

Ασύρματες Επικοινωνίες

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

Πανεπιστημίου Πελοποννήσου

Αναπλ.Καθηγ. Γ. Αθανασιάδου

gathanas@uop.gr

Εργαστήριο Ασυρμάτων και Κινητών Επικοινωνιών

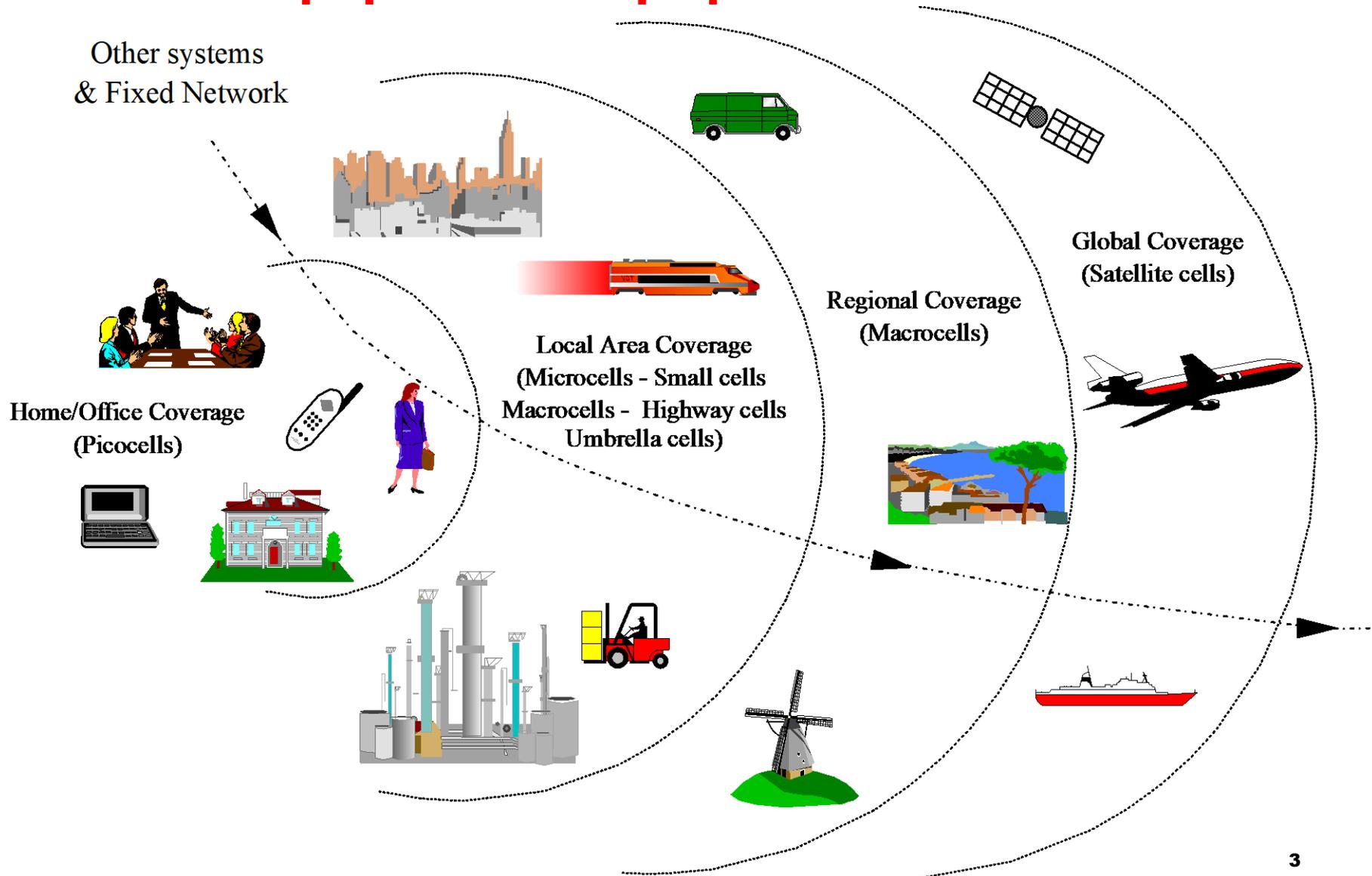
wmclab.uop.gr

Βασικές αρχές ασύρματης διάδοσης – 1^η ενότητα

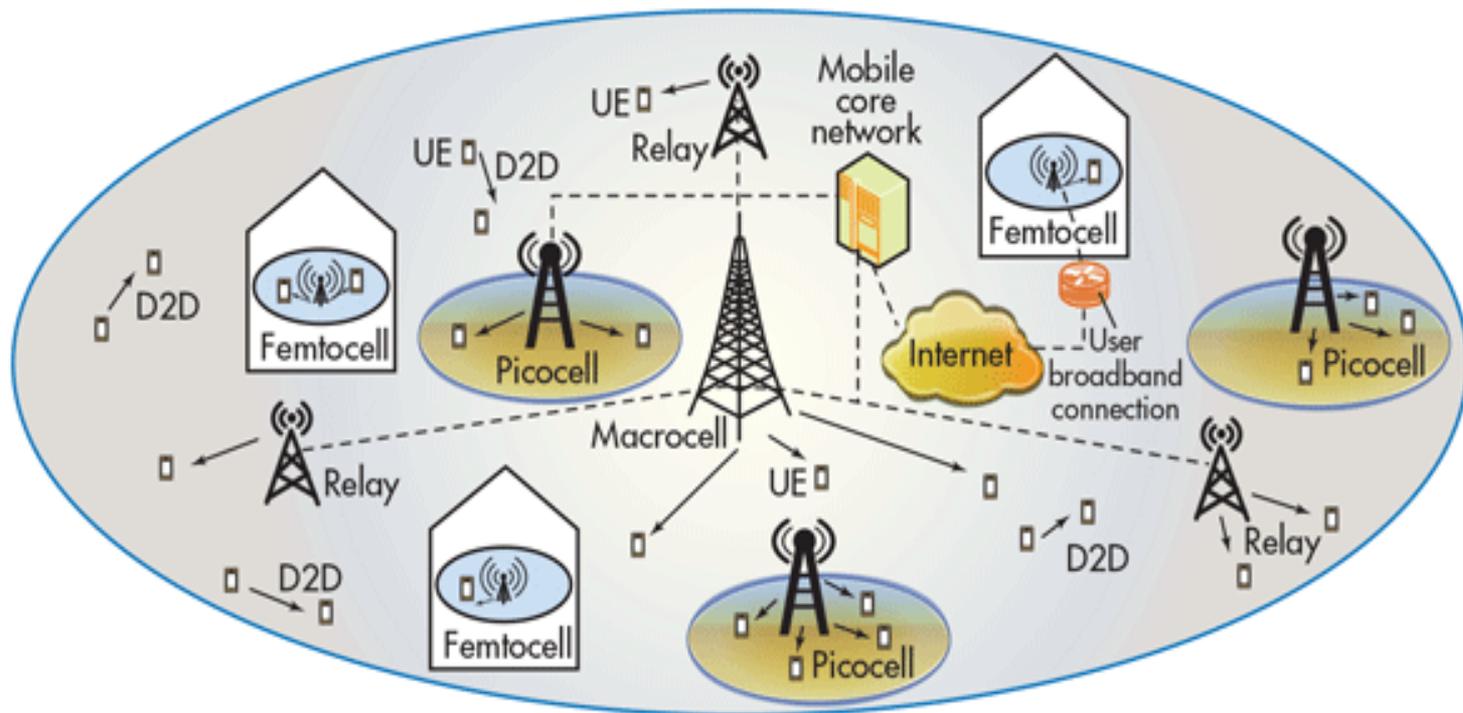
Ασύρματες Ζεύξεις

- Το ασύρματο κανάλι βάζει ουσιαστικούς περιορισμούς στην επίδοση των ασύρματων τηλεπικοινωνιών.
- Σε αντίθεση με τα ενσύρματα κανάλια που είναι στατικά και προβλέψιμα, τα ραδιοκανάλια είναι τυχαία και δεν προσφέρονται για εύκολη ανάλυση.
- Ιστορικά, η ανάλυση του ραδιοκαναλιού είναι ένα από τα πιο δύσκολα κομμάτια στη σχεδίαση των ασύρματων συστημάτων.

Λειτουργικά περιβάλλοντα



Λειτουργικά περιβάλλοντα



Ζώνες συχνοτήτων

ΖΩΝΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ
3-30 KHz	VLF	Συστήματα πλοήγησης - Sonar
30-300KHz	LF	Συστήματα πλοήγησης - Ραδιοφάροι
300KHz-3MHz	MF	Ραδιοφωνία AM - Ναυσιπλοία
3-30MHz	HF	Τηλεφωνία – Τηλεγραφία – Τηλεομοιοτυπία – Ερασιτεχνική ραδιοφωνία – Επικοινωνίες μεταξύ πλοίων, αεροπλάνων, σταθμών εδάφους
30-300MHz	VHF	Τηλεόραση – Ραδιοφωνία FM -Εναέρια κυκλοφορία – CB
300MHz-3GHz	UHF	Τηλεόραση – Δορυφορικές & κινητές επικοινωνίες – Radar
3-30GHz	SHF	Radar – Μικροκυματικές & κινητές επικοινωνίες – Δορυφορικές ζεύξεις
30-300GHz	EHF	Radar – πειραματικά συστήματα

Γενικές αρχές για τη διάδοση

Βασικές απαιτήσεις για αξιόπιστη επικοινωνία

- κατανομή της μέσης ηλεκτρομαγνητικής ισχύος σε συγκεκριμένη περιοχή
- επαρκής ισχύς, όχι παρεμβολές
- ενδιαφέρει όχι μόνο η μέση ισχύς αλλά και στατιστική συμπεριφορά της ισχύος, λόγω της κίνησης του τερματικού
- ενδιαφέρει επίσης η ποιότητα του σήματος, ώστε να μην εμφανίζονται σφάλματα

Γενικές αρχές για τη διάδοση

- Ενδιαφέρει η επαρκής γνώση για τη συμπεριφορά του διαύλου (διαμόρφωση, κωδικοποίηση, εξισορρόπηση)

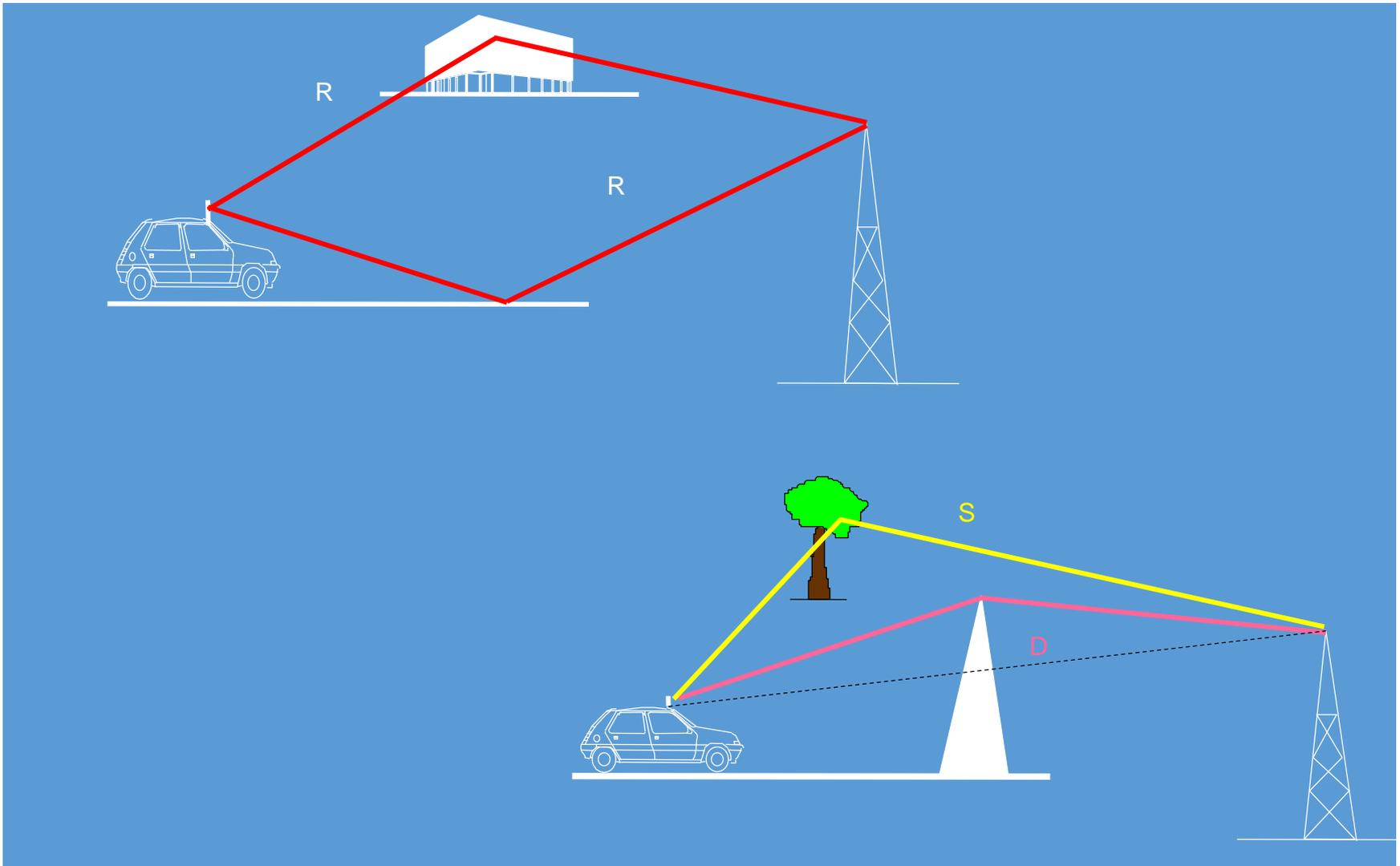
Μοντέλα για τη μελέτη των ραδιοδιαύλων

- **παραμετρικά στατιστικά**: απλά στη χρήση τους, αλλά σχετικά μικρής ακρίβειας
- **ντετερμινιστικά**: ειδικά για κάθε περιβάλλον, πιο ακριβή αλλά και πιο πολύπλοκα

Μηχανισμοί Διάδοσης

- Οι μηχανισμοί πίσω από τη διάδοση των ΗΜ κυμάτων είναι ποικίλοι, αλλά γενικά μπορούν να χωριστούν στις εξής κατηγορίες:
 - *Διάδοση σε ελεύθερο χώρο* (free space transmission)
 - *Ανάκλαση* (reflection) και *Διάθλαση* (transmission)
 - *Σκέδαση* (scattering)
 - *Περίθλαση* (diffraction)

Μηχανισμοί Διάδοσης (2)

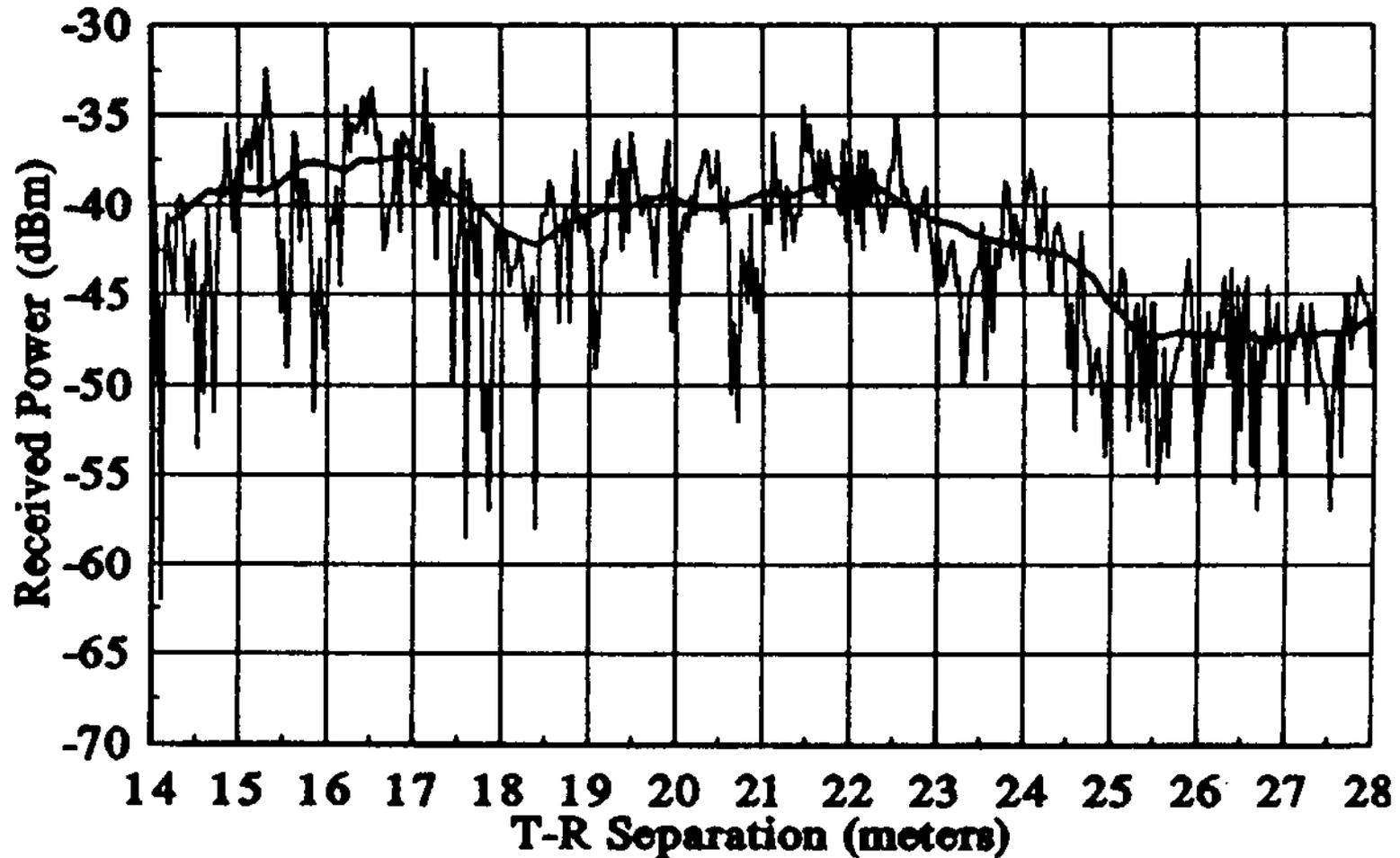


Γενικές αρχές για τη διάδοση

- Συνήθως τα ΗΜ κύματα 'ταξιδεύουν' μεταξύ της κεραίας του πομπού και της κεραίας του δέκτη αφού ακολουθήσουν πολλές διαφορετικές διαδρομές - *multipath*- (κάθε διαδρομή περιέχει διαφορετικούς συνδυασμούς των παραπάνω μηχανισμών διάδοσης ή/και με διαφορετικά αντικείμενα).
- Καθώς το τερματικό κινείται σε μια περιοχή, οι τρεις μηχανισμοί διάδοσης επιδρούν κάθε στιγμή στο λαμβανόμενο σήμα κατά διαφορετικούς τρόπους.
- Η συνύπαρξη όλων αυτών των κυμάτων στην κεραία του δέκτη έχει ως αποτέλεσμα ακόμη και αν το τερματικό διανύει μικρές αποστάσεις, η λαμβανόμενη στιγμιαία ισχύς να μεταβάλλεται απότομα και να εμφανίζονται **βραχύχρονες διαλείψεις (*fading*)**.

Γενικές αρχές για τη διάδοση

Ασύρματο σύστημα εσωτερικού χώρου



Γενικές αρχές για τη διάδοση

- Παραδοσιακά τα μοντέλα διάδοσης προσπαθούσαν να προβλέψουν τη μέση ισχύ του λαμβανόμενου σήματος σε δεδομένη απόσταση από τον πομπό, καθώς επίσης και τη μεταβλητότητα (variability) της λαμβανόμενης ισχύος σε μια μικρή περιοχή γύρω από μια συγκεκριμένη τοποθεσία.
- Τα μοντέλα διάδοσης που προβλέπουν τη μέση ισχύ σήματος για μια τυχαία απόσταση πομπού-δέκτη καλούνται **μοντέλα διάδοσης μεγάλης κλίμακας (large-scale propagation models)** επειδή χαρακτηρίζουν το σήμα για μεγάλες αποστάσεις πομπού-δέκτη (αρκετές εκατοντάδες ή χιλιάδες μέτρα).
- Αυτά τα μοντέλα είναι χρήσιμα για π.χ. τον υπολογισμό της περιοχής ραδιοκάλυψης ενός πομπού.

Γενικές αρχές για τη διάδοση

- Από την άλλη, τα μοντέλα διάδοσης που χαρακτηρίζουν τις γρήγορες διακυμάνσεις της λαμβανόμενης ισχύος του σήματος σε μια μικρή περιοχή (μερικά μήκη κύματος) ή για μικρό χρονικό διάστημα (της τάξης των μερικών δευτερολέπτων) ονομάζονται **μικρής κλίμακας μοντέλα ή μοντέλα διαλείψεων (*small scale or fading models*)**
- Η λαμβανόμενη ισχύς του σήματος μπορεί να μεταβάλλεται κατά τρεις ή τέσσερις τάξεις μεγέθους (30 ή 40dB) σε αποστάσεις κλάσματος του μήκους κύματος.

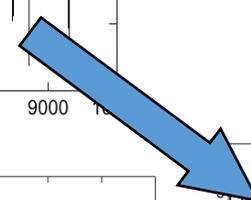
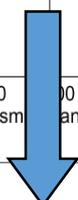
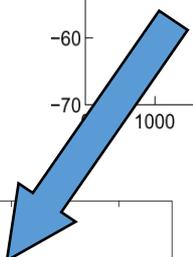
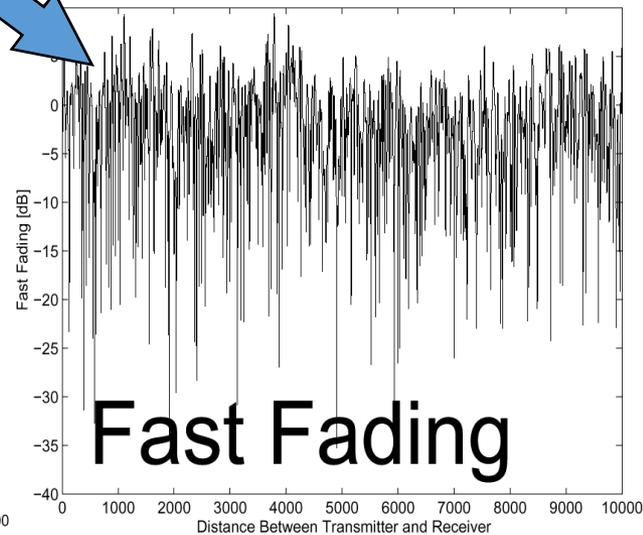
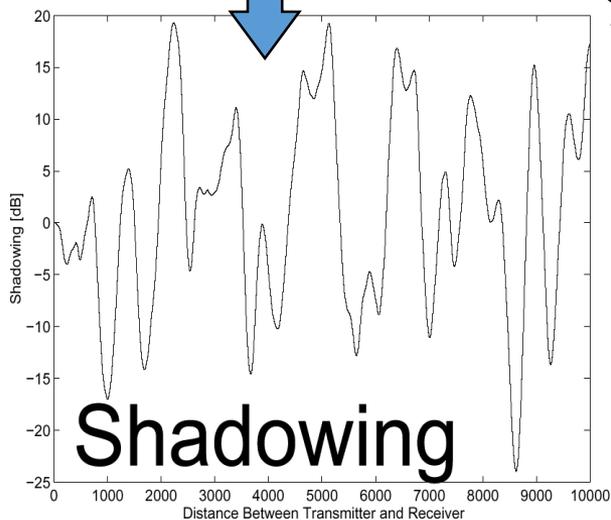
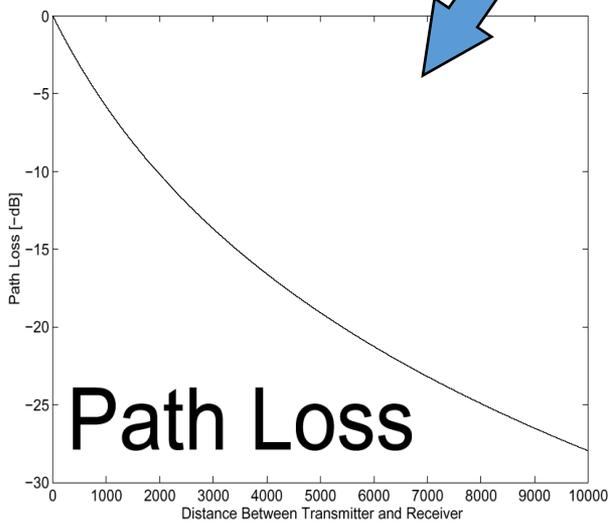
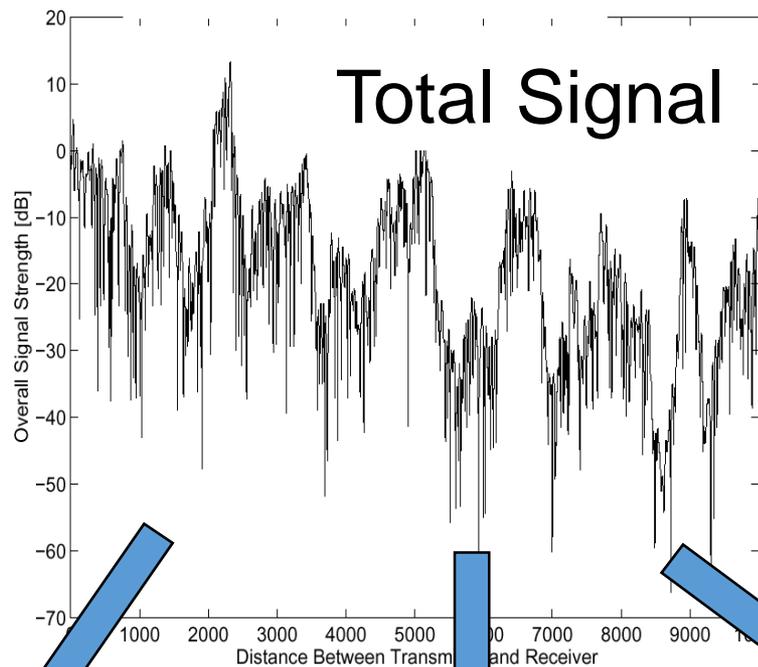
Γενικές αρχές για τη διάδοση

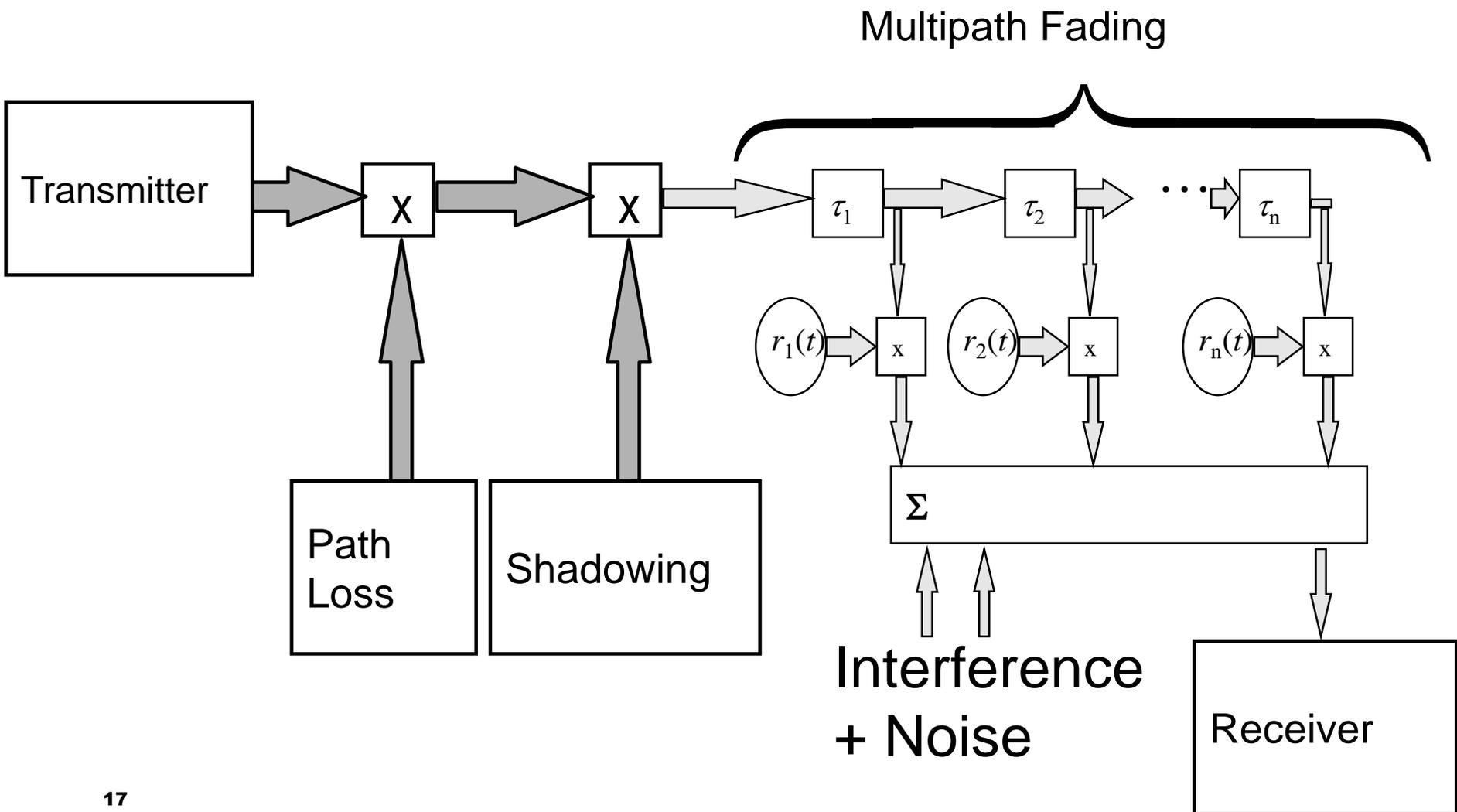
- Η τοπική μέση ισχύ του σήματος υπολογίζεται ως η μέση τιμή των λαμβανόμενων μετρήσεων για μια απόσταση 5λ ως 40λ (δηλαδή για συχνότητες 1GHz με 2 GHz αυτό αντιστοιχεί σε αποστάσεις από 1m ως 10m).

Γενικές αρχές για τη διάδοση

Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε περιβάλλοντα κινητών επικοινωνιών χαρακτηρίζεται από τρία επιμέρους φαινόμενα:

- *απώλειες διαδρομής (path loss)*
- *σκίαση (shadowing)*
- *διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών (multipath fading)*





Μοντέλα εξασθένησης (path loss prediction models)

- Η πρόβλεψη της εξασθένησης είναι ένα πολύ σημαντικό βήμα για:
 - το σχεδιασμό της ραδιοκάλυψης ενός ασύρματου συστήματος
 - το καθορισμό των παραμέτρων ενός ραδιοσυστήματος για να μπορεί να παρέχει ικανοποιητική και αξιόπιστη κάλυψη σε μια καθορισμένη περιοχή.

Μοντέλα εξασθένησης

- Πρόβλεψη της περιοχής ραδιοκάλυψης οποιουδήποτε σταθμού βάσης είναι ένα σύνθετο πρόβλημα που προϋποθέτει γνώση της συχνότητας λειτουργίας, της μορφολογίας του εδάφους, του ύψους των κεραιών, του μεγέθους της αστικοποίησης της περιοχής, της βλάστησης και άλλων παραγόντων.
- Συνήθως χρησιμοποιείται στατιστική προσέγγιση του προβλήματος που δίνει ποσοστό των τοποθεσιών σε δοσμένη, σχετικά μικρή, περιοχή όπου η ένταση του σήματος είναι πάνω από κάποιο συγκεκριμένο επίπεδο.

Μοντέλα εξασθένησης

- Γενικά κανένα μοντέλο δεν είναι ιδανικό για όλες τις περιπτώσεις και κάθε φορά χρειάζεται προσεκτική επιλογή μοντέλου.
- Η πλειοψηφία των μοντέλων προσπαθεί να προβλέψει την *μεσαία (median)* εξασθένηση, δηλαδή την τιμή που είναι μεγαλύτερη από την εξασθένηση στο 50% των τοποθεσιών και/ή για το 50% του χρόνου.
- Αν τα στατιστικά χαρακτηριστικά του σήματος είναι γνωστά, μετά μπορεί να γίνει εκτίμηση της μεταβλητότητας του σήματος και έτσι είναι δυνατό να καθοριστεί το ποσοστό μιας συγκεκριμένης περιοχής που έχει ικανοποιητική ένταση σήματος και την πιθανότητα παρεμβολής από ένα μακρινό εκπομπό.

Μοντέλα εξασθένησης

- Το ραδιοκανάλι των κινητών επικοινωνιών τις περισσότερες φορές υπερβαίνει τις απώλειες διάδοσης του μοντέλου ελεύθερου χώρου και του μοντέλου επίπεδης γης κατά πολλά dB. Είναι επίσης πολύ ευμετάβλητο και κυμαίνεται τυχαία καθώς το κινητό μετακινείται πάνω σε ανώμαλο έδαφος ή/και ανάμεσα σε κτήρια.
- Στη συνέχεια θα δούμε μεθόδους εκτίμησης της μέσης έντασης του σήματος σε μια περιοχή. Πρώτα παρουσιάζονται κάποιες επιπλέον θεωρητικές και αναλυτικές τεχνικές που αποτελούν τη βάση πολλών μοντέλων πρόβλεψης.

Διάδοση σε Ελεύθερο Χώρο

- Στον ελεύθερο χώρο η πυκνότητα ροής της ισχύος (διάνυσμα Poynting) είναι:

$$\vec{W} = \vec{E} \times \vec{H} = \frac{|E|^2}{\eta} \hat{r} \quad (\text{Watt} / \text{m}^2)$$

όπου $\eta = 120\pi\Omega$ ($= 377\Omega$) είναι η χαρακτηριστική αντίσταση του ελεύθερου χώρου.

- Επίσης ισχύει:

$$|\vec{W}| = \frac{EIRP}{4\pi d^2} = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \quad (\text{Watt} / \text{m}^2)$$

όπου $EIRP = P_t G_t$ (Effective Isotropic Radiated Power)

Απώλειες διαδρομής

- Στην πράξη χρησιμοποιούμε το $ERP = \text{Effective Radiated Power}$ αντί για το $EIRP$ για να δηλώσουμε τη μέγιστη ακτινοβολούμενη ενέργεια συγκρινόμενη με ένα δίπολο $\lambda/2$ (αντί για ισοτροπική κεραία).
- Αφού η διπολική κεραία έχει κέρδος 1.64 (2.15dB πάνω από την ισοτροπική), έχουμε:

$$ERP = EIRP - 2.15dB$$

- Στην πράξη τα κέρδη των κεραιών δίνονται σε μονάδες
 $dBi = \text{dB κέρδος σε σχέση με ισοτροπική κεραία}$
 $dBd = \text{dB κέρδος σε σχέση με διπολική κεραία } \lambda/2$

Απώλειες διαδρομής

- Εξίσωση Friis για τον ελεύθερο χώρο:

$$P_r(d) = \frac{|E|^2}{120\pi} A_e = \frac{|E|^2 G_r \lambda^2}{480\pi^2} \quad (Watt)$$

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}$$

- Απώλειες διάδοσης (propagation loss ή path loss):

$$\begin{aligned} L(dB) &= 10 \log_{10} \left(\frac{P_T}{P_R} \right) = \\ &= -10 \log_{10} G_T - 10 \log_{10} G_R + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} d + k_1 \end{aligned}$$

Απώλειες διαδρομής

όπου:

$$k_1 = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{3 \times 10^8} \right) = -147.56 dB$$

- Βασικές απώλειες μεταξύ ιστροπικών κεραιών:

$$L_B (dB) = 32.44 + 20 \log_{10} f_{MHz} + 20 \log_{10} d_{km}$$

η συχνότητα είναι σε *MHz* και η απόσταση σε *km*

Απώλειες διαδρομής

- Οι απώλειες διαδρομής αντιπροσωπεύουν την εξασθένηση του σήματος, και ορίζονται ως η διαφορά (dB) μεταξύ της εκπεμπόμενης και λαμβανόμενης ισχύος. Μπορεί να περιλαμβάνουν τα κέρδη κεραιών, αλλά όχι απαραίτητα.
- Όταν τα κέρδη κεραιών περιλαμβάνονται:

$$PL(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_t}{P_r} \right) = -10 \log_{10} \left(G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \right)$$

- Όταν δεν περιλαμβάνονται (ή π.χ. ιστροπικές κεραιές):

$$PL(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_t}{P_r} \right) = -10 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2$$

Απώλειες διαδρομής

- Η εξίσωση Friis για τον ελεύθερο χώρο ισχύει για την περιοχή στο μακρινό πεδίο (*far-field*) της κεραίας.
- Το μακρινό πεδίο μιας κεραίας ορίζεται να ξεκινάει μετά από απόσταση d_f από την κεραία, όπου:

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda}$$

όπου D η μεγαλύτερη γραμμική διάσταση της κεραίας.

Απώλειες διαδρομής

- Η σχέση του Friis ισχύει στο μακρινό πεδίο και δεν ισχύει για $d=0$.
- Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι να χρησιμοποιηθεί ένα σημείο αναφοράς ($d_0 > d_f$) σε κοντινή απόσταση από τον πομπό με γνωστή ισχύ λήψης $P_r(d_0)$, και η ισχύς λήψης για όλα τα άλλα σημεία ($d > d_0$) να σχετίζεται με την $P_r(d_0)$:

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \quad d \geq d_0 \geq d_f$$

$$P_r(d) \text{ dBm} = P_r(d_0) \text{ dBm} + 20 \log_{10} \left(\frac{d_0}{d} \right)$$

Απώλειες διαδρομής

Η διαφορά ΔP σε dB των ισχύων δύο σημάτων που λαμβάνονται από δύο διαφορετικές κεραιές σε αποστάσεις d_1 και d_2 από τον πομπό

$$\Delta P = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{or2}}{P_{or1}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{d_1}{d_2} \right) dB$$

Λόγος Σήματος προς Θόρυβο

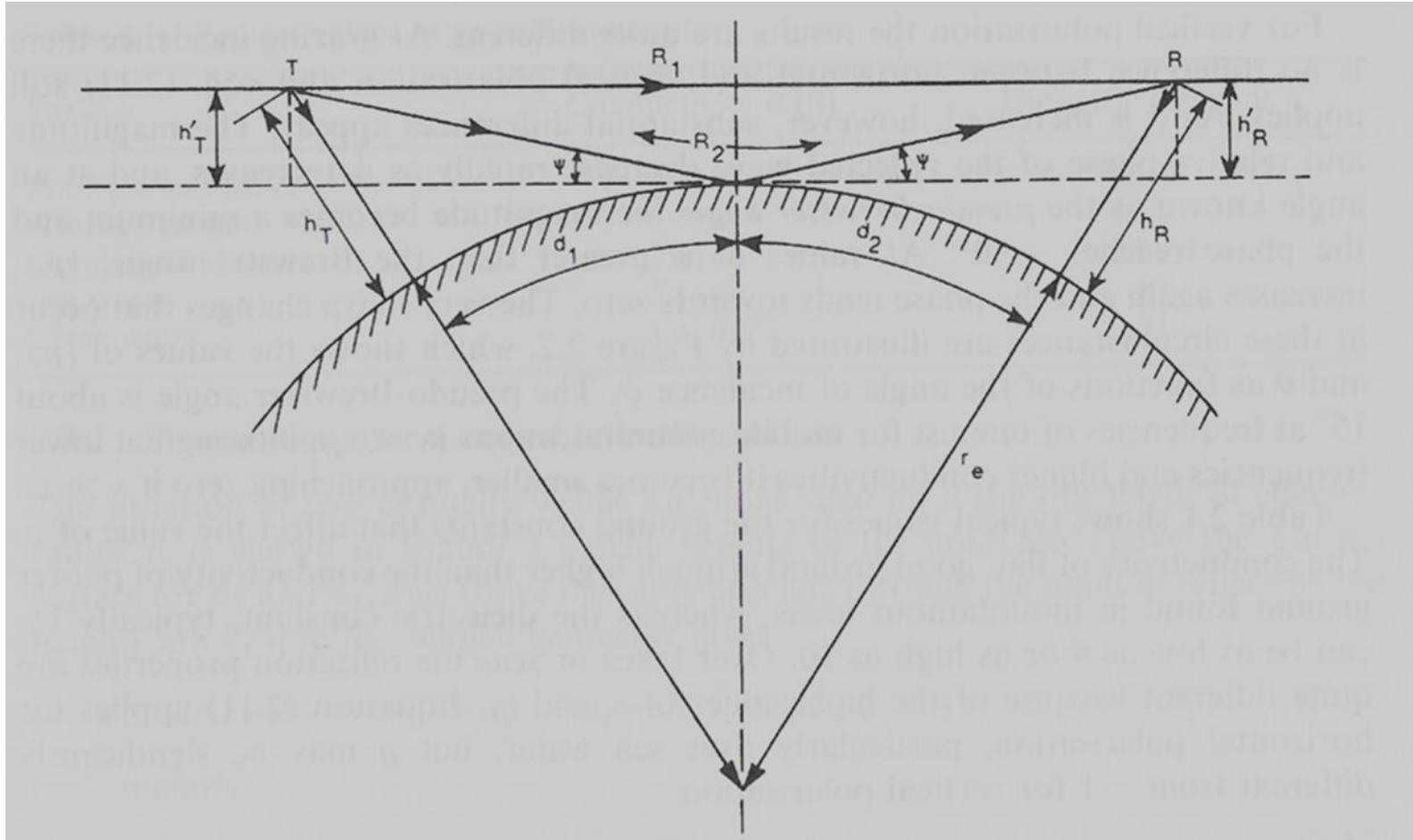
- Για προσαρμοσμένο δέκτη, δεδομένου ότι *Ισχύς θορύβου είναι kTB* (k = σταθερά Boltzman, T = θερμοκρασία, B = εύρος ζώνης), ο λόγος σήματος-προς-θόρυβο στην είσοδο είναι:

$$SNR_i = \frac{P_R}{kTB} = \frac{P_T G_T G_R}{kTB} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

- Αν ο δείκτης θορύβου (*noise figure*) δέκτη είναι F :

$$SNR_o = SNR_i / F \quad \text{ή} \quad (SNR_o)_{dB} = (SNR_i)_{dB} - F_{dB}$$

Διάδοση πάνω από ανακλώμενη επιφάνεια



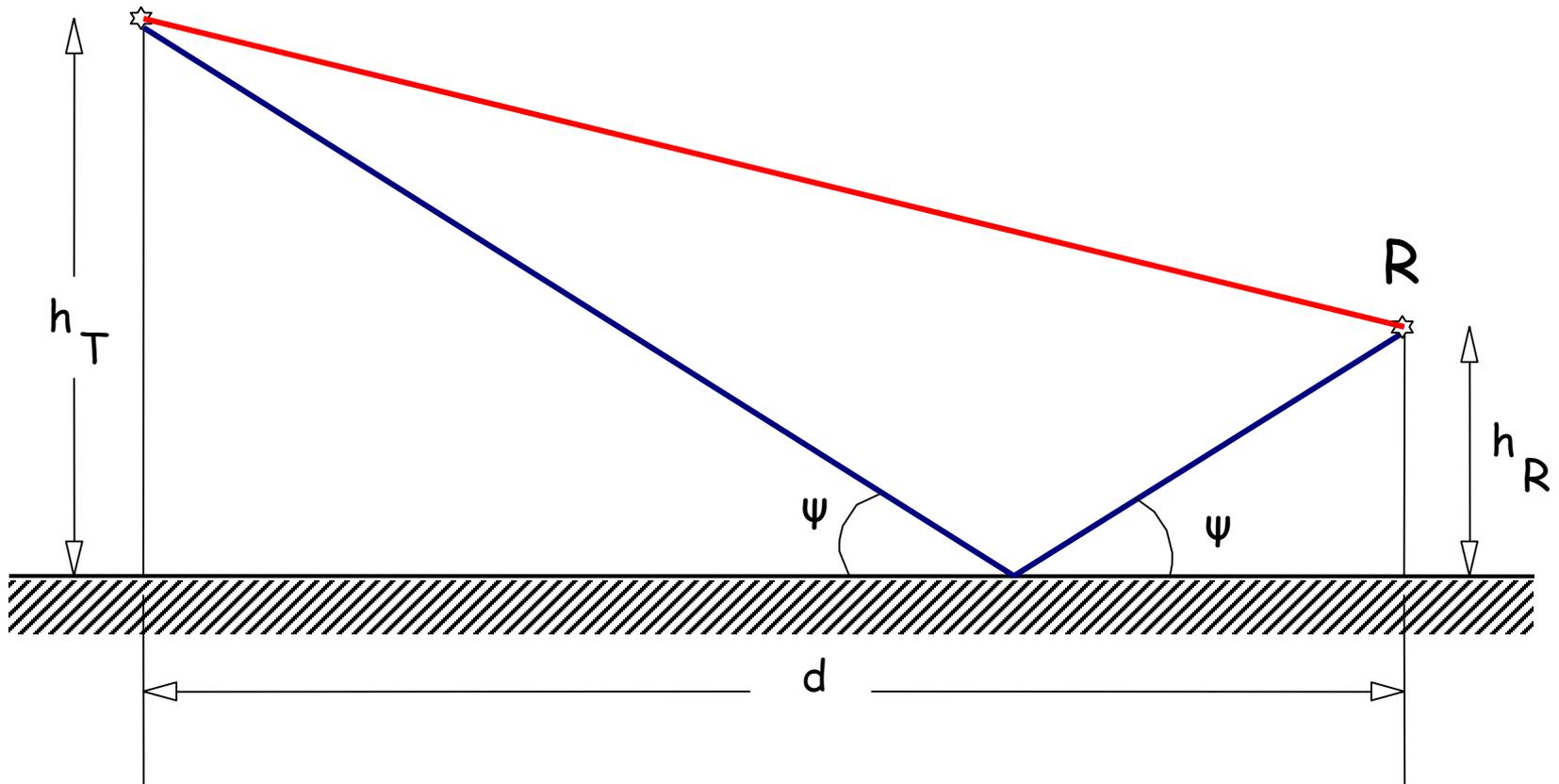
Διάδοση πάνω από ανακλώμενη επιφάνεια

- Οι συντελεστές ανάκλασης είναι μιγαδικοί, και επομένως το ανακλώμενο κύμα θα διαφέρει από το προσπίπτον τόσο σε πλάτος όσο και σε φάση.
- Για την **οριζόντια** πόλωση και για μικρές γωνίες ψ έχουμε:

$$R_h \approx 1 \exp(j\pi) = -1$$

- Η συμπεριφορά του συντελεστή ανάκλασης για **κάθετη** πόλωση αλλάζει πολύ γρήγορα με τη γωνία ψ .
- Για μικρές γωνίες ψ οι δύο πολώσεις συμπεριφέρονται το ίδιο.

Διάδοση πάνω από επίπεδη ανακλώμενη επιφάνεια



Για αποστάσεις μικρότερες από μερικές δεκάδες χιλιόμετρα, συνήθως θεωρούμε ότι η γη είναι επίπεδη.

Διάδοση πάνω από επίπεδη ανακλώμενη επιφάνεια

Αν επίσης υποθέσουμε ανάκλαση με σχεδόν εφαπτομενική γωνία, οπότε $R \approx -1$, έχουμε:

$$E = E_d [1 - \exp(-j\Delta\phi)] = E_d [1 - \cos \Delta\phi + j \sin \Delta\phi]$$

$$\Rightarrow |E| = |E_d| \left[1 + \cos^2 \Delta\phi - 2 \cos \Delta\phi + \sin^2 \Delta\phi \right]^{1/2}$$

$$\Rightarrow |E| = 2|E_d| \sin \frac{\Delta\phi}{2} \quad \text{όπου} \quad \Delta\phi = \frac{4\pi h'_T h'_R}{\lambda d} = \frac{4\pi h_T h_R}{\lambda d}$$

$$|E| = 2|E_d| \sin \frac{2\pi h_T h_R}{\lambda d}$$

Διάδοση πάνω από επίπεδη ανακλώμενη επιφάνεια

Η λαμβανόμενη ισχύς είναι ανάλογη του E^2 :

$$P_R \propto 4|E_d|^2 \sin^2\left(\frac{2\pi h_T h_R}{\lambda d}\right)$$

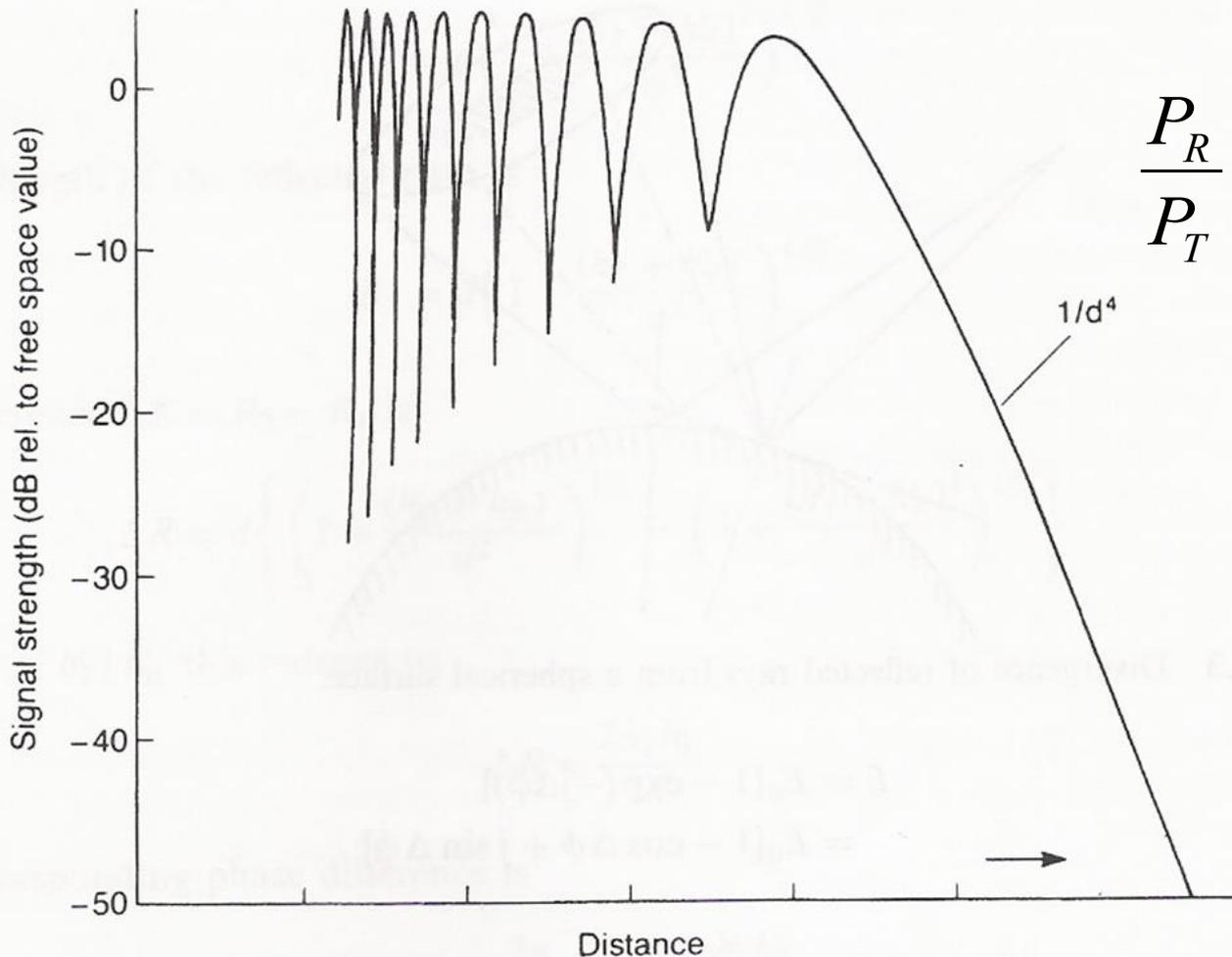
$$P_R = 4P_T \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_T G_R \sin^2\left(\frac{2\pi h_T h_R}{\lambda d}\right)$$

Όταν $d \gg h_T, h_R$:

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left(\frac{h_T h_R}{d^2}\right)^2$$

Διάδοση πάνω από επίπεδη ανακλώμενη επιφάνεια

Εξίσωση διάδοσης επίπεδης γης:



$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left(\frac{h_T h_R}{d^2} \right)^2$$

για $d \gg h_T, h_R$

Διάδοση πάνω από επίπεδη ανακλώμενη επιφάνεια

Εξίσωση διάδοσης επίπεδης γης:

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left(\frac{h_T h_R}{d^2} \right)^2$$

$$\begin{aligned} L(dB) &= 10 \log_{10} \left(\frac{P_T}{P_R} \right) = \\ &= -10 \log_{10} G_T - 10 \log_{10} G_R - 20 \log_{10} h_T - 20 \log_{10} h_R + 40 \log_{10} d \end{aligned}$$

- Βασικές απώλειες μεταξύ ισοτροπικών κεραιών:

$$L(dB) = 40 \log_{10} d - 20 \log_{10} h_T - 20 \log_{10} h_R$$

Διάδοση πάνω από επίπεδη ανακλώμενη επιφάνεια

Εξίσωση διάδοσης
ελεύθερου χώρου

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

Εξίσωση διάδοσης
επίπεδης γης:

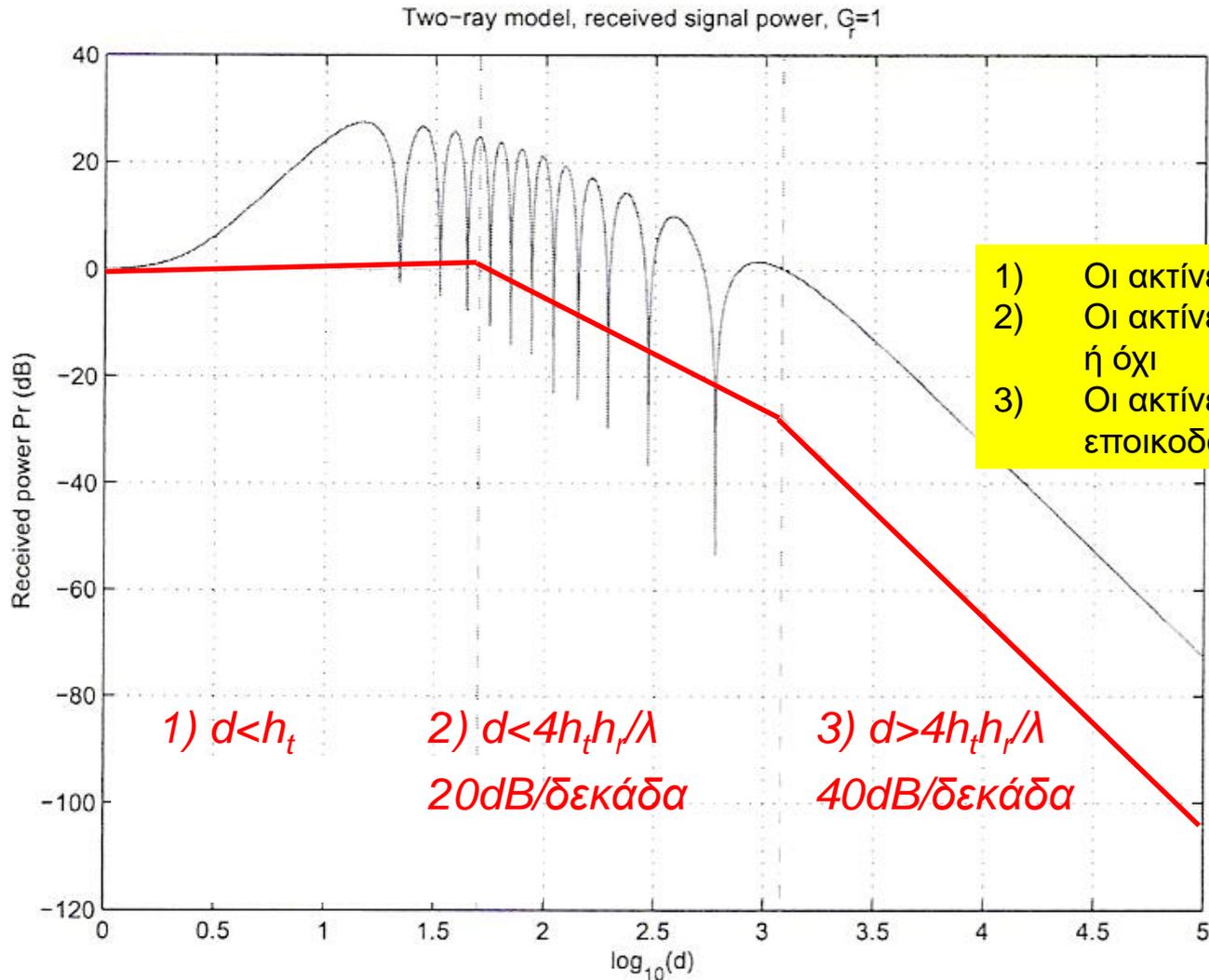
$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left(\frac{h_T h_R}{d^2} \right)^2$$

Στην εξίσωση διάδοσης επίπεδης γης:

A. Εφόσον θεωρούμε $d \gg h_T, h_R$, η διαφορά φάσης γίνεται πολύ μικρή, με αποτέλεσμα το λ να απαλείφεται και η εξίσωση να γίνεται ανεξάρτητη της συχνότητας.

B. Επίσης η λαμβανόμενη ισχύς εξασθενεί αντιστρόφως ανάλογα με το d^4 (και όχι το d^2). Αυτό σημαίνει 12dB λιγότερη ισχύ κάθε φορά που διπλασιάζεται η απόσταση (6dB λιγότερη από την περίπτωση διάδοσης σε ελεύθερο χώρο).

Διάδοση πάνω από επίπεδη επιφάνεια



$f=900\text{MHz}$, $h_t=50\text{m}$
 $h_r=2\text{m}$, $G_t=G_r=1$
 P_t normalised ε.ω. η P_r
να ξεκινά από 0dBm

- 1) Οι ακτίνες προστίθενται εποικοδομητικά
- 2) Οι ακτίνες προστίθενται εποικοδομητικά ή όχι
- 3) Οι ακτίνες δεν προστίθενται εποικοδομητικά ($\Delta\phi \geq \pi$)

Σχόλια

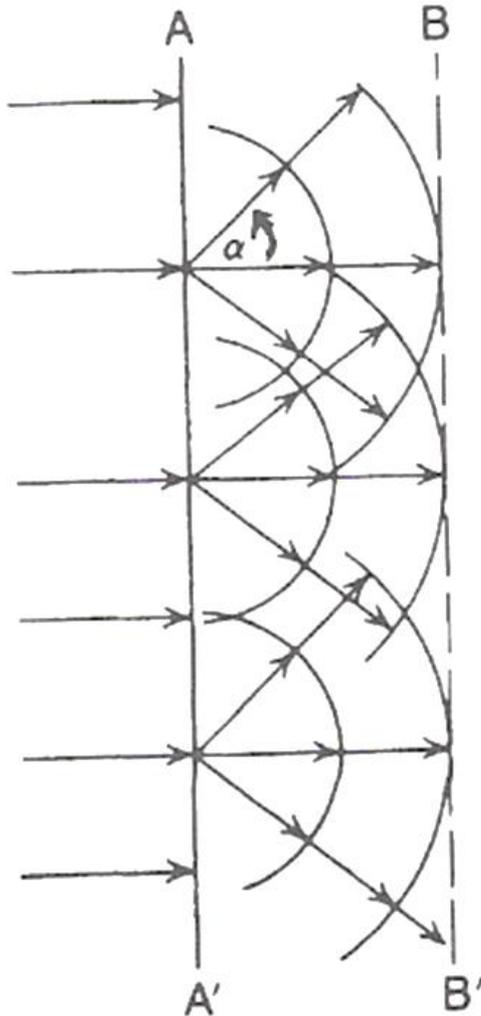
- Η απόσταση d_c ($4h_t h_r / \lambda$) μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη σχεδίαση συστημάτων ως max ακτίνα κυψέλης. Ο λόγος είναι ότι έτσι η εξασθένηση εντός της κυψέλης θα ήταν 20dB/δεκάδα και εκτός 40dB/δεκάδα (δηλαδή οι παρεμβολές θα μειώνονταν γρήγορα).

□ Προβλήματα

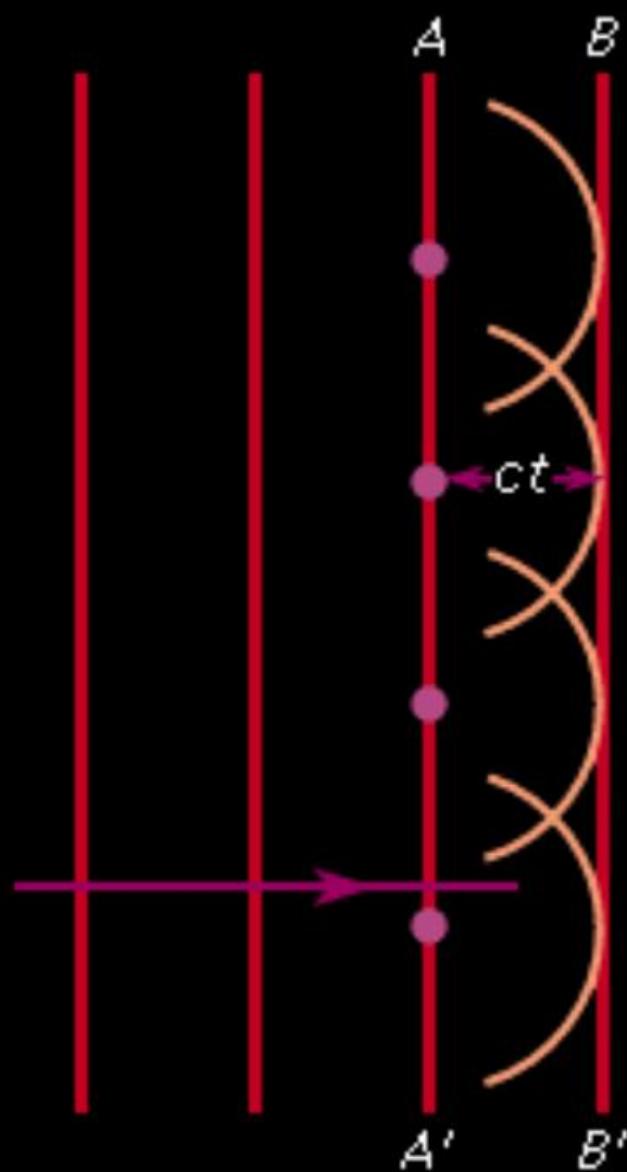
- το μοντέλο 2 ακτίνων δεν αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα καλά (μικρή ακρίβεια). Με αυτή την λογική θα είχαμε σχετικά μεγάλες κυψέλες

Παράδειγμα: $h_t=10\text{m}/3\text{m}$ και $h_r=2\text{m}$ για μικροκυψέλη και πτικοκυψέλη αντίστοιχα, είναι $d_c=535\text{m}/160\text{m}$

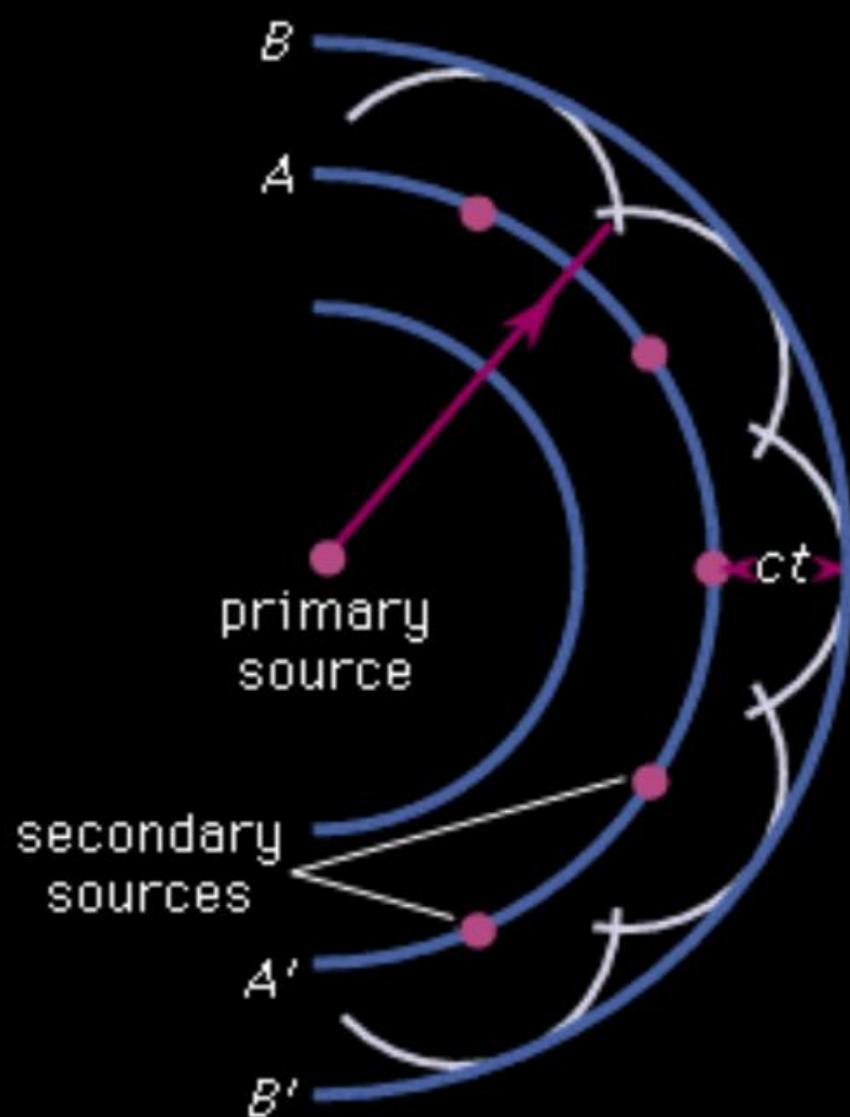
Αρχή του Huygen



- Η αρχή του Huygen λέει πως *κάθε σημείο του μετώπου ενός κύματος λειτουργεί ως πηγή δευτερευόντων κυμάτων των οποίων ο συνδυασμός παράγει ένα νέο μέτωπο στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος.*
- Προκύπτει από τις εξισώσεις του Maxwell.
- Για να οδεύει το κύμα προς την κατεύθυνση διάδοσης, τα δευτερεύοντα κύματα δεν έχουν ομοιόμορφο πλάτος προς όλες τις κατευθύνσεις. Αν α η γωνία της κατεύθυνσης που μας ενδιαφέρει σε σχέση με την κάθετη στο μέτωπο του κύματος, το πλάτος του δευτερεύοντος κύματος σε αυτή την κατεύθυνση είναι ανάλογο με το $(1+\cos\alpha)$.

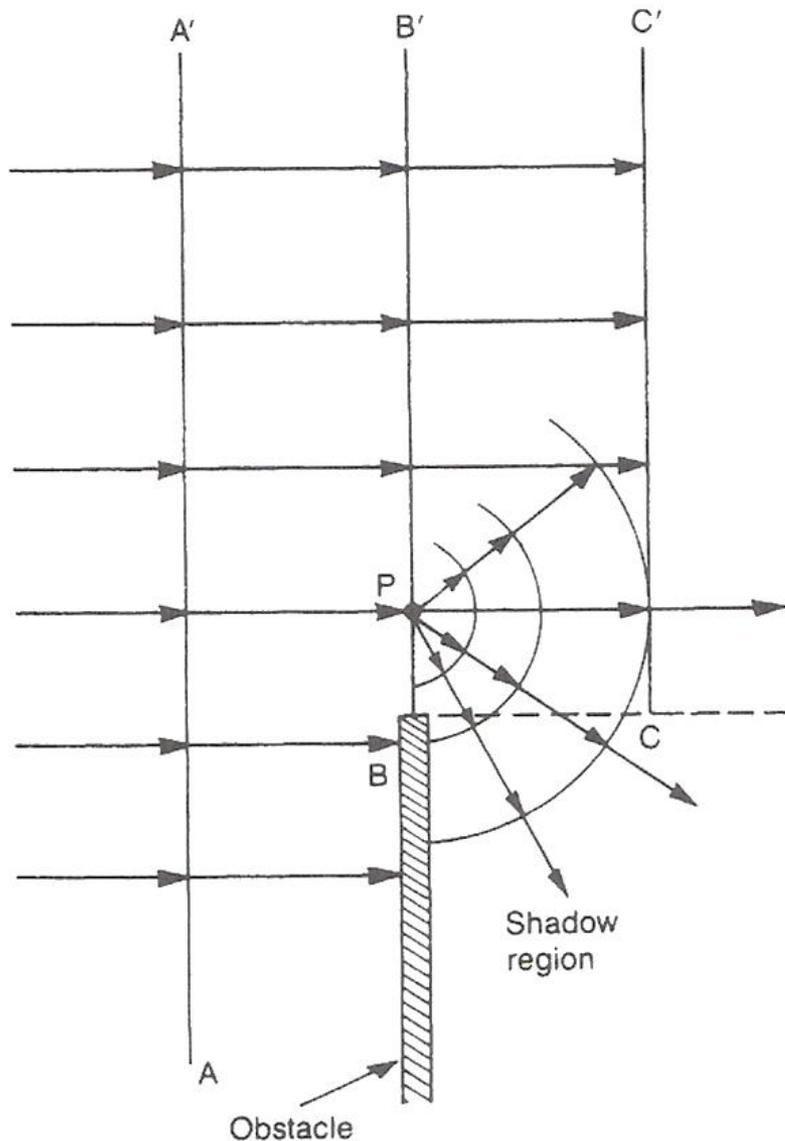
A

plane wavefronts



spherical wavefronts

Περίθλαση σε εμπόδια εδάφους



Σε περίπτωση που υπάρχει ένα εμπόδιο καθώς το κύμα διαδίδεται, σύμφωνα με την αρχή του Huygen δευτερεύοντα κύματα από όλα τα σημεία του μετώπου που δεν πέφτουν πάνω στο εμπόδιο (σημεία πάνω στο BB') θα διαδοθούν στην περιοχή σκίασης.

Έτσι υπάρχει πεδίο στην περιοχή σκίασης που είναι το αποτέλεσμα της άθροισης όλων των δευτερευόντων κυμάτων που φτάνουν σε αυτή την περιοχή.

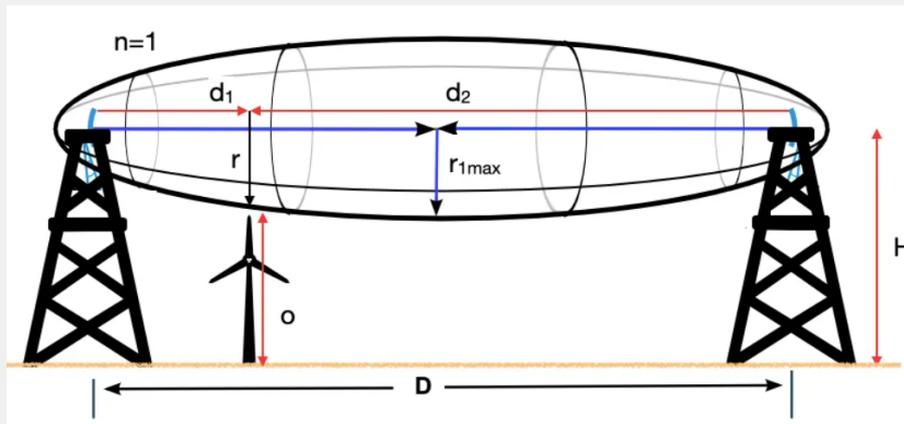
Η φαινομενική κύρτωση των κυμάτων πίσω από εμπόδια ονομάζεται *περίθλαση (diffraction)*.

Περίθλαση σε εμπόδια - Ζώνες Fresnel

☰ **omni** CALCULATOR

I want to calculate the

[1st Fresnel zone](#) ▾



<https://www.omnicalculator.com/physics/fresnel-zone>

Frequency

[GHz](#) ▾

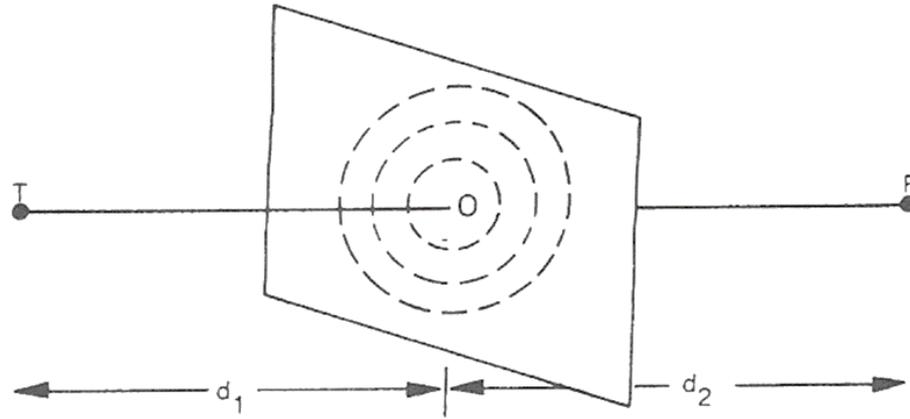
Distance between the antennas (D)

[km](#) ▾

Largest radius (r_{1max})

[m](#) ▾

Περίθλαση σε εμπόδια - Ζώνες Fresnel



Ομόκεντροι κύκλοι που ορίζουν τα όρια των ζωνών Fresnel σε δοσμένο σημείο της διαδρομής διάδοσης

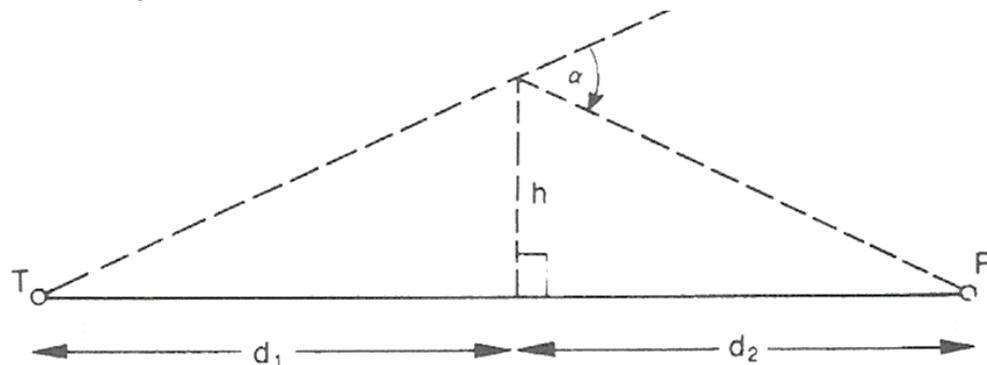
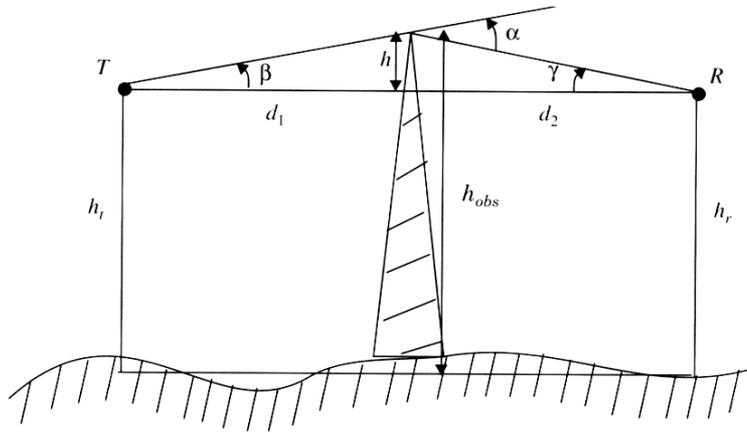


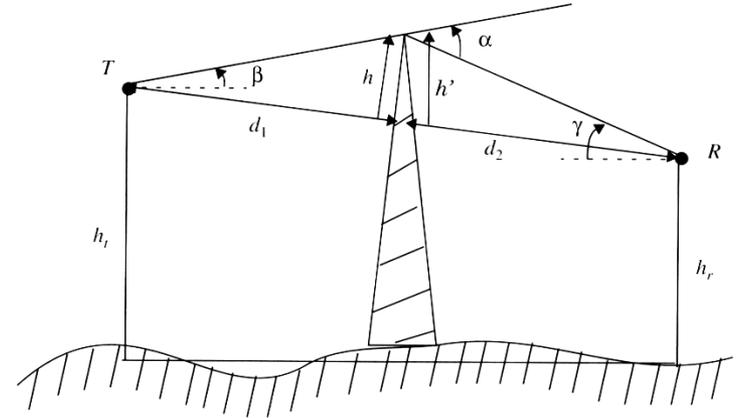
Figure 3.4 The geometry of knife-edge diffraction.

Γεωμετρία της περίθλασης από εμπόδιο αιχμηρού τύπου (*knife-edge diffraction*)

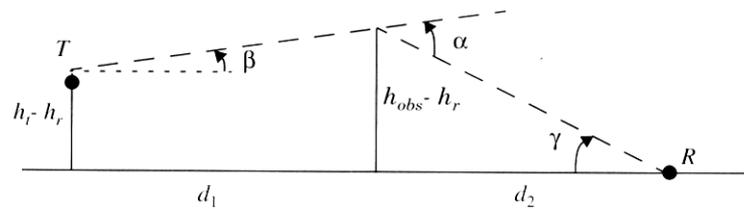
Περίθλαση σε εμπόδια εδάφους



(a) Knife-edge diffraction geometry. The point T denotes the transmitter and R denotes the receiver, with an infinite knife-edge obstruction blocking the line-of-sight path.



(b) Knife-edge diffraction geometry when the transmitter and receiver are not at the same height. Note that if α and β are small and $h \ll d_1$ and d_2 , then h and h' are virtually identical and the geometry may be redrawn as shown in Figure 4.10c.



(c) Equivalent knife-edge geometry where the smallest height (in this case h_r) is subtracted from all other heights.

Figure 4.10 Diagrams of knife-edge geometry.

Περίθλαση σε εμπόδια εδάφους

- Ένα κύμα που διαδίδεται από T σε R περνώντας από κάποιον από αυτούς τους κύκλους έχει διανύσει μεγαλύτερη απόσταση από το απευθείας κύμα TOR, κατά:

$$\Delta \approx \frac{h^2}{2} \left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right) \quad \text{για} \quad h \ll d_1, d_2$$

- Η αντίστοιχη διαφορά φάσης είναι:

$$\phi = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{h^2}{2} \left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right)$$

$$\text{ή} \quad \phi = \frac{\pi}{2} \nu^2 \quad \text{όπου} \quad \nu = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}}$$

*Παράμετρος
περίθλασης
Fresnel-Kirchoff*

Περίθλαση σε εμπόδια εδάφους

- Αλλιώς, χρησιμοποιώντας την ίδια προσέγγιση έχουμε, σε συνάρτηση με τη γωνία α :

$$\phi = \frac{\pi \alpha^2}{\lambda} \left(\frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2} \right)$$

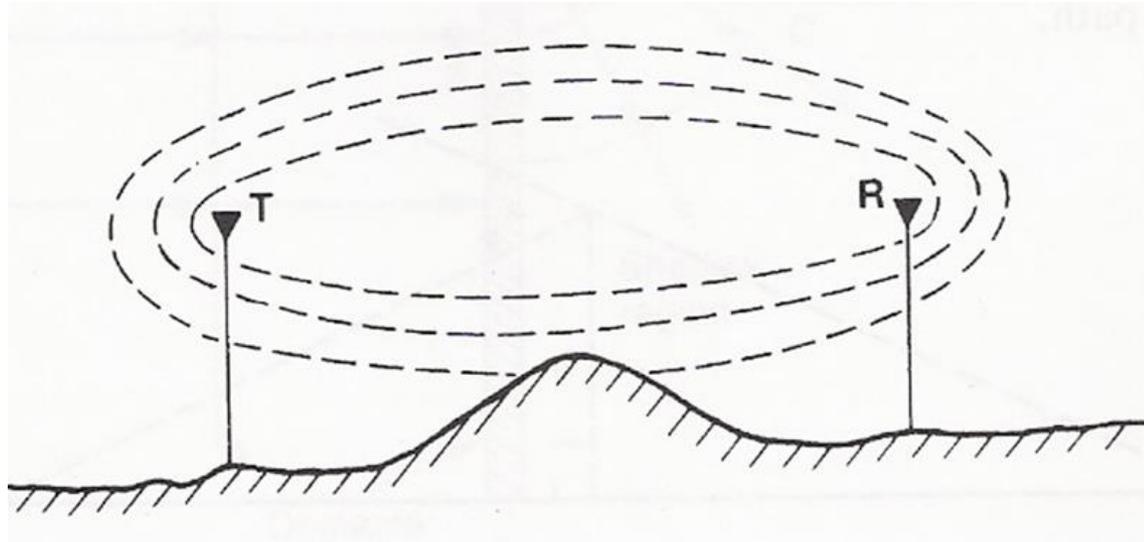
και
$$v = a \sqrt{\frac{2d_1 d_2}{\lambda(d_1 + d_2)}}$$

*Παράμετρος
περίθλασης
Fresnel-Kirchoff*

- Για να έχουμε διάδοση με συνθήκες ελεύθερου χώρου πρέπει η περιοχή της πρώτης Fresnel ζώνης να είναι ελεύθερη από εμπόδια.*
- Αλλιώς αν η πρώτη Fresnel ζώνη δεν είναι ελεύθερη, οι απώλειες διάδοσης μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερες ακόμα και με συνθήκες οπτικής επαφής.

Περίθλαση σε εμπόδια εδάφους

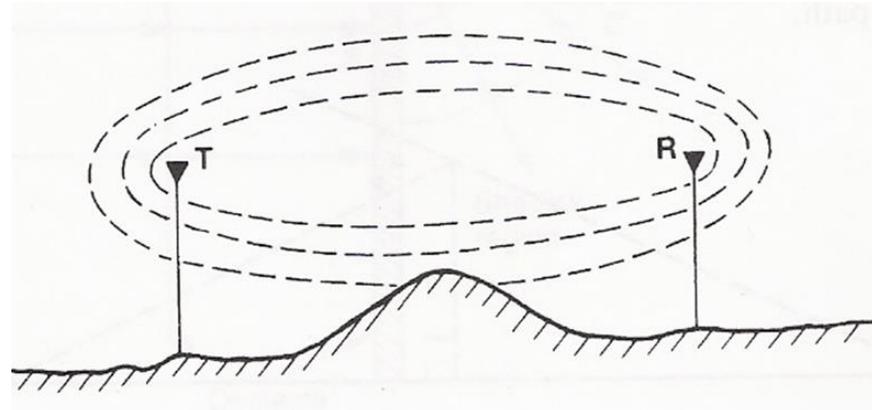
Ελλειψοειδείς
ζώνες Fresnel



- Θεωρούμε ένα υποσύνολο των παραπάνω κύκλων, έτσι ώστε ένα κύμα που διαδίδεται από T σε R περνώντας από κάποιον από αυτούς τους κύκλους να έχει διανύσει μεγαλύτερη απόσταση από το απευθείας κύμα TOR, κατά $n\lambda/2$, όπου n ακέραιος. Φυσικά η ακτίνα κάθε τέτοιου κύκλου εξαρτάται από τη θέση του σε σχέση με τα T και R
- Έτσι κατά μήκος της διαδρομής TOR σχηματίζονται ελλειψοειδείς όγκοι που τους ονομάζουμε *Ζώνες Fresnel*.

Περίθλαση σε εμπόδια εδάφους

Ελλειψοειδείς
ζώνες Fresnel



- Η ακτίνα της n -οστής ζώνης Fresnel είναι:
$$h = r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

και αφού
$$v = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \Rightarrow v_n = \sqrt{2n}$$

Διαφορά φάσης:
$$\phi = \frac{\pi}{2} v_n^2 = \frac{\pi}{2} 2n = n\pi$$

δεδομένου πάντα ότι $d_1, d_2 \gg r_n$.

Περίθλαση σε εμπόδια εδάφους

- Αντικαθιστούμε το εμπόδιο με απορροφητικό επίπεδο κάθετο στο απευθείας μονοπάτι που εκτείνεται στο άπειρο προς όλες τις κατευθύνσεις εκτός από την κατακόρυφη, όπου και σταματάει σε ύψος όσο και του αρχικού εμποδίου. Οι ανακλάσεις από τη γη αγνοούνται.

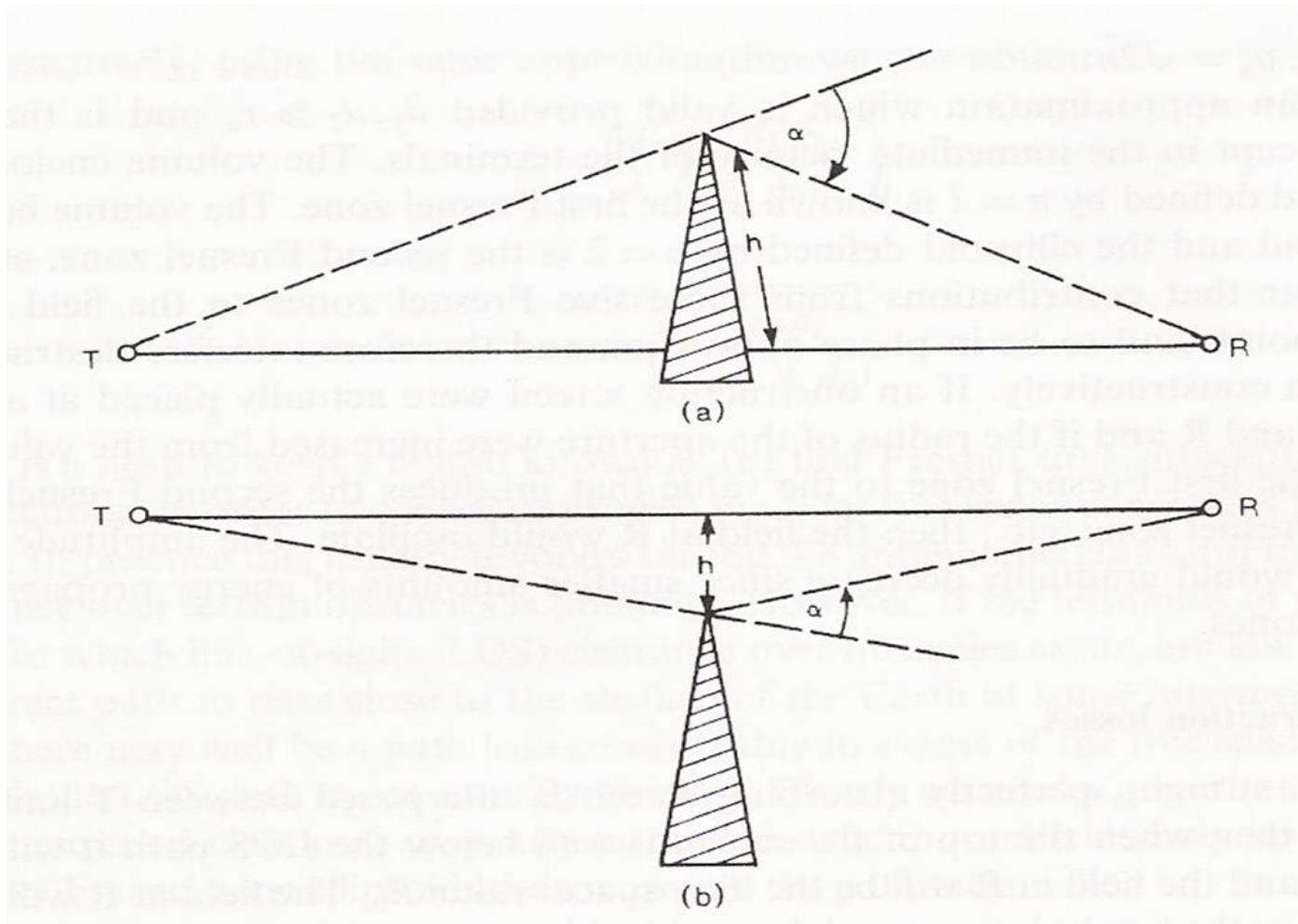
Περίθλαση αιχμηρού αντικειμένου -Knife-edge diffraction

- Το πεδίο στο R είναι το άθροισμα από όλες τις δευτερεύουσες πηγές του Huygen:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{1+j}{2} \int_v^{\infty} \exp\left(-j \frac{\pi}{2} t^2\right) dt$$

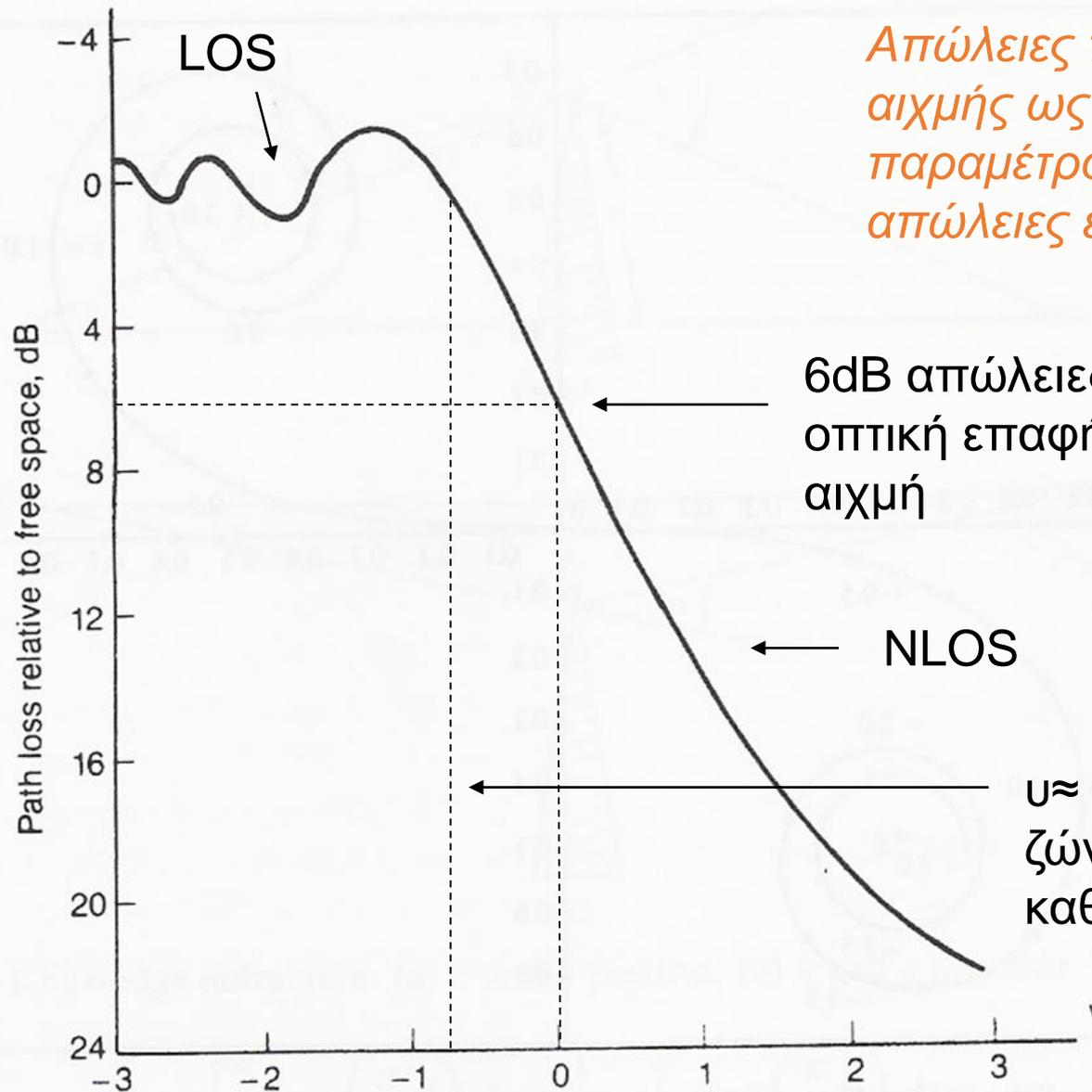
Μιγαδικό ολοκλήρωμα Fresnel

Περίθλαση σε εμπόδια εδάφους



Αν το εμπόδιο είναι κάτω από τη γραμμή οπτικής επαφής, τότε το h , και επομένως και το u , είναι αρνητικά.

Περίθλαση σε εμπόδια εδάφους



Απώλειες περίθλασης μιας αιχμής ως συνάρτηση της παραμέτρου v σε σχέση με τις απώλειες ελεύθερου χώρου.

6dB απώλειες για εφαπτομενική οπτική επαφή πάνω από την αιχμή

NLOS

$v \approx -0.8$, το 56% της 1ης ζώνης Fresnel είναι καθαρό από εμπόδια.

Περίθλαση σε εμπόδια εδάφους

Έστω ότι ένα ιδανικό, τελείως απορροφητικό επίπεδο εμπόδιο (obstructing screen) τοποθετείται σε κάποιο σημείο ανάμεσα στα T και R.

Όταν το ύψος του εμποδίου είναι πολύ πιο κάτω από το μονοπάτι οπτικής επαφής, το εμπόδιο θα έχει μικρή επίδραση στο πεδίο στο R, το οποίο θα είναι αυτό του 'ελεύθερου χώρου'.

Καθώς αυξάνεται το ύψος του εμποδίου, το πεδίο στο R αρχίζει να ταλαντώνεται αφού όλο και περισσότερες ζώνες Fresnel κάτω από το μονοπάτι οπτικής επαφής 'μπλοκάρονται'.

Το πλάτος της ταλάντωσης αυξάνεται καθώς το ύψος του εμποδίου πλησιάζει το μονοπάτι οπτικής επαφής.

Όταν το εμπόδιο φτάσει ακριβώς το μονοπάτι οπτικής επαφής η ένταση του πεδίου στο R είναι ακριβώς η μισή της έντασης πεδίου όταν δεν υπάρχουν εμπόδια, δηλαδή οι απώλειες ισχύος είναι 6dB.

Καθώς το ύψος του εμποδίου αυξάνεται ακόμα περισσότερο, η ταλάντωση σταματάει και η ένταση του πεδίου μειώνεται σταθερά καθώς μικρότερες ποσότητες ενέργειας διαδίδονται από τις εξωτερικές ζώνες

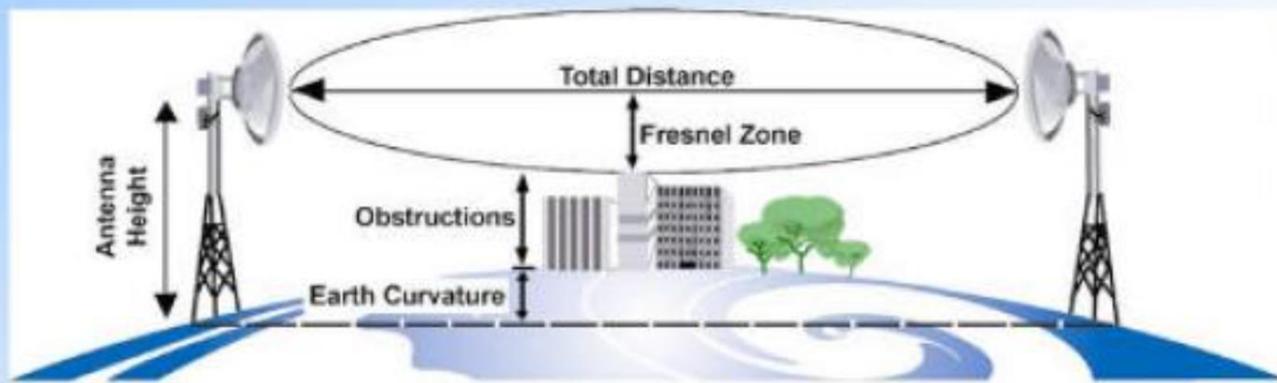
Περίθλαση σε εμπόδια εδάφους

Προσεγγιστική έκφραση υπολογισμού των απωλειών περίθλασης (από τον Lee):

$$L(\nu) (dB) = \begin{cases} -20 \log(0.5 - 0.62\nu) & -0.8 < \nu < 0 \\ -20 \log(0.5 \exp(-0.95\nu)) & 0 < \nu < 1 \\ -20 \log \left[0.4 - \left\{ 0.1184 - (0.38 - 0.1\nu)^2 \right\}^{1/2} \right] & 1 < \nu < 2.4 \\ -20 \log(0.225 / \nu) & \nu > 2.4 \end{cases}$$

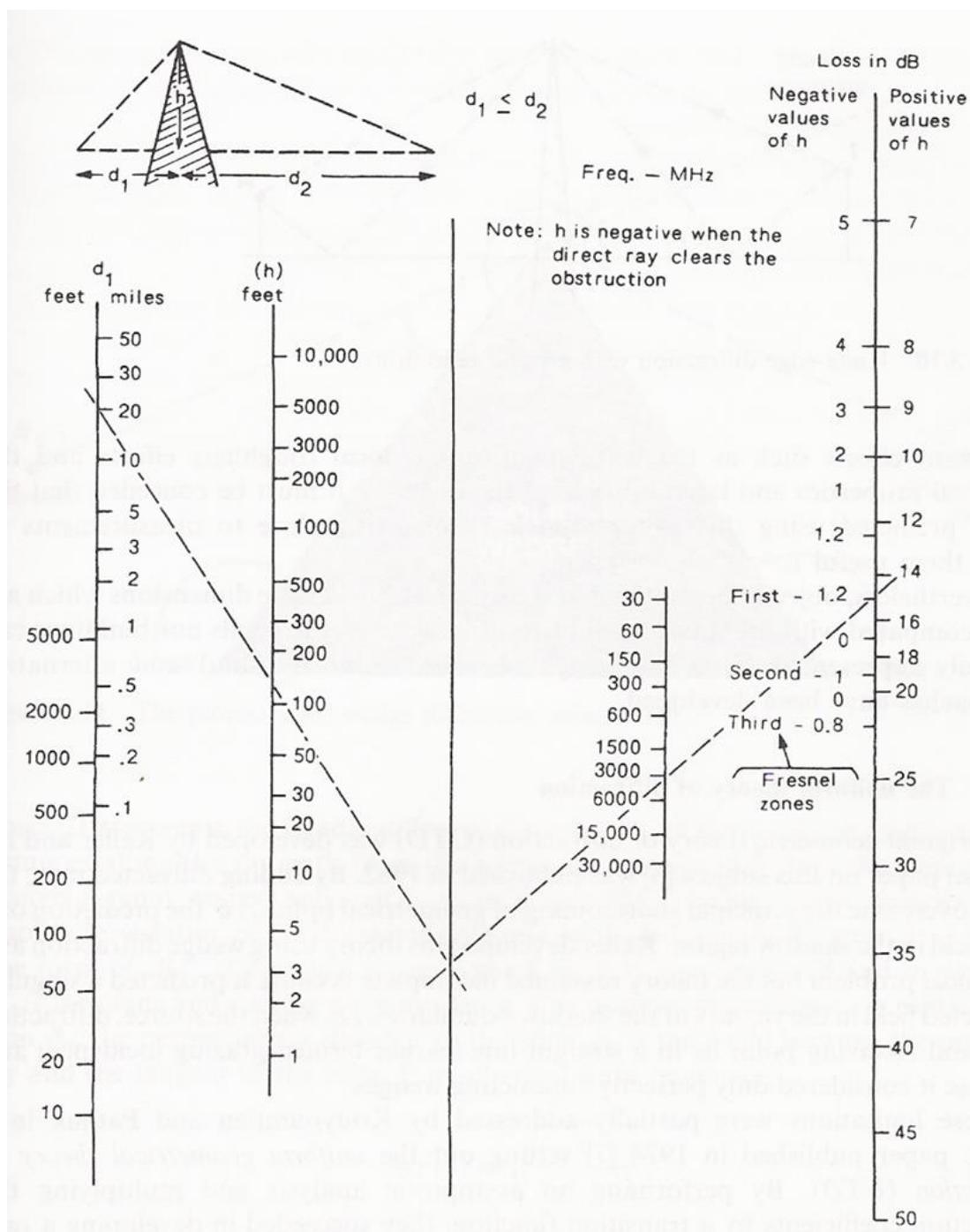
<https://microwavenetworks.blogspot.com/2009/09/what-is-fresnel-zone-in-microwave-radio.html>

**As distance increase, the Fresnel Zone gets fatter.
For long ranges, higher antennas are required for
the Fresnel Zone to clear obstacles.**



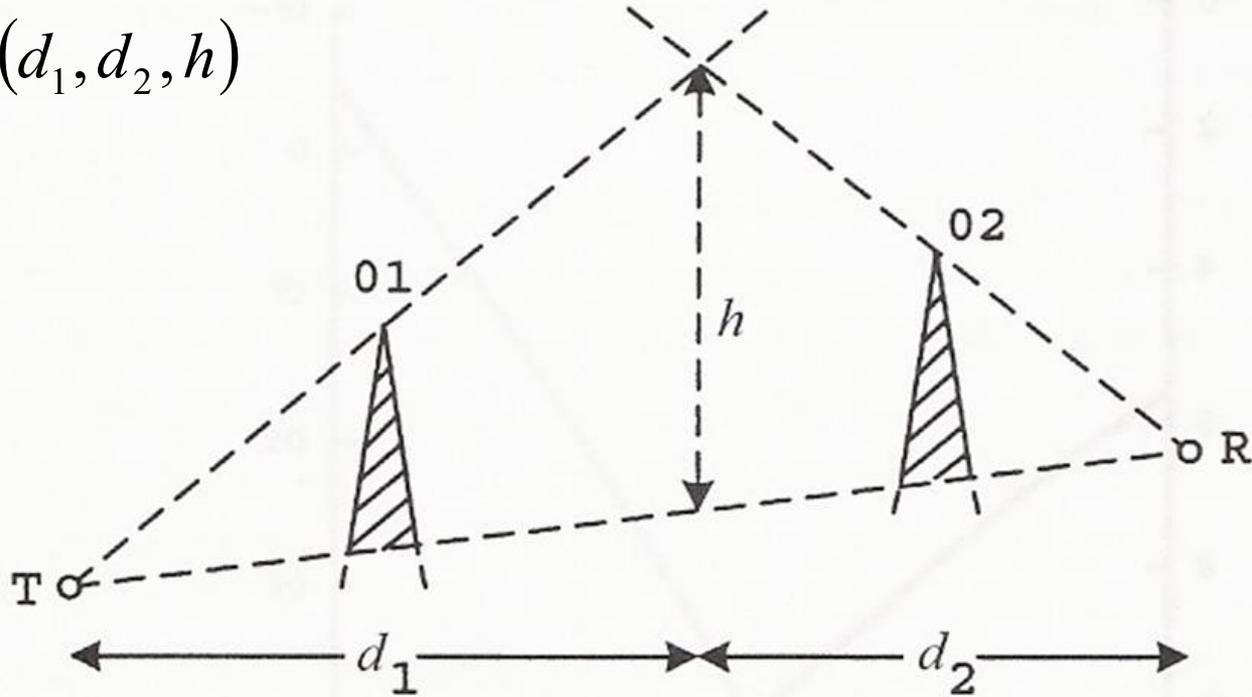
Περίθλαση σε εμπόδια εδάφους

Προσεγγιστικός γραφικός τρόπος υπολογισμού των απωλειών περίθλασης (*Bullington*) με λάθος λιγότερο από 2dB .



Περίθλαση από πολλαπλές αιχμές

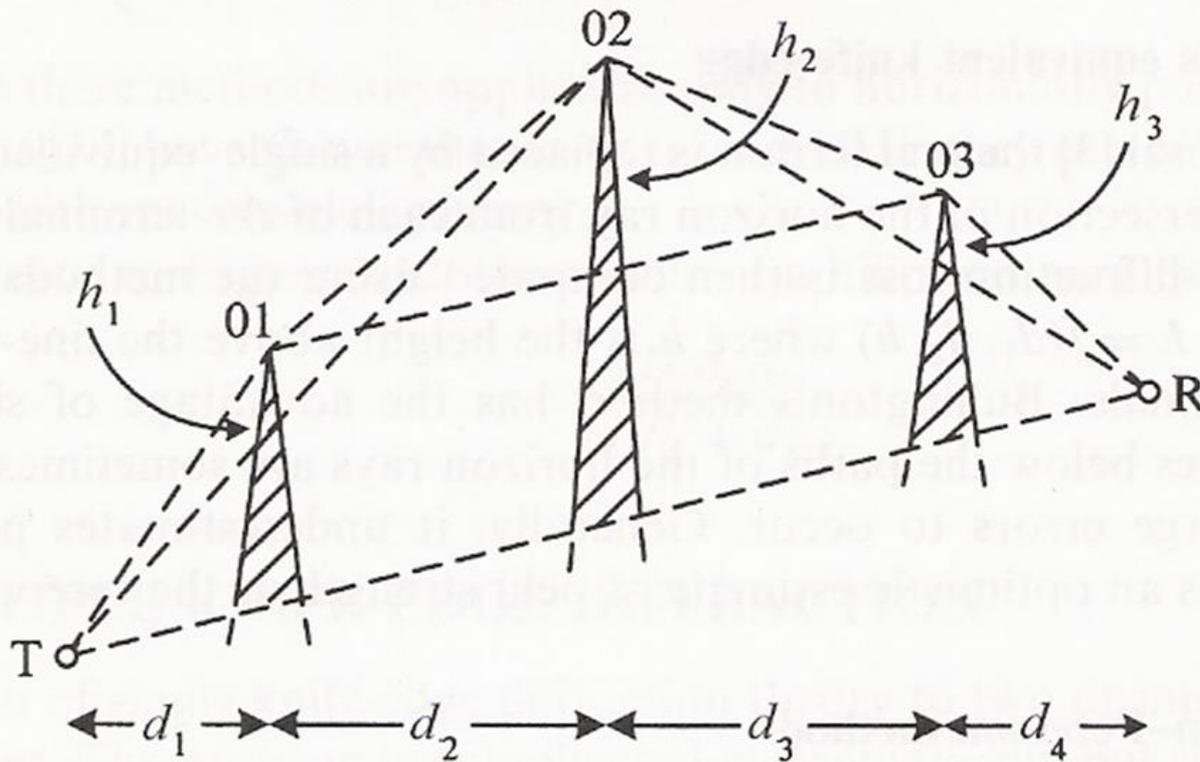
$$L = f(d_1, d_2, h)$$



The Bullington 'equivalent' knife-edge.

- Σημαντικά εμπόδια μπορεί να αγνοηθούν.
- Γενικά υποτιμά τις απώλειες διάδοσης και δίνει αισιόδοξα αποτελέσματα.

Περίθλαση από πολλαπλές αιχμές

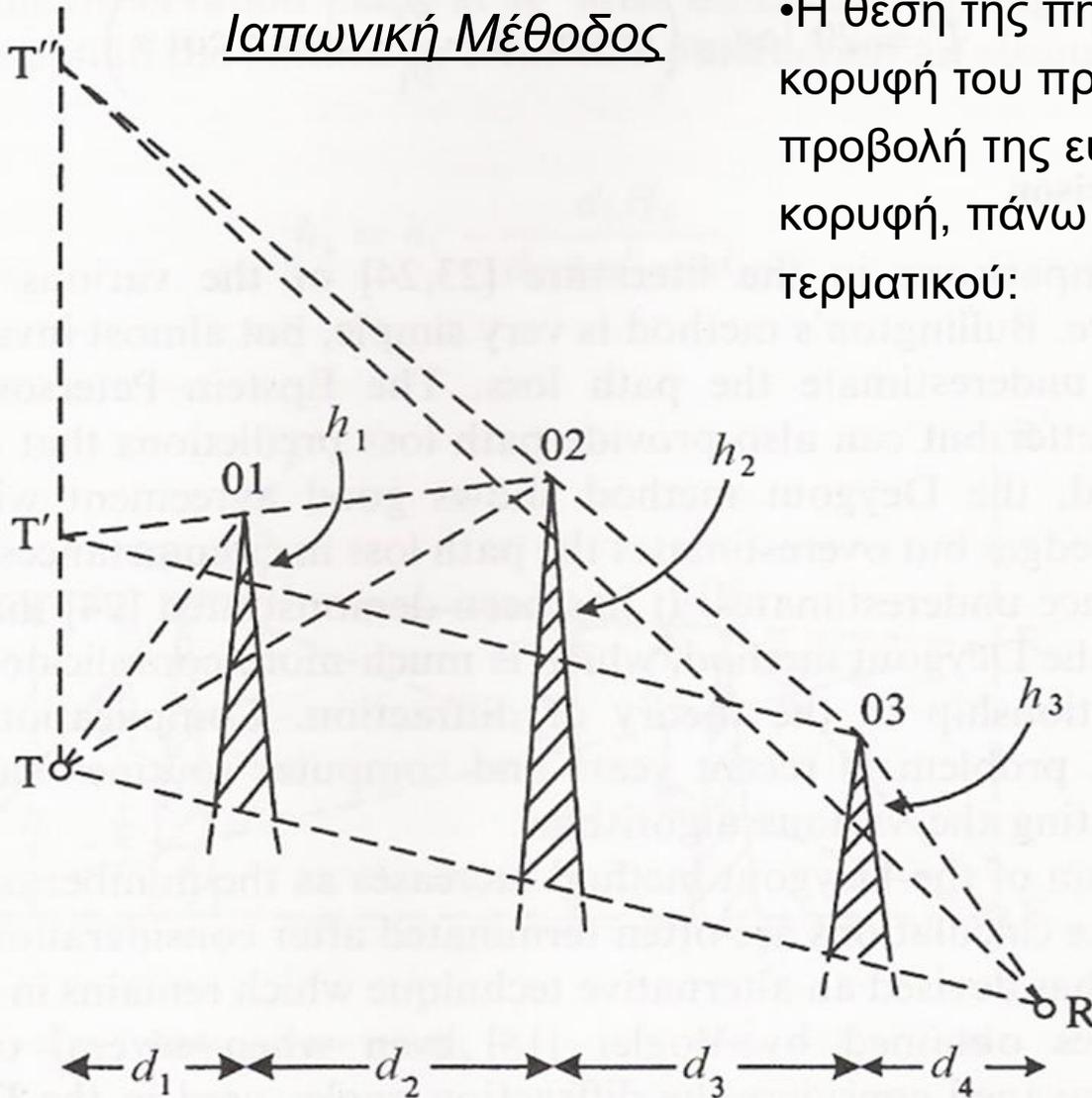


The Epstein-Peterson diffraction construction.

$$L = L_{01} + L_{02} + L_{03}$$
$$L_{01} = f(d_1, d_2, h_1)$$
$$L_{02} = f(d_2, d_3, h_2)$$
$$L_{03} = f(d_3, d_4, h_3)$$

- Υπολογίζει τις απώλειες για κάθε εμπόδιο και προσθέτει τις απώλειες.
- Η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί και όταν οι αιχμές δεν εμποδίζουν τη γραμμή οπτικής επαφής αλλά τις πιο έξω ζώνες Fresnel.
- Πολύ λάθος προβλέψεις όταν τα εμπόδια είναι πολύ κοντά τοποθετημένα.

Περίθλαση από πολλαπλές αιχμές



• Η θέση της πηγής κάθε φορά δε θεωρείται η κορυφή του προηγούμενου εμποδίου, αλλά η προβολή της ευθείας που περνά από αυτή την κορυφή, πάνω στην κατακόρυφο στη θέση του τερματικού:

$$L = L_{01} + L_{02} + L_{03}$$

$$L_{01} = f(d_1, d_2, h_1)$$

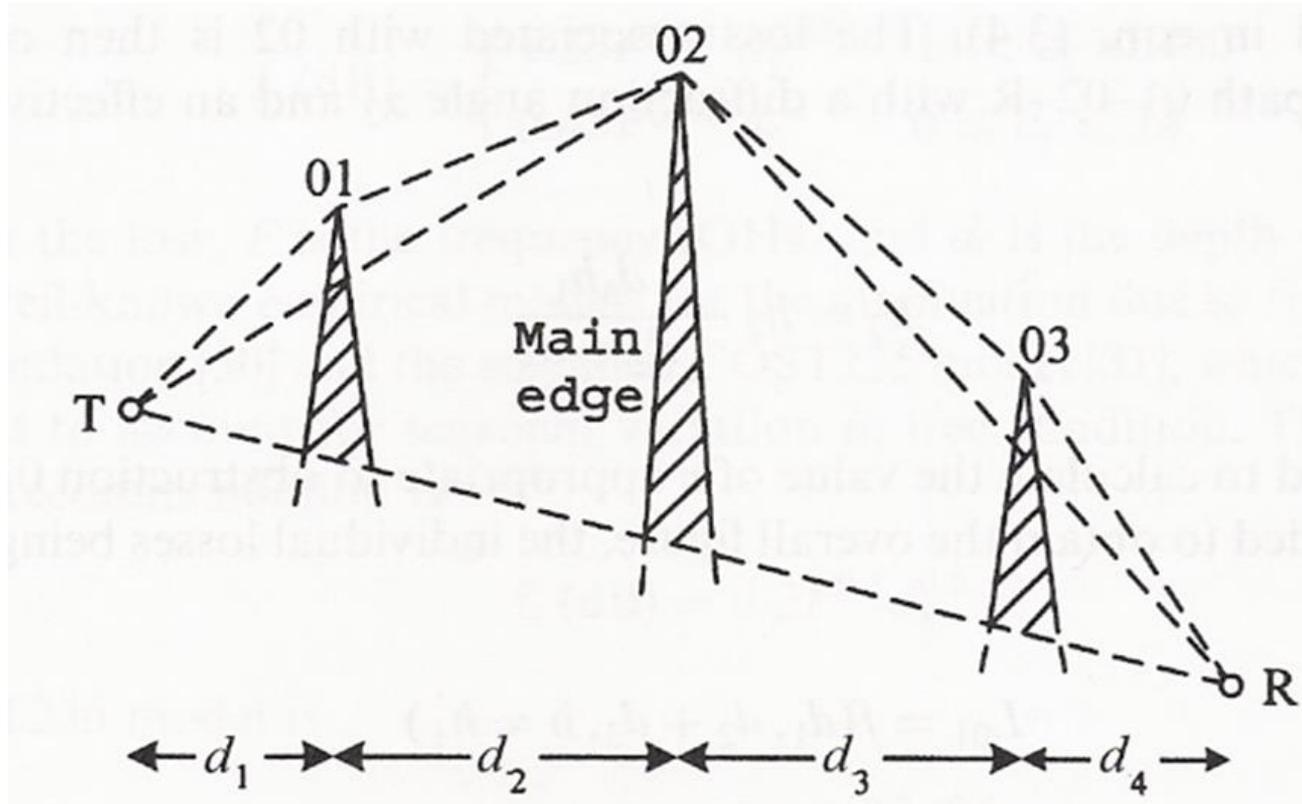
$$L_{02} = f([d_1 + d_2], d_3, h_2)$$

$$L_{03} = f([d_1 + d_2 + d_3], d_4, h_3)$$

• Αν και υπάρχει βελτίωση σε σχέση με τη μέθοδο *Bullington*, και αυτές οι μέθοδοι υποτιμούν τις απώλειες.

Περίθλαση από πολλαπλές αιχμές

Μέθοδος Deygout ή μέθοδος της κύριας αιχμής



- Η αιχμή με τη μεγαλύτερη τιμή u ονομάζεται κύρια αιχμή και οι απώλειες υπολογίζονται να είναι το μόνο εμπόδιο.
- Οι απώλειες διάθλασης των άλλων αιχμών υπολογίζονται σε σχέση με τη γραμμή που ενώνει την κύρια αιχμή με τα τερματικά και προστίθενται στις απώλειες της κύριας αιχμής.
- Ακόμα και αν υπάρχουν και περισσότερες αιχμές, συνήθως υπολογίζονται οι απώλειες από την κύρια αιχμή και τις δύο μεγαλύτερες εκατέρωθεν της κύριας.

Περίθλαση από πολλαπλές αιχμές

- Η μέθοδος *Bullington* είναι πολύ απλή, αλλά υποτιμά τις απώλειες.
- Η μέθοδος *Erstein-Peterson* και η *Ιαπωνική* μέθοδος είναι καλύτερες αλλά οι προβλέψεις είναι επίσης μικρές.
- Η μέθοδος *Deygout* συμφωνεί με τις προβλέψεις των αναλυτικών μεθόδων όταν υπάρχουν δύο αιχμές, αλλά υπερτιμά τις απώλειες στις περιπτώσεις που οι άλλες μέθοδοι υποτιμούν τις απώλειες. Η υπερτίμηση των απωλειών αυξάνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των εμποδίων.

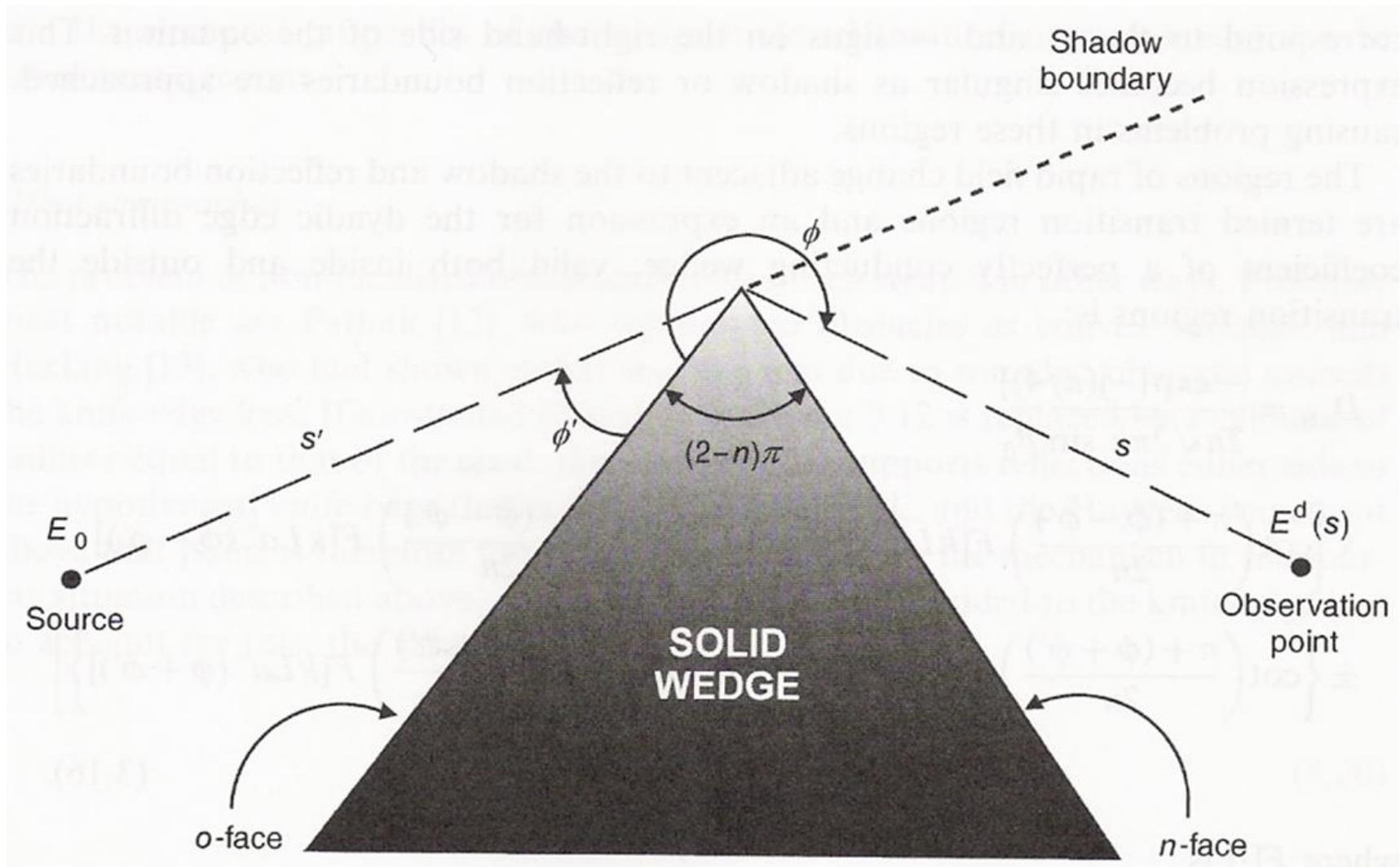
Περίθλαση σε πραγματικά εμπόδια

Η αρχή του Huygen εξηγεί γιατί υπάρχει πεδίο πίσω από ένα εμπόδιο, αλλά η υπόθεση ότι το εμπόδιο μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα ιδανικό, ίσιο, τελείως απορροφητικό επίπεδο είναι πολύ προσεγγιστική.

Παρόλο που αγνοεί σημαντικούς παράγοντες όπως την πόλωση του κύματος, τα αποτελέσματα τοπικών ανωμαλιών, τις ηλεκτρικές ιδιότητες του εμποδίου και τη μορφολογία των πλευρικών πλευρών του, οι προβλέψεις αυτής της προσέγγισης είναι αρκετά κοντά σε αντίστοιχες μετρήσεις για να είναι χρήσιμες στους σχεδιαστές των συστημάτων.

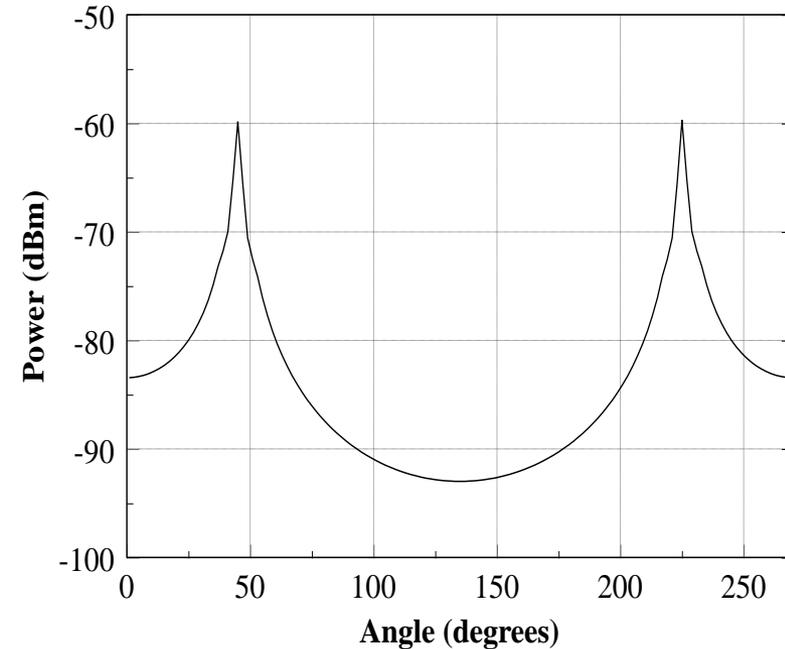
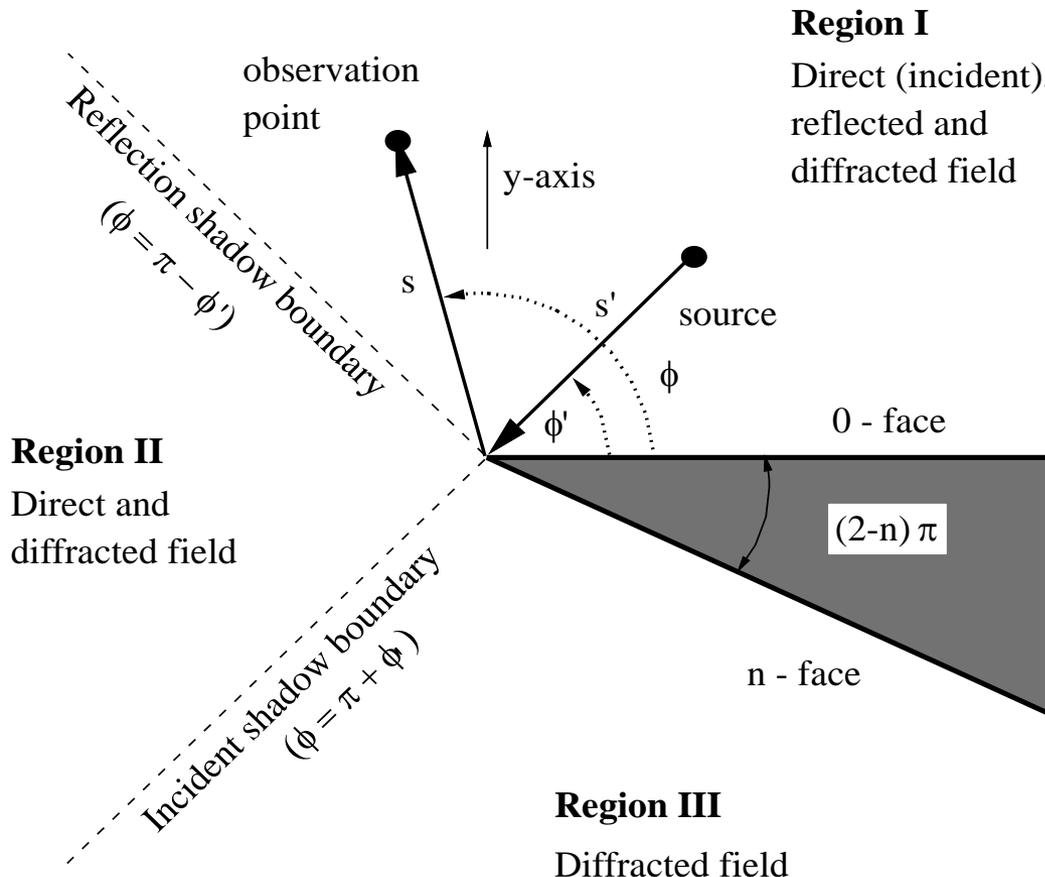
Εναλλακτικές προσεγγίσεις με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην αναπαράσταση των εμποδίων έχουν αναπτυχθεί.

Ομοιόμορφη Θεωρία Περίθλασης (Uniform Theory of Diffraction)



Ομοιόμορφη Θεωρία Περίθλασης

$$E^d(s) = E^i(Q_D) \cdot \bar{D} \cdot A(s', s) e^{-j\beta s}$$



Ομοιόμορφη Θεωρία Περίθλασης (Uniform Theory of Diffraction)

Το πλεονέκτημα είναι ότι παράγοντες όπως η πόλωση του κύματος, τοπικές ανωμαλίες, οι ηλεκτρικές ιδιότητες του εμποδίου μπορούν να ληφθούν υπόψη.

Μειονέκτημα είναι η υπολογιστική πολυπλοκότητα του προβλήματος.

Μοντέλα εξασθένησης- Εξασθένηση λόγω βλάστησης

- Έχουν γίνει πολλές μελέτες με σκοπό το χαρακτηρισμό και τη μοντελοποίηση της **εξασθένησης λόγω βλάστησης**.
- Τα μοντέλα για την εξασθένηση λόγω βλάστησης προέρχονται από εκτενείς μετρήσεις (εμπειρικά μοντέλα).
- Οι μετρήσεις έχουν δείξει ότι η εξασθένηση αυτή εξαρτάται από την εποχή του χρόνου (δηλ. κατά πόσο τα δέντρα έχουν φύλλωμα), την απόσταση της διάδοσης μέσα στο φύλλωμα και τη συχνότητα του εκπεμπόμενου σήματος.
- Συνήθως είναι εκθετικά μοντέλα και χαρακτηρίζουν την εξασθένηση υπό τη μορφή decibel ανά μέτρο διάδοσης μέσα σε βλάστηση.

Μοντέλα εξασθένησης- Εξασθένηση λόγω βλάστησης

- Το μοντέλο του Weissberger για πυκνή, στεγνή βλάστηση με φύλλωμα:

$$L(dB) = \begin{cases} 1.33F^{0.284} d_f^{0.588} & 14 < d_f \leq 400 \\ 0.45F^{0.284} d_f & 0 \leq d_f \leq 14 \end{cases}$$

όπου L οι απώλειες σε dB , F η συχνότητα σε GHz , d_f το βάθος των δέντρων σε *meters*.

Μοντέλα εξασθένησης- Εξασθένηση λόγω βλάστησης

- Μοντέλο της ITU:

$$L(dB) = 0.2F^{0.3}d_f^{0.6}$$

(καλή συμφωνία με μετρήσεις στα 1800MHz).

- Το μοντέλο του COST235:

$$L(dB) = 26.6F^{-0.2}d_f^{0.5} \quad \text{για βλάστηση με φύλλωμα}$$

$$L(dB) = 15.6F^{-0.009}d_f^{0.26} \quad \text{για βλάστηση χωρίς φύλλωμα}$$

Η εποχική διαφορά είναι της τάξης των 4-6dB.

Μοντέλα εξασθένησης το μοντέλο του Egli

- Μετά από σειρά μετρήσεων πάνω από ανώμαλο έδαφος στις συχνότητες μεταξύ 90 και 1000MHz, ο Egli παρατήρησε (δημοσίευση του 1957) ότι η μεσαία ένταση πεδίου σε μια μικρή περιοχή τείνει να εξασθενεί ανάλογα με την τέταρτη δύναμη της απόστασης από τον εκπομπό.
- Επίσης η εξασθένηση είναι μεγαλύτερη από αυτή που προβλέπει το μοντέλο επίπεδης γης κατά ένα παράγοντα που εξαρτάται από τη συχνότητα και τη φύση του εδάφους:

$$L_{50} = G_b G_m \left(\frac{h_b h_m}{d^2} \right)^2 \beta$$

όπου

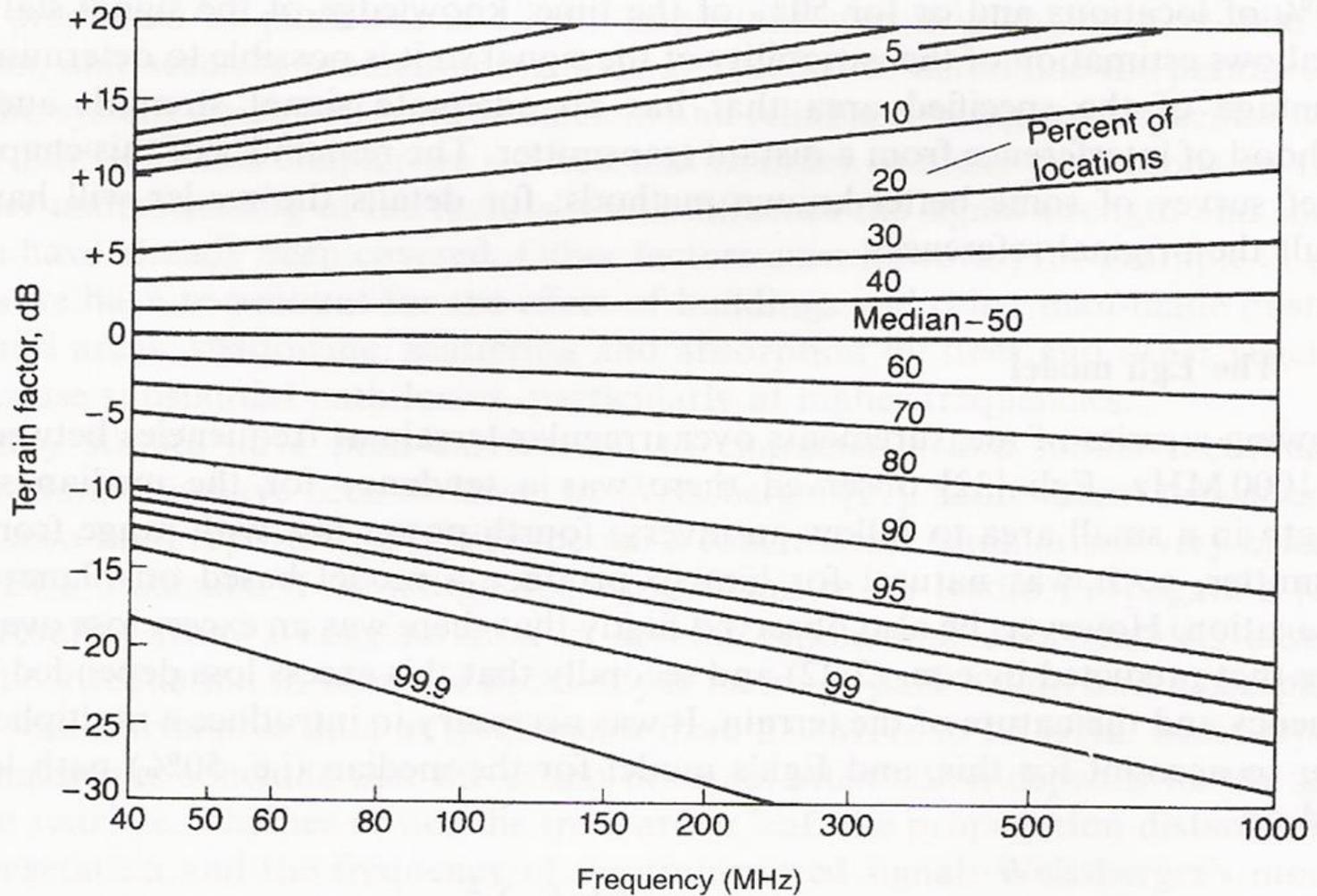
$$\beta = \left(\frac{40}{f} \right)^2$$

(f σε MHz)

Μοντέλα εξασθένησης το μοντέλο του Egli

- Στην πράξη το β είναι συνάρτηση της ανωμαλίας του εδάφους, με *median* τιμή $(40/f)^2$, όπου f σε *MHz*.
- Συσχέτισε μετά την τυπική απόκλιση του β με αυτή των διακυμάνσεων του εδάφους θεωρώντας ότι το ύψος του εδάφους ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή (*lognormal distribution*) γύρω από τη μεσαία τιμή του (έτσι εισήγαγε τη λογαριθμοκανονική κατανομή στη μεσαία τιμή του σήματος την οποία θα τη δούμε σε πολλά μεταγενέστερα μοντέλα):

Μοντέλα εξασθένησης το μοντέλο του Egli



The terrain factor for base-to-mobile propagation (after Egli).

Μοντέλα εξασθένησης τοπογραφικά μοντέλα

- Τα τοπογραφικά μοντέλα χρησιμοποιούν τοπογραφικές βάσεις δεδομένων που δίνουν το ύψος του εδάφους σε κάποια σημεία αναφοράς.

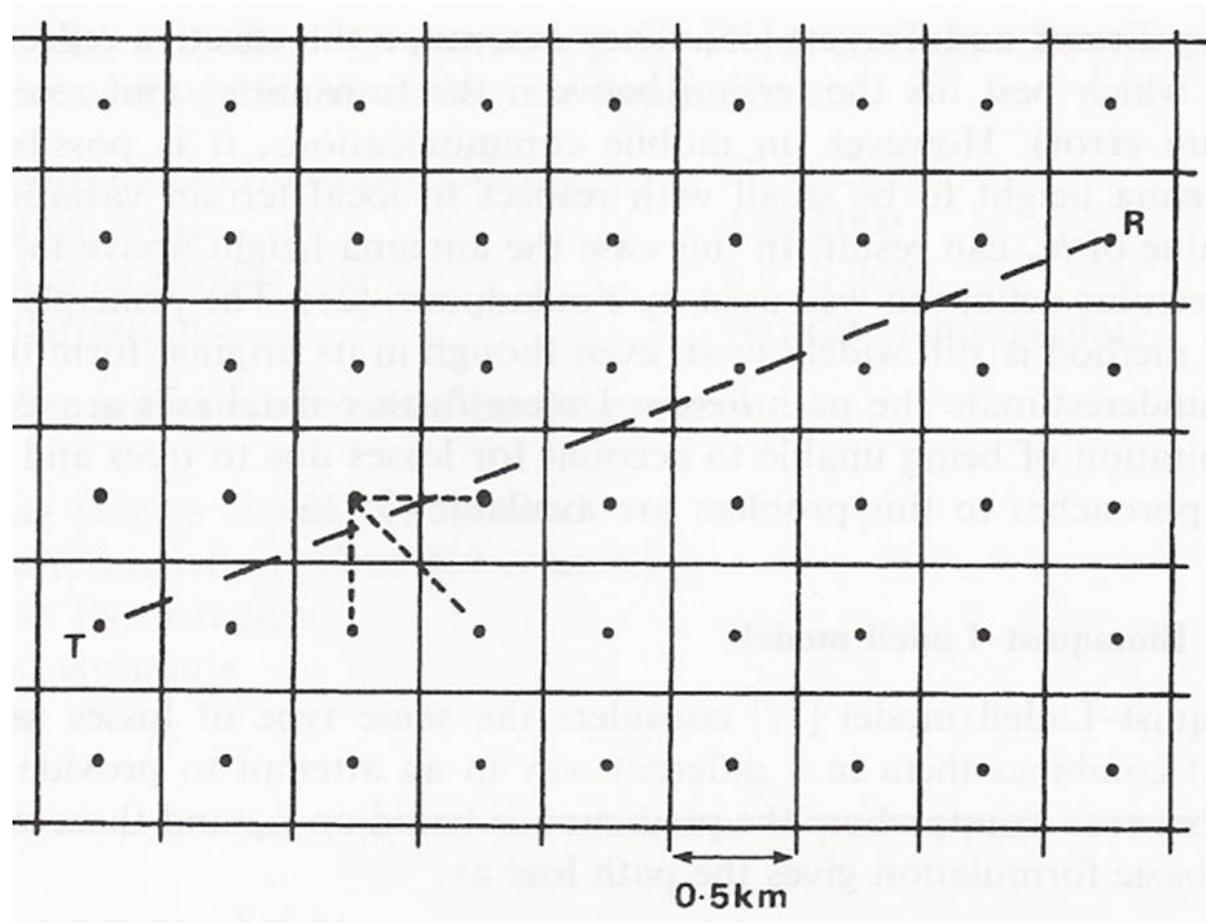
Τα τελευταία χρόνια όλο και πιο ακριβείς τοπογραφικές βάσεις δεδομένων παράγονται (και παρέχονται σε λογικές τιμές) αυξάνοντας έτσι κατά πολύ και την ακρίβεια αυτών των μοντέλων.

Γεωγραφικές βάσεις δεδομένων από δορυφόρο, αεροφωτογραφίες και με laser.

Μοντέλα εξασθένισης τοπογραφικά μοντέλο

- Όπως π.χ. το μοντέλο της JRC (Joint Radio Committee, UK):

Χρησιμοποιεί βάσεις δεδομένων με το ύψος του εδάφους κάθε 0.5km . Με παρεμβολή (*interpolation*) από τα γειτονικά και διαγώνια διαθέσιμα ύψη υπολογίζεται το προφίλ του εδάφους ανάμεσα στον πομπό και το δέκτη.



Μοντέλα εξασθένησης τοπογραφικά μοντέλο

- Μετά εξετάζεται κατά πόσο υπάρχει οπτική επαφή και αν οι ζώνες Fresnel είναι αρκετά καθαρές από εμπόδια. Αν αυτά ισχύουν, η εξασθένηση δίνεται είτε από το **μοντέλο ελεύθερου χώρου (L_F)**, είτε από το **μοντέλο επίπεδης γης (L_P)**, ανάλογα πιο δίνει τη μεγαλύτερη τιμή:

$$L = \max(L_F, L_P)$$

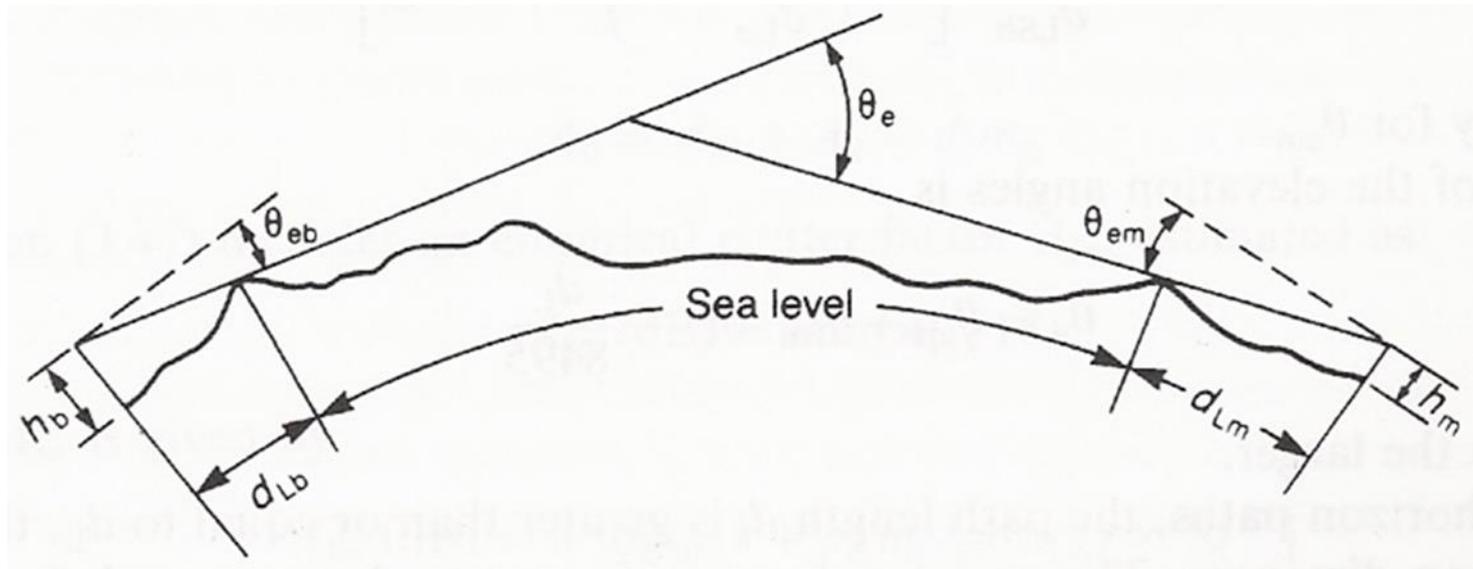
- Αν όχι, τότε προσθέτει και την **εξασθένηση περίθλασης (L_D)** της διαδρομής (με τη μέθοδο Epstein-Peterson ή Bullington):

$$L = \max(L_F, L_P) + L_D$$

- Οι εκτιμήσεις της εξασθένησης με αυτό το μοντέλο τείνουν να είναι χαμηλές.

Μοντέλα εξασθένησης τα μοντέλα Longley-Rice

- Τα μοντέλα Longley-Rice (ή *ITS irregular terrain model*) χρονολογούνται από το 1968 και εφαρμόζονται σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα από σημείο-σε-σημείο (*point to point communication systems*) στις συχνότητες 40MHz ως 100GHz, πάνω από διαφορετικά είδη μορφολογίας εδάφους.



Μοντέλα εξασθένησης τα μοντέλα Longley-Rice

- Η εξασθένηση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη γεωμετρία του προφίλ του εδάφους και τη διαθλασιμότητα (*refractivity*) της τροπόσφαιρας.
- Τεχνικές *γεωμετρικής οπτικής (geometric optics)* – και κυρίως το μοντέλο των δύο ακτινών με την ανάκλαση του εδάφους-χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν την ένταση του σήματος μέσα στον ραδιο-ορίζοντα.
- Η εξασθένηση περίθλασης από απομονωμένα εμπόδια εκτιμάται με τα μοντέλα αιχμής Fresnel-Kirchoff.
- Θεωρία σκεδάσεως χρησιμοποιείται για εκτιμήσεις της σκεδάσεως από την τροπόσφαιρα.

Μοντέλα εξασθένησης τα μοντέλα Longley-Rice

- Υπάρχει έτοιμο πρόγραμμα υπολογισμού της εξασθένησης σύμφωνα με το μοντέλο Longley-Rice, για τις συχνότητες 20MHz ως 10GHz.
- Παράμετροι εισόδου είναι:
 - Συχνότητα εκπομπής
 - Απόσταση κεραιών
 - Πόλωση
 - Ύψος κεραιών
 - Διαθλασιμότητα επιφάνειας
 - Ενεργός ακτίνα της γης
 - Αγωγιμότητα εδάφους
 - Διηλεκτρική σταθερά εδάφους
 - Κλιματολογικές συνθήκες

Μοντέλα εξασθένησης

- Υπάρχουν πολλά μοντέλα εξασθένησης και όλα προσπαθούν να προβλέψουν τη μέση ένταση του σήματος είτε σε συγκεκριμένο σημείο (point-to-point links) είτε σε μια μικρή περιοχή (base-to-mobile paths).
- Μερικά από αυτά τα μοντέλα υπάρχουν εδώ και πολλά χρόνια και έχουν αντέξει το τεστ του χρόνου, πιθανώς με κάποιες τροποποιήσεις.
- Τα μοντέλα διαφέρουν ευρέως μεταξύ τους στην προσέγγιση, την πολυπλοκότητα και την ακρίβεια. Συχνά η εφαρμογή διαφορετικών μοντέλων για το ίδιο πρόβλημα δίνει αποτελέσματα με μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους.
- *Όσο αφορά την ακρίβεια, καμία μέθοδος δεν είναι καλύτερη από όλες τις άλλες σε όλες τις περιπτώσεις.* Η εκλογή του κατάλληλου μοντέλου για το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι ένα βασικό βήμα για την εύρεση έγκυρων προβλέψεων.

Μοντέλα εξασθένησης

- *Συχνά πρέπει να βρεθεί μια ισορροπία ανάμεσα στην επιθυμητή ακρίβεια και την απλότητα και ευκολία της εφαρμογής.*
- Συνήθως τα μοντέλα αυτά είναι ένα μίγμα εμπειρίας και εφαρμογής της θεωρίας διάδοσης. Η εμπειρική προσέγγιση βασίζεται στην προσαρμογή καμπυλών ή αναλυτικών εκφράσεων σε μεγάλο αριθμό μετρήσεων και έχει το πλεονέκτημα ότι έτσι λαμβάνονται υπόψη όλοι οι παράγοντες, γνωστοί και άγνωστοι.