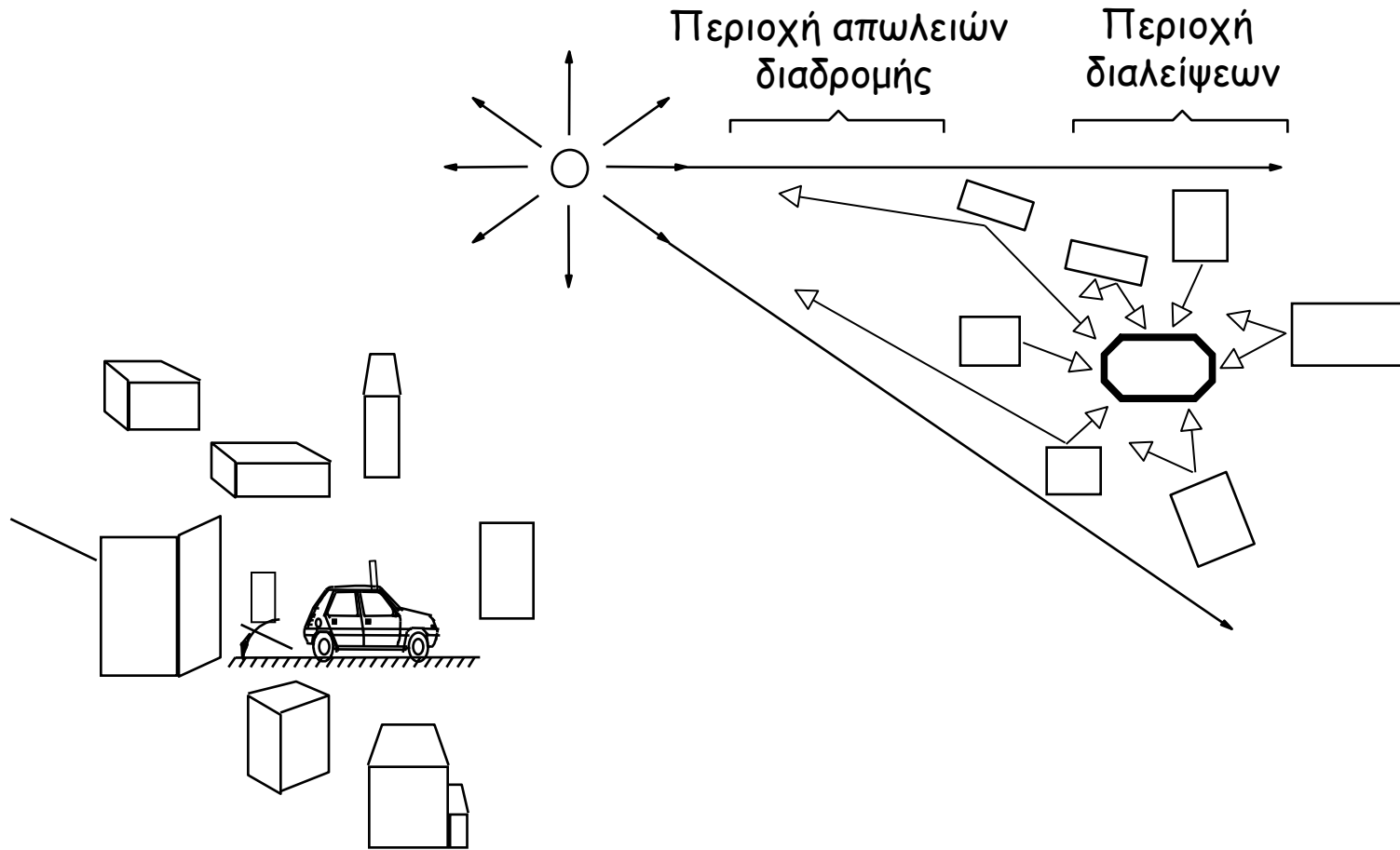
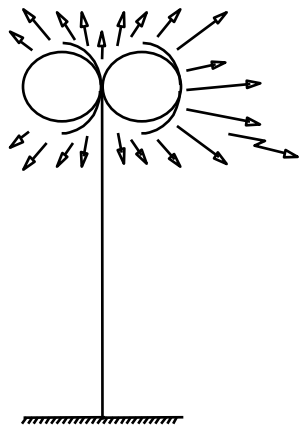
εξωτερικοί χώροι:  $3.5 \leq n \leq 5$ ,  $d_0 \approx 1\text{km}$



# Σκίαση

- Σε δύο σημεία τα οποία έχουν την ίδια απόσταση από πομπό, το σήμα μπορεί να είναι πολύ διαφορετικό λόγω της αταξίας του περιβάλλοντος
- Οφείλεται στην ύπαρξη εμποδίων (κτίρια, δέντρα, λόφοι) που παρεμβάλλονται μεταξύ πομπού και δέκτη και το σήμα είναι τυχαία εξασθετισμένο (με ίδιο  $\lambda$  αλλά με μικρότερο πλάτος)
- Άρα η τιμή απωλειών διαδρομής σε μια απόσταση τελικά είναι τυχαία και μοντελοποιείται με κάποια κατανομή γύρω από τη μέση τιμή που υπολογίζεται βάση της απόστασης

# Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών



# Επιπτώσεις λόγω πολλαπλών διαδρομών

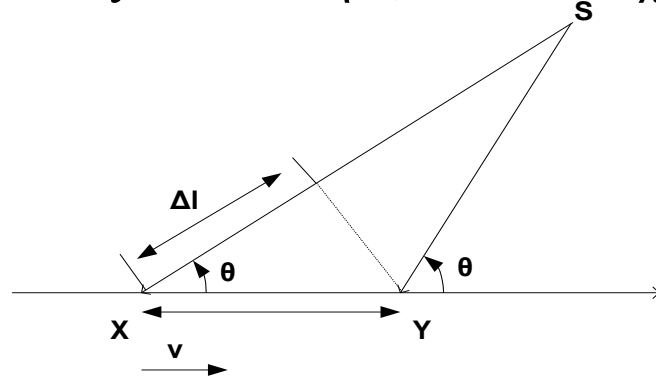
- Απότομες αλλαγές στη στάθμη του σήματος, όταν διανύονται μικρές αποστάσεις ή μεσολαβούν μικρά χρονικά διαστήματα
- Τυχαία διαμόρφωση συχνότητας
- Εξάπλωση χρονοκαθυστερήσης

# Εξάπλωση χρονοκαθυστέρησης

- Οι μεταβολές του σήματος στον χώρο μπορεί να θεωρηθούν από τον δέκτη ως χρονικές καθυστερήσεις, καθώς αυτός κινείται σε περιοχή όπου υπάρχουν πολλαπλές διαδρομές.
  - Μακρινές ανακλάσεις (με μεγάλη καθυστέρηση φάσης): προκαλούν εξάπλωση χρονοκαθυστέρησης (χρονική καθυστέρηση μεταξύ σήματος LOS και πιο αργής ανάκλασης ή γρηγορότερης ανάκλασης και πιο αργής ανάκλασης)
    - Στα αναλογικά συστήματα → ηχώ
    - Στα ψηφιακά συστήματα → διασυμβολική παρεμβολή (παρεμβολή διαδοχικών συμβόλων ή bits)

# Ολίσθηση Doppler

- Έστω κινητό τερματικό που κινείται με ταχύτητα  $v$  μεταξύ των θέσεων  $X$  και  $Y$ , που απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $d$ , ενώ ταυτόχρονα λαμβάνεται σήμα από πηγή  $S$ .



- Η διαφορά  $\Delta l$  των διαδρομών από την πηγή  $S$  προς τα σημεία  $X$  και  $Y$  είναι:  
 $\cong \Delta l = d \cos \theta = v \Delta t \cos \theta$ , όπου  $\Delta t$  είναι ο χρόνος από το  $X$  στο  $Y$
- Η αλλαγή στη φάση του λαμβανόμενου σήματος είναι:

$$\Delta \phi = \frac{2\pi \Delta l}{\lambda} = \frac{2\pi v \Delta t}{\lambda} \cos \theta$$

- Συνεπώς η φαινομενική ολίσθηση συχνότητας η ολίσθηση Doppler  $f_D$  δίνεται από τη σχέση:

$$f_D = \frac{\Delta \phi}{2\pi \Delta t} = \frac{v}{\lambda} \cos \theta$$

# Ολίσθηση Doppler

- Αν το κινητό κινείται προς την κατεύθυνση της πηγής τότε τα ραδιοκύματα που λαμβάνει συνεχώς προηγούνται χρονικά, δηλαδή η γωνία φάσης είναι θετική, δηλαδή η ολίσθηση είναι θετική  
→ η φαινομενική συχνότητα αυξάνει
- Αν το κινητό απομακρύνεται από την κατεύθυνση άφιξης του κύματος τότε τα ραδιοκύματα έπονται χρονικά, δηλαδή η γωνία φάσης είναι αρνητική, δηλαδή η ολίσθηση είναι αρνητική  
→ η φαινομενική συχνότητα ελαττώνεται
- Άρα το φαινόμενο Doppler έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συχνότητας κατά την προσέγγιση του Σταθμού Βάσης και την μείωσή της κατά την απομάκρυνση από τον Σταθμό Βάσης

# Παράδειγμα

- Σταθμός Βάσης εκπέμπει  $f_c = 900MHz$
- Κινητό τερματικό κινείται με ταχύτητα  $v = 60km/h$
- Μέγιστη απόκλιση για  $\theta = 0, \cos \theta = 1: f_D = \frac{v}{\lambda}$
- Υπολογισμός μετατόπισης Doppler

$$f_D = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{\frac{c}{f_c}} = \frac{v \cdot f_c}{c} = \frac{60 \cdot 10^3}{3600} \cdot \frac{1}{3 \cdot 10^8} \cdot 900 \cdot 10^6 = 50Hz$$

- Αν το κινητό κινείται προς τον ΣΒ τότε η λαμβανόμενη συχνότητα ισούται με:

$$f = f_c + f_D = 900 \cdot 10^6 + 50 = 900000050Hz$$

- Αν το κινητό απομακρύνεται από τον ΣΒ τότε η λαμβανόμενη συχνότητα ισούται με:

$$f = f_c - f_D = 900 \cdot 10^6 - 50 = 899999950Hz$$

- Σε περίπτωση που το κινητό κινείται σε κατεύθυνση κάθετη προς την κατεύθυνση άφιξης του μεταδιδόμενου σήματος, η γωνία  $\theta = 90^\circ$  και  $\cos \theta = 0$ , οπότε δεν υπάρχει ολίσθηση Doppler. Η συχνότητα του λαμβανόμενου σήματος είναι ίδια με τη συχνότητα του φέροντος, δηλαδή  $f_c = 900MHz$