



Πανεπιστήμιο Αιγαίου

Κινητές και Δορυφορικές Επικοινωνίες

Μοντέλα Απωλειών Διάδοσης στα
Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών

Δημοσθένης Βουγιούκας (dnougiou@aegean.gr)

Αναπληρωτής Καθηγητής

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών & Επικοινωνιακών Συστημάτων



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Δομή της Διάλεξης

- ◆ Ανάκλαση από Σφαιρική Επιφάνεια
- ◆ Ανάκλαση και Σκέδαση από Τραχιά Επιφάνεια
- ◆ Αρχή του Huygens - Περίθλαση σε Αιχμή
- ◆ Ελλειψοειδή και Ζώνες Fresnel
- ◆ Knife Edge Diffraction
- ◆ Περίθλαση από Ευθεία Ακμή Πάνω από Επίπεδο Έδαφος - σε Εμπόδιο Πεπερασμένου Εύρους - από Στρογγυλεμένο Εμπόδιο - Περίθλαση από Πολλαπλές Ευθείες Ακμές
- ◆ Μοντέλα Απωλειών Διάδοσης
- ◆ Εμπειρικά Εξωτερικών Χώρων
- ◆ Ημι-Εμπειρικά Εξωτερικών Χώρων
- ◆ Μοντέλα Βασισμένα σε Ιδεώδεις Δομές
- ◆ Αναλυτικά Εξωτερικών Χώρων
- ◆ Εμπειρικά Εσωτερικών Χώρων

Μηχανισμοί Διάδοσης

◆ Ανάκλαση (Reflection)

- Η/Μ κύματα προσκρούουν σε λείες επιφάνειες με πολύ μεγάλες διαστάσεις ως προς το μήκος κύματος του RF σήματος.

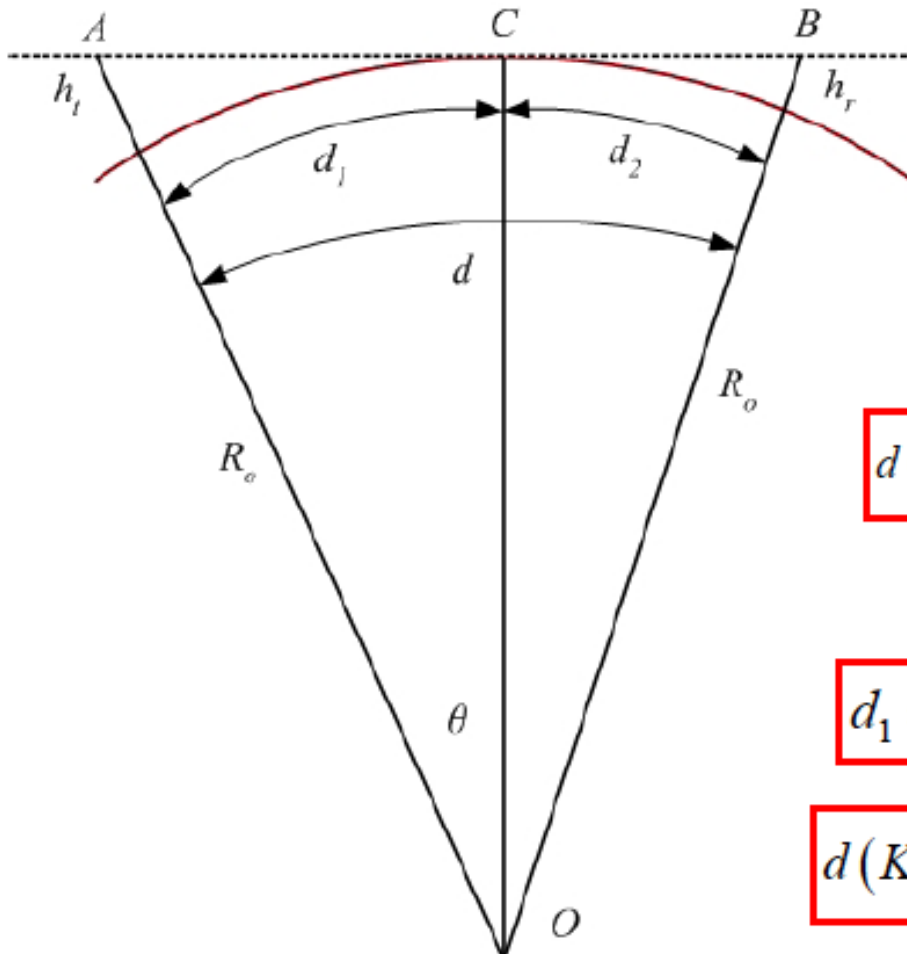
◆ Περίθλαση (Diffraction)

- Καμπύλωση ραδιοκυμάτων γύρω από φυσικά ή τεχνητά εμπόδια, λόγω εμφάνισης δευτερευόντων κυμάτων σύμφωνα με την αρχή του Huygens. Πολλές φορές καλείται και σκίαση.

◆ Σκέδαση (Scattering)

- Πρόσκρουση Η/Μ κυμάτων σε μεγάλη τραχιά επιφάνεια ή σε επιφάνεια με διαστάσεις συγκρίσιμες του μήκους κύματος και διασκορπισμός της ενέργειας σε όλες τις κατευθύνσεις.

Ανάκλαση από Σφαιρική Επιφάνεια (Γη)



Οπτικός Ορίζοντας

$$d_1 = \theta R_o \cong \sqrt{2h_t R_o}$$

$$R_o \approx 6370 \text{ Km}$$

$$d (\text{Km}) = 3.57 \left(\sqrt{h_t (\text{m})} + \sqrt{h_r (\text{m})} \right)$$

Ράδιο Ορίζοντας

$$d_1 \approx \sqrt{2h_t R_e}$$

$$R_e \approx 8490 \text{ Km}$$

$$d (\text{Km}) = 4.12 \left(\sqrt{h_t (\text{m})} + \sqrt{h_r (\text{m})} \right)$$

Διάδοση *Line-Of-Sight* (LOS)

- ◆ Οπτικός ορίζοντας

$$d(km) = 3.57\sqrt{h}$$

- ◆ Πραγματικός ορίζοντας ή ραδιο-ορίζοντας

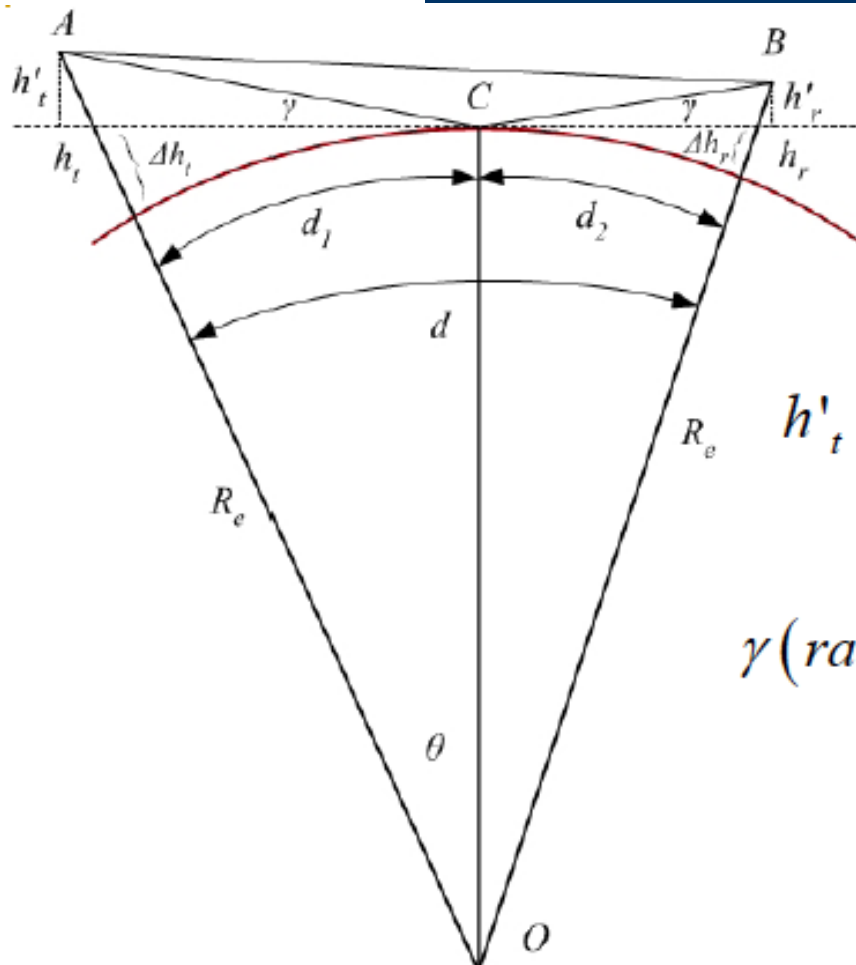
$$d(km) = 3.57\sqrt{Kh}$$

- d = απόσταση μεταξύ κεραίας και ορίζοντα (km)
- h = ύψος κεραίας (m)
- K = ρυθμιστικός παράγοντας για να ληφθεί υπόψη η διάθλαση ($K = 4/3$)
- ◆ Μέγιστη απόσταση μεταξύ των δύο κεραιών για LOS διάδοση:

$$d(km) = 3.57\left(\sqrt{Kh_1} + \sqrt{Kh_2}\right) = 4.12\left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}\right)$$

- h_1 = ύψος κεραίας ένα
- h_2 = ύψος κεραίας δύο

Ανάκλαση από Σφαιρική Επιφάνεια (Γη)



$$\Delta h_t = h_t - h'_t$$

$$\Delta h_r = h_r - h'_r$$

$$h'_t = h_t - \frac{d_1^2}{R_e} \quad h'_r = h_r - \frac{d_2^2}{R_e}$$

$$\gamma(\text{rad}) = \frac{h'_t}{d_1} = \frac{h'_r}{d_2} \Rightarrow \frac{h'_t}{h'_r} = \frac{d_1}{d_2}$$

$$d = d_1 + d_2$$

Ανάκλαση από Σφαιρική Επιφάνεια (Γη)

Συνδυάζοντας τις 4 εξισώσεις

$$2d_1^3 - 3dd_1^2 + [d^2 - 2R_e(h_t + h_r)]d_1 + 2R_e h_t d = 0$$

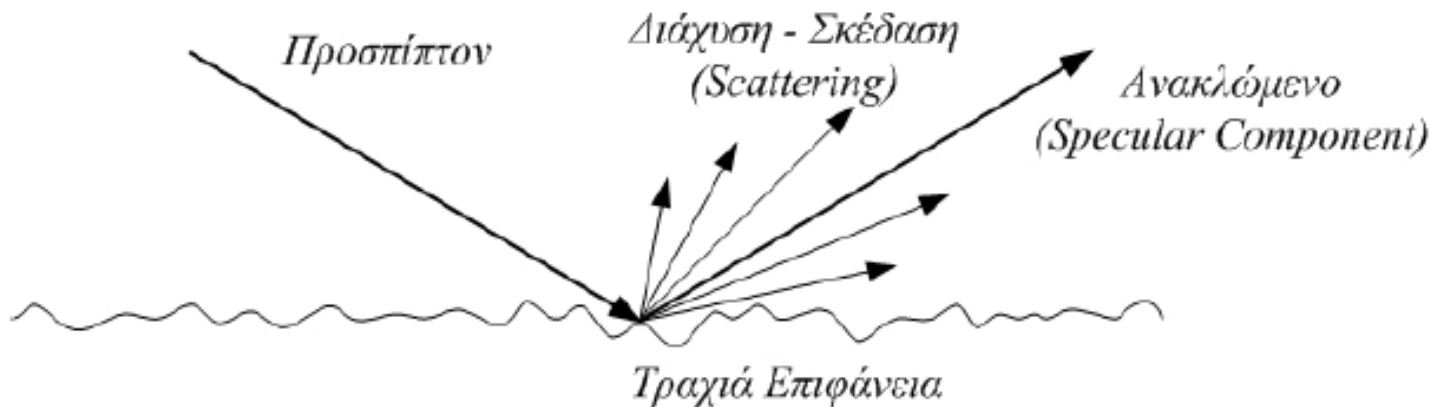
Επιλέγουμε τη λύση που είναι κοντά στην προσεγγιστική λύση που δίνεται από την ανάκλαση σε επίπεδη γη

$$d_1 \approx \frac{d}{1 + \frac{h_r}{h_t}} \quad d_2 \approx \frac{d}{1 + \frac{h_t}{h_r}}$$

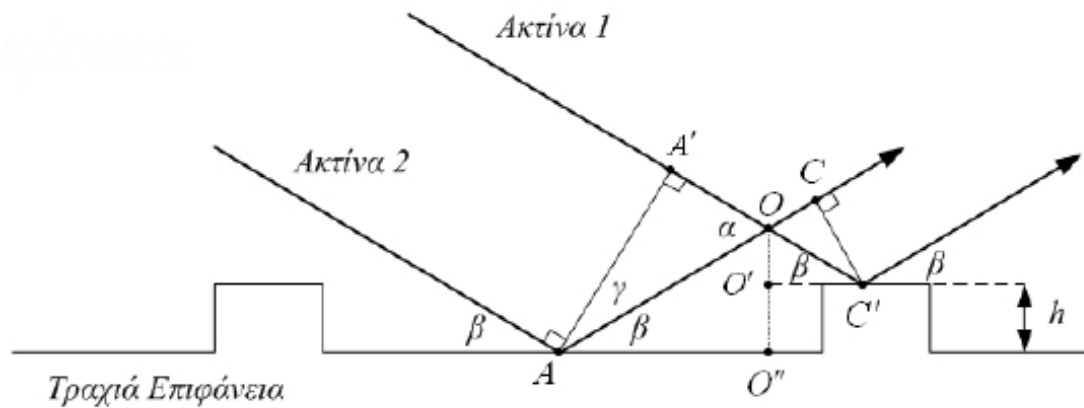
Στη συνέχεια υπολογίζουμε τα h'_t, h'_r

Ανάκλαση και Σκέδαση από Τραχιά Επιφάνεια

- ◆ Αποτέλεσμα της τραχύτητας της επιφάνειας είναι η διάχυση της ανάκλασης σε πολλές κατευθύνσεις ή όπως αποκαλείται *σκέδαση*



Ανάκλαση και Σκέδαση από Τραχιά Επιφάνεια



$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l = \frac{2\pi}{\lambda} 2h \sin \beta = \frac{4\pi h \sin \beta}{\lambda}$$

- ♦ Όταν αυξάνεται η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο ακτίνων εξασθενεί το ανακλώμενο πεδίο στην καθορισμένη κατεύθυνση. Όταν οι δύο ακτίνες έχουν αντίθετη φάση, τότε το συνολικό ανακλώμενο πεδίο τείνει να μηδενιστεί.

Ανάκλαση και Σκέδαση από Τραχιιά Επιφάνεια

- ◆ Κριτήριο Rayleigh

$$\Delta\phi \leq \frac{\pi}{2} \Rightarrow \frac{4\pi h \sin \beta}{\lambda} \leq \frac{\pi}{2}$$
$$\Rightarrow h \sin \beta \leq \frac{\lambda}{8}$$

- ◆ Σε περιπτώσεις, όπως στις κινητές επικοινωνίες, όπου η πρόσπτωση είναι σχεδόν εφαπτομενική, δηλαδή η γωνία β είναι πολύ μικρή, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την προσέγγιση ($\sin\beta \approx \beta$).

$$h\beta \leq \frac{\lambda}{8}$$

Ανάκλαση και Σκέδαση από Τραχιά Επιφάνεια

- ♦ Η τυχαιότητα του ύψους των ανωμαλιών του πραγματικού εδάφους αντιμετωπίζεται συνήθως θεωρώντας κατανομή Gauss.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi\sigma_h \sin \beta}{\lambda} \simeq \frac{4\pi\sigma_h \beta}{\lambda}$$

- ♦ Η επιφάνεια θεωρείται λεία αν ($\Delta\phi < 0.1$)
- ♦ Έχουμε διακεχυμένη ανάκλαση και το ανακλώμενο πεδίο στην κατεύθυνση β αγνοείται αν ($\Delta\phi > 10$)

Συντελεστής Σκέδασης

- ◆ Η προσπίπτουσα ενέργεια σε μια τραχιά επιφάνεια μπορεί να μοντελοποιηθεί μετά την πρόσπτωση, αποτελούμενη από **δύο συνιστώσες**. Εκείνη που αντιστοιχεί στην ανάκλαση προς τη σαφώς καθορισμένη κατεύθυνση και εκείνη στη διακεχυμένη ανάκλαση (σκέδαση).
- ◆ Η επίδραση της τραχύτητας στο συντελεστή ανάκλασης είναι: $R_{spec} = R\rho_{scat} \quad |\rho_{scat}| \leq 1$
- ◆ Όπου ρ_{scat} ο συντελεστής σκέδασης, ο λόγος του πεδίου στη σαφώς καθορισμένη κατεύθυνση προς το ανακλώμενο πεδίο στην ίδια κατεύθυνση για την περίπτωση που η επιφάνεια ήταν λεία.

Συντελεστής Σκέδασης

- ◆ Το ανακλώμενο πεδίο από την τραχιά επιφάνεια είναι τυχαία μεταβλητή λόγω της κατανομής που έχουμε υποθέσει για το ύψος των ανωμαλιών της επιφάνειας και το ίδιο ισχύει και το συντελεστή σκέδασης.

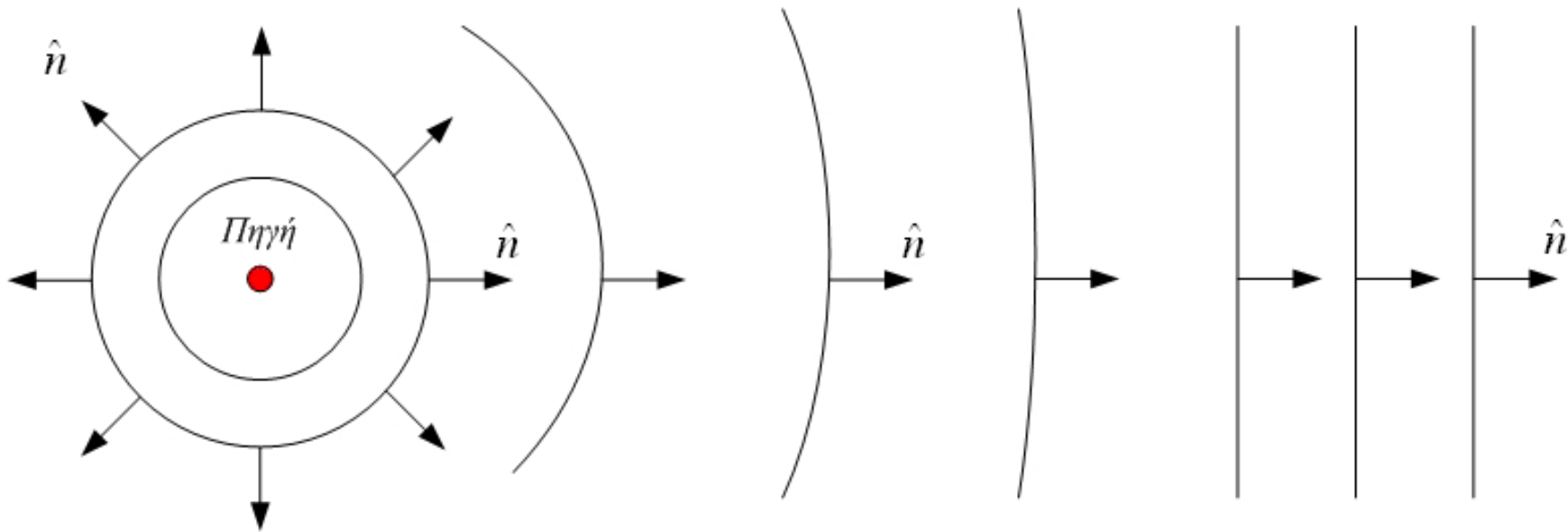
$$\left(R_{spec} \right)_{rms} = \left(\rho_{scat} \right)_{rms} R$$

$$\left(\rho_{scat} \right)_{rms}^2 = \left\langle \left| \rho_{scat} \right|^2 \right\rangle = e^{-(\Delta\phi)^2}$$

- ◆ Ο συντελεστής ανάκλασης για τη σαφώς καθορισμένη κατεύθυνση είναι τυχαία μεταβλητή και ακολουθεί κατανομή η οποία εξαρτάται από την τυπική απόκλιση.

Κυματικά Μέτωπα

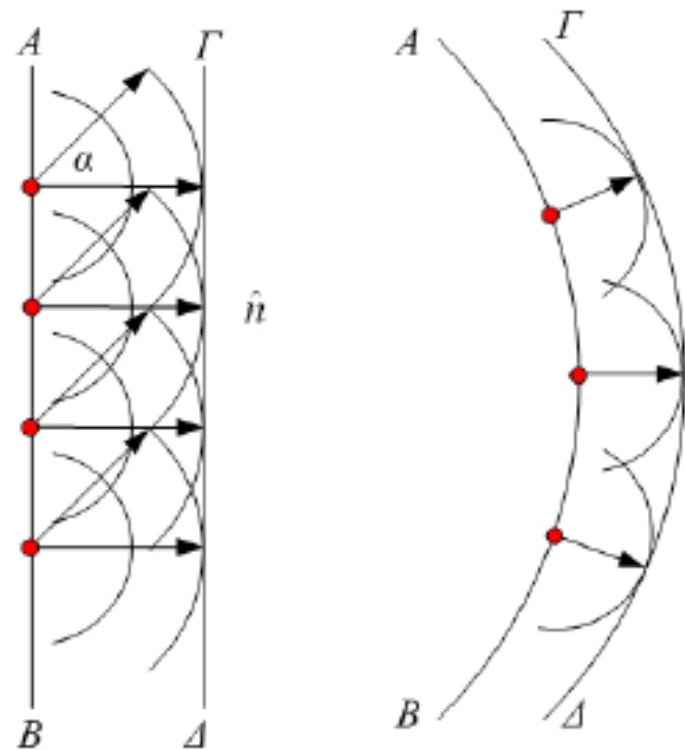
Ισοφασικές Επιφάνειες = Κυματικά Μέτωπα



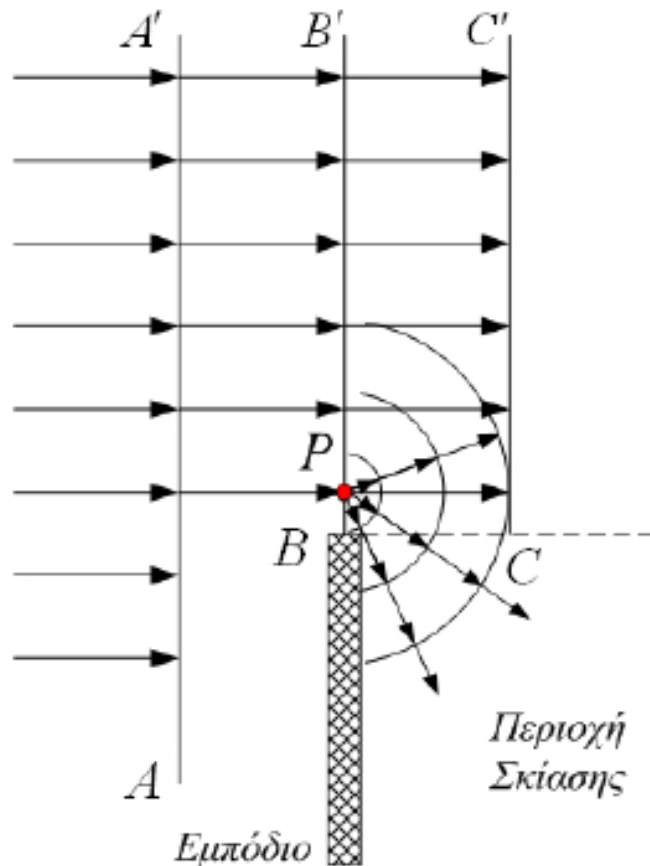
- ◆ Σε μεγάλες αποστάσεις από τη σημειακή πηγή το σφαιρικό κυματικό μέτωπο τείνει να γίνει επίπεδο

Αρχή του Huygens

- ◆ Κάθε σημείο σε ένα προτεύον κυματικό μέτωπο αποτελεί πηγή δευτερευόντων σφαιρικών κυματικών μετώπων και αυτά τα δευτερεύοντα κυματικά μέτωπα συνδυάζονται και παράγουν ένα νέο επίπεδο κυματικό μέτωπο στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος.



Περίθλαση σε Αιχμή

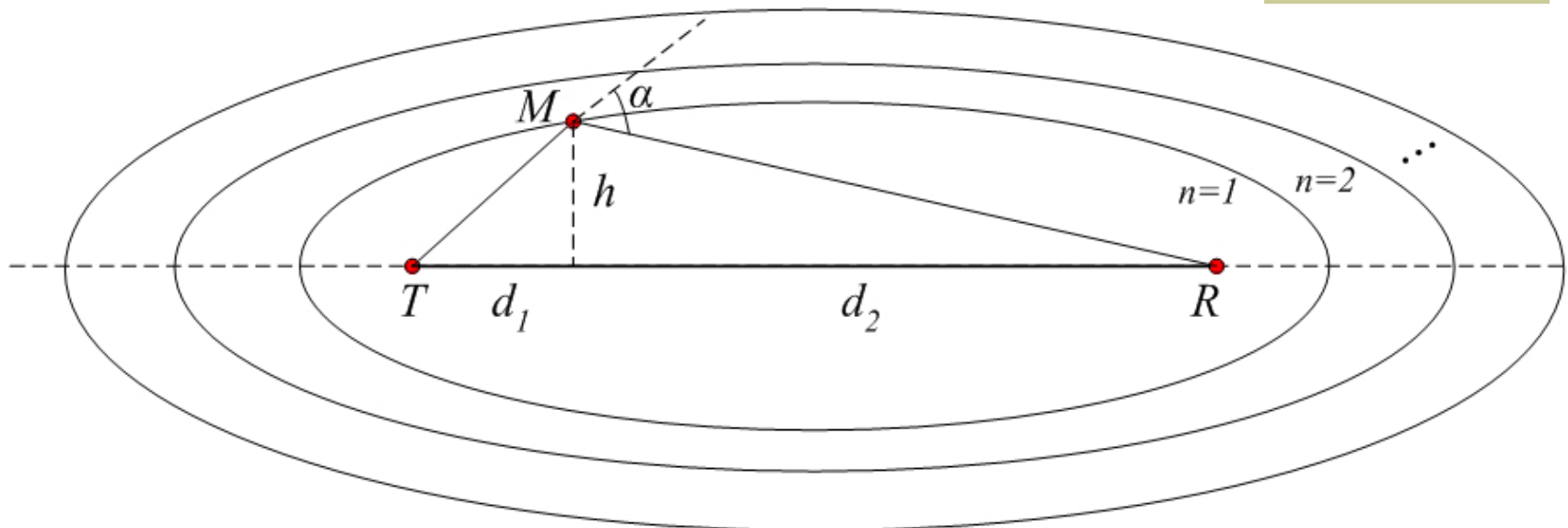


Τα κυλινδρικά κύματα που εκπέμπονται από τις δευτερεύουσες πηγές του κυματικού μετώπου BB' , θα εισέλθουν στη σκιασμένη περιοχή και το πεδίο σε κάθε σημείο αυτής της περιοχής θα προκύψει ως υπέρθεση των κυλινδρικών αυτών κυμάτων. Η **καμπύλωση** των ραδιοκυμάτων γύρω από την αιχμή του εμποδίου η οποία και καλείται **περίθλαση**.

Περίθλαση σε Αιχμή

- ◆ Σε υψηλές συχνότητες το φαινόμενο της περίθλασης όπως και της ανάκλασης και της διάθλασης, είναι **τοπικό** και εξαρτάται από:
 - τη γεωμετρία του αντικειμένου στο σημείο της περίθλασης (π.χ. σφήνα, ακμή, καμπύλη επιφάνεια, κλπ.)
 - το πλάτος, τη φάση και την πόλωση του προσπίπτοντος πεδίου στο σημείο της περίθλασης.

Ελλειψοειδή και Ζώνες Fresnel



Ελλειψοειδή εκ περιστροφής γύρω από την ευθεία που συνδέει πομπό και δέκτη.

Θεωρούμε ότι:

$$TM + MR = TR + n \frac{\lambda}{2}$$

Ελλειψοειδή και Ζώνες Fresnel

$$TR = d_1 + d_2$$

$$TM = \sqrt{d_1^2 + h^2} = d_1 \sqrt{1 + \frac{h^2}{d_1^2}} \approx d_1 + \frac{h^2}{2d_1} \quad (h \ll d_1)$$

$$MR = \sqrt{d_2^2 + h^2} = d_2 \sqrt{1 + \frac{h^2}{d_2^2}} \approx d_2 + \frac{h^2}{2d_2} \quad (h \ll d_2)$$

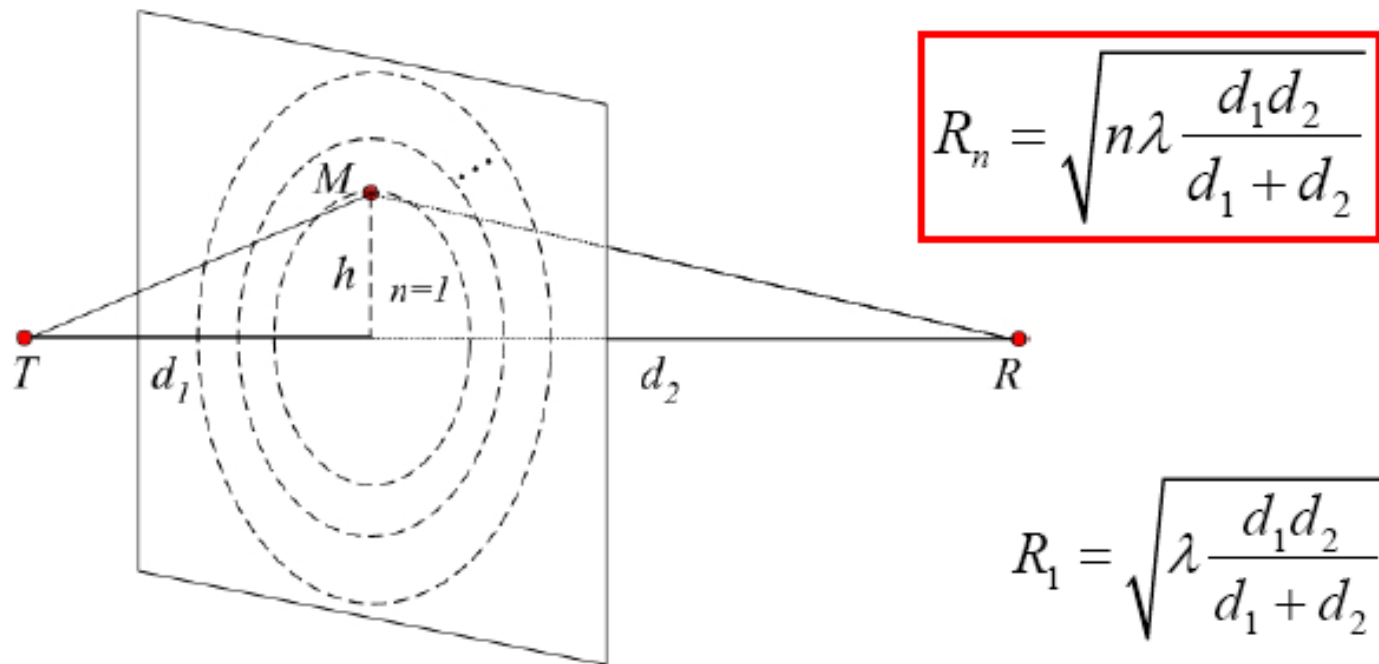
Διαφορά δρόμων

$$\Delta = n \frac{\lambda}{2}$$

Διαφορά φάσης

$$\phi = k\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} n \frac{\lambda}{2} = n\pi$$

Ελλειψοειδή και Ζώνες Fresnel



$$R_1 = \sqrt{\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

Συντελεστής Περίθλασης Fresnel-Kirchoff:

$$u = \sqrt{2} \frac{h}{R_1}$$

Ελλειψοειδή και Ζώνες Fresnel

- ◆ Γενικεύοντας τη θεώρηση της τομής των ελλειψοειδών Fresnel με οποιοδήποτε επίπεδο, προκύπτουν οι ζώνες *Fresnel*, οι οποίες ορίζονται ως η περιοχή μεταξύ δύο διαδοχικών καμπυλών που προκύπτουν από την τομή.
- ◆ Όταν $d_1 = d_2$

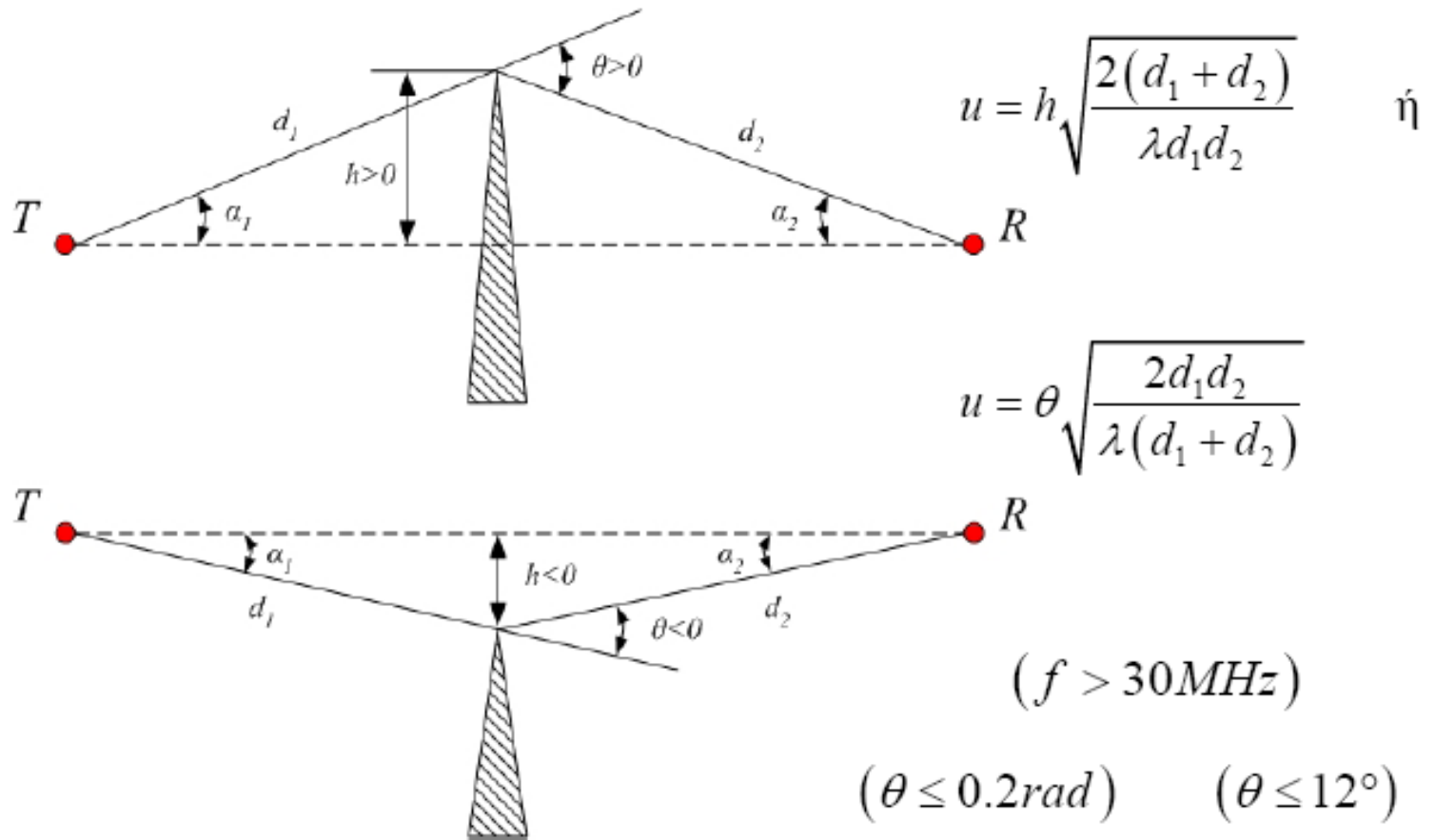
$$R_{n\max} = \sqrt{n\lambda \frac{d_1^2}{2d_1}} = \sqrt{\frac{n\lambda}{2} d_1} = \sqrt{\frac{n\lambda}{4} d}$$

$$d = 1\text{Km} \quad f = 900\text{MHz} \quad 2R_{1\max} = 18.3\text{m}$$

$$f = 1800\text{MHz} \quad 2R_{1\max} = 12.9\text{m}$$

$$f = 5700\text{MHz} \quad 2R_{1\max} = 7.25\text{m}$$

Knife-Edge Diffraction



Knife-Edge Diffraction

- ◆ Το περιθλώμενο από την ευθεία ακμή κύμα είναι κυλινδρικό.
- ◆ Το λαμβανόμενο μιγαδικό πεδίο στο δέκτη εκφρασμένο ως προς την τιμή του ελεύθερου χώρου, δηλαδή του λαμβανόμενου αν το εμπόδιο ήταν πολύ μακριά από την ευθεία οπτικής επαφής, δίνεται από τη σχέση

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

Knife-Edge Diffraction

- ◆ Μιγαδικό ολοκλήρωμα Fresnel

$$\int_u^{\infty} \exp\left(-j\frac{\pi}{2}t^2\right) dt = \int_u^{\infty} \cos\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt - j \int_u^{\infty} \sin\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt$$

$$\int_u^{\infty} \cos\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt = \frac{1}{2} - \int_0^u \cos\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt = \frac{1}{2} - C(u)$$

$$\int_u^{\infty} \sin\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt = \frac{1}{2} - \int_0^u \sin\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt = \frac{1}{2} - S(u)$$

$$F(u) = \int_0^u \exp\left(-j\frac{\pi}{2}t^2\right) dt = C(u) - jS(u)$$

Knife-Edge Diffraction

$$\begin{aligned}\frac{E}{E_o} &= \frac{(1+j)}{2} \left\{ \left[\frac{1}{2} - C(u) \right] - j \left[\frac{1}{2} - S(u) \right] \right\} \\ &= \frac{(1+j)}{2} \left[\frac{1}{2}(1-j) - C(u) - jS(u) \right] \\ &= \frac{1}{2} [1 - (1+j)F(u)]\end{aligned}$$

$$L_{k.e.} = \left| \frac{E_o}{E} \right|^2 = \frac{4}{|1 - (1+j)F(u)|^2} = \frac{4}{\left| 1 - (1+j)F\left(\sqrt{2} \frac{h}{R_1}\right) \right|^2}$$

Knife-Edge Diffraction

Για $(u \geq -0.7)$ σύμφωνα με τη σύσταση ITU-R P.526

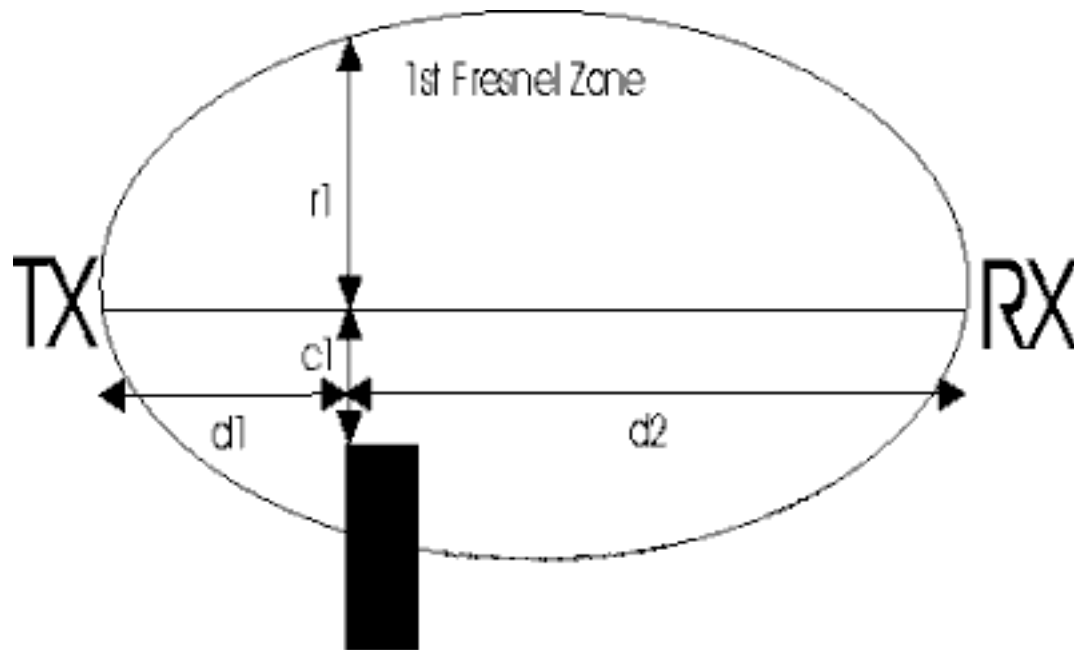
$$L_{k.e.} (dB) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(u - 0.1)^2 + 1} + u - 0.1 \right)$$

Για $(u = 0)$ ή $(h = R_1)$

$$F(0) = 0 \quad E = \frac{E_o}{2} \quad \text{Απώλειες 6dB}$$

Πρακτικός Κανόνας: Για μηδενικές απώλειες λόγω περίθλασης κράτα «καθαρό» χωρίς εμπόδια το 56% της 1ης Ζώνης Fresnel ($u \approx -0.8$)

Knife-Edge Diffraction



Nasty obstacle must be more than 60% from the center line of TX to RX ($c1 \Rightarrow r1 \times 0.6$)

Πρακτικός Κανόνας: Για μηδενικές απώλειες λόγω περίθλασης κράτα «καθαρό» χωρίς εμπόδια το 60% της 1ης Ζώνης Fresnel ($u \approx -0.8$)

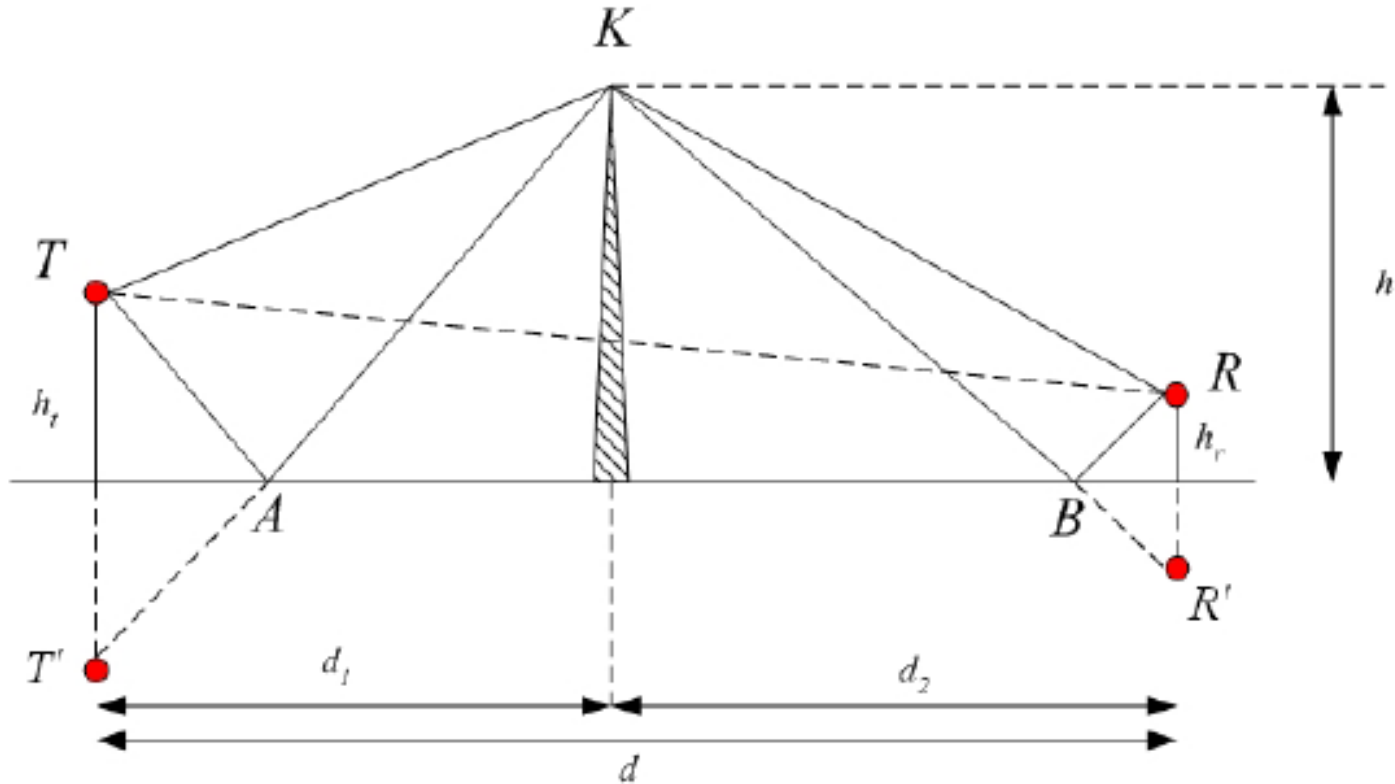
Knife-Edge Diffraction

- ◆ Στο MATLAB ο υπολογισμός της συνάρτησης $F(u)$ μπορεί να γίνει ως εξής:

```
y = mfun('FresnelC',u);  
z = mfun('FresnelS',u);  
F=y-j*z;
```

- ◆ Η `mfun(function)` ανήκει στο Symbolic Math Toolbox. Δώστε `help mfunlist` για να δείτε και άλλες ειδικές συναρτήσεις που μπορούν να υλοποιηθούν στο MATLAB.

Περίθλαση από Ευθεία Ακμή Πάνω από Επίπεδο Έδαφος



Περίθλαση από Ευθεία Ακμή Πάνω από Επίπεδο Έδαφος

$$E_{total} = \sum_{n=1}^4 E_{on} F_n$$

E_{o1} το πεδίο για το μονοπάτι TR

E_{o2} το πεδίο για το μονοπάτι $T'R$

E_{o3} το πεδίο για το μονοπάτι TR'

E_{o4} το πεδίο για το μονοπάτι $T'R'$

$$E_{on} \sim \frac{e^{-jk r_n}}{r_n} \quad n = 1, \dots, 4$$

$$\begin{aligned} E_{total} &= E_{o1} F_1 + E_{o2} F_2 + E_{o3} F_3 + E_{o4} F_4 \\ &= E_{o1} \frac{E_{d1}}{E_{o1}} + E_{o2} \frac{E_{d2}}{E_{o2}} + E_{o3} \frac{E_{d3}}{E_{o3}} + E_{o4} \frac{E_{d4}}{E_{o4}} \end{aligned}$$

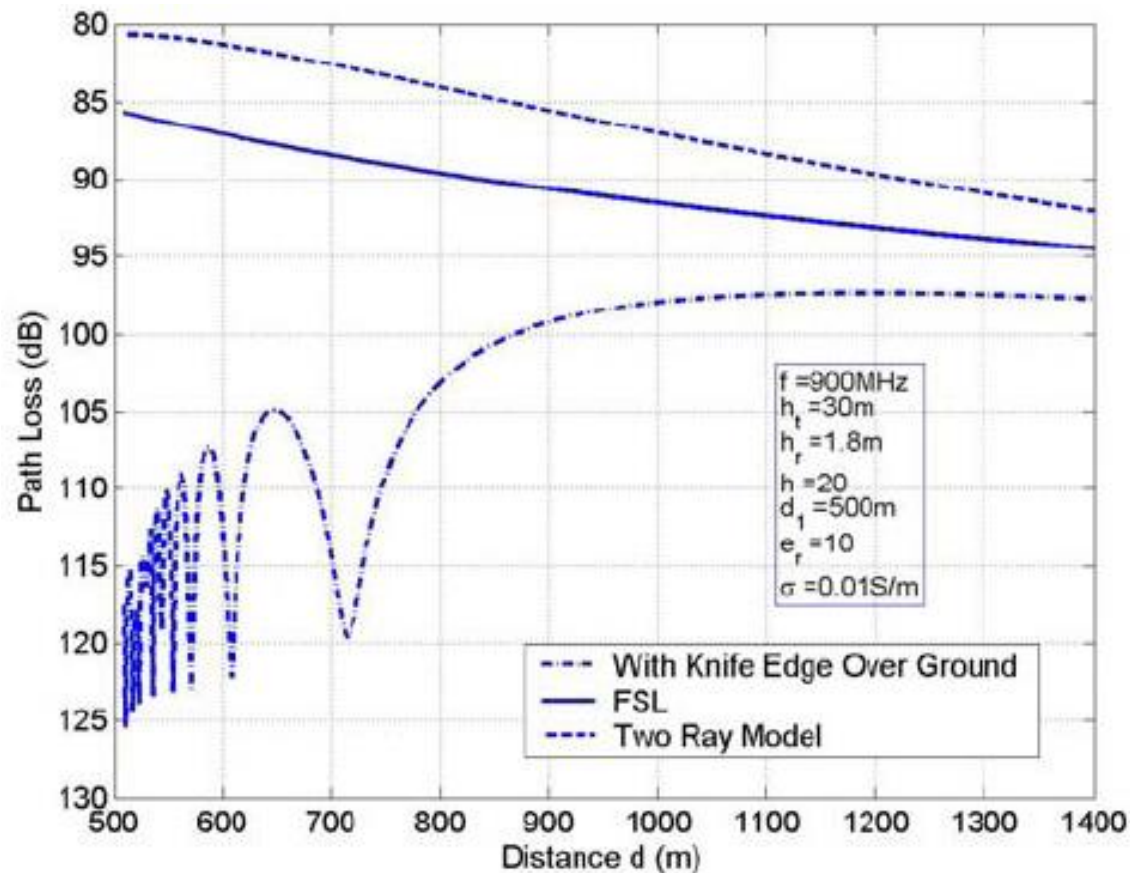
Περίθλαση από Ευθεία Ακμή Πάνω από Επίπεδο Έδαφος

$$F_n = \frac{1}{2} \left[1 - (1 + j) F \left(\sqrt{2} \frac{h_n}{R_1} \right) \right] \Gamma_n$$

$$L_{k.e.f.e.} (dB) = 20 \log \left| \frac{E_{o1}}{E_{total}} \right| = -20 \log \left| \frac{E_{total}}{E_{o1}} \right|$$

Περίπτωση	Θέση Πομπού	Θέση Δέκτη	Απόσταση Ελεύθερου Χώρου, r_n	Ύψος h_n	Συντελεστής Ανάκλασης
1	T	R	$TR = \sqrt{d^2 + (h_t - h_r)^2}$	$h_1 = h - \frac{h_t d_2 + h_r d_1}{d}$	1
2	T'	R	$T'R = \sqrt{d^2 + (h_t + h_r)^2}$	$h_2 = h + \frac{h_t d_2 - h_r d_1}{d}$	Γ_A
3	T	R'	$TR' = T'R$	$h_3 = h - \frac{h_t d_2 - h_r d_1}{d}$	Γ_B
4	T'	R'	$T'R' = TR$	$h_4 = h + \frac{h_t d_2 + h_r d_1}{d}$	$\Gamma_A \Gamma_B$

Περίθλαση από Ευθεία Ακμή Πάνω από Επίπεδο Έδαφος

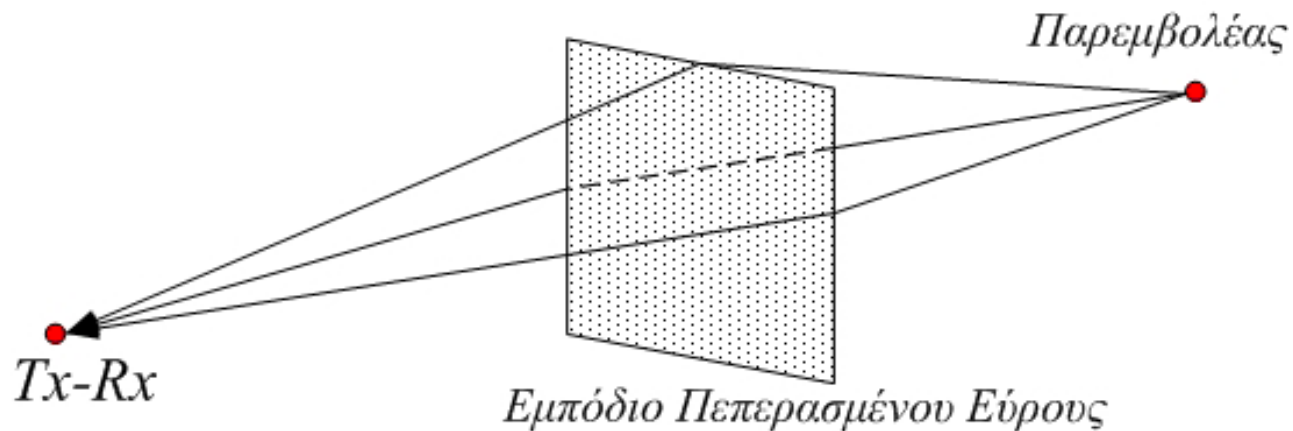


Περίθλαση από Ευθεία Ακμή Πάνω από Επίπεδο Έδαφος

- ◆ Προσέγγιση του Lee:

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

Περίθλαση σε Εμπόδιο Πεπερασμένου Εύρους



Βήμα 1^ο: Υπολογισμός της γεωμετρικής παραμέτρου περίθλασης για κάθε μια από τις τρεις ακμές.

Βήμα 2^ο: Υπολογισμός του παράγοντα απωλειών, με βάση την προσεγγιστική σχέση

$$L_{k.e.} (dB) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(u - 0.1)^2 + 1} + u - 0.1 \right)$$

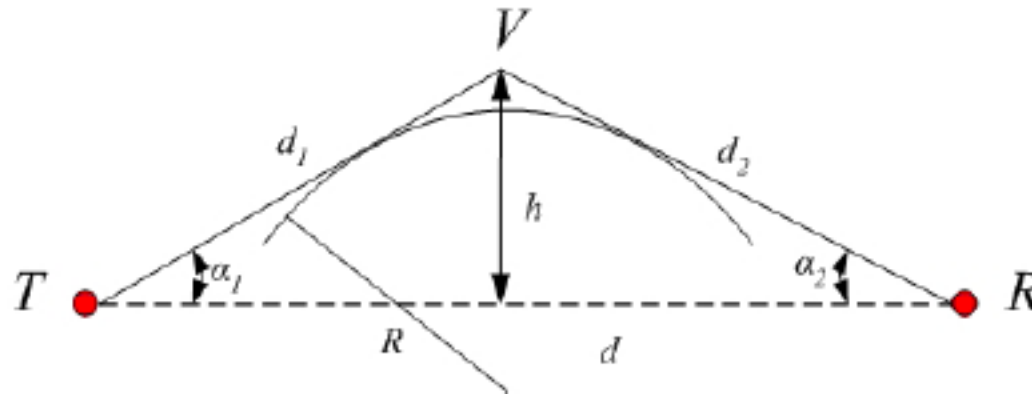
Περίθλαση σε Εμπόδιο Πεπερασμένου Εύρους

$$l_{k.e.}(u_i) = 10^{L_{k.e.}(u_i)/20}$$

- ◆ **Βήμα 3^ο:** Υπολογισμός της ελάχιστης τιμής
- ◆ **Βήμα 4^ο:** Υπολογισμός της μέσης τιμής

$$L_{av.}(dB) = -10 \log \left[\frac{1}{l_{k.e.}^2(u_1)} + \frac{1}{l_{k.e.}^2(u_2)} + \frac{1}{l_{k.e.}^2(u_3)} \right]$$

Περίθλαση από Στρογγυλεμένο Εμπόδιο



$$L_{r.o.} (dB) = L_{k.e.} (dB) + T(m,n)(dB)$$

$$L_{k.e.} (dB) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(u-0.1)^2 + 1} + u - 0.1 \right)$$

$$u = \sqrt{2} \frac{h}{R_1}$$

Περίθλαση από Στρογγυλεμένο Εμπόδιο

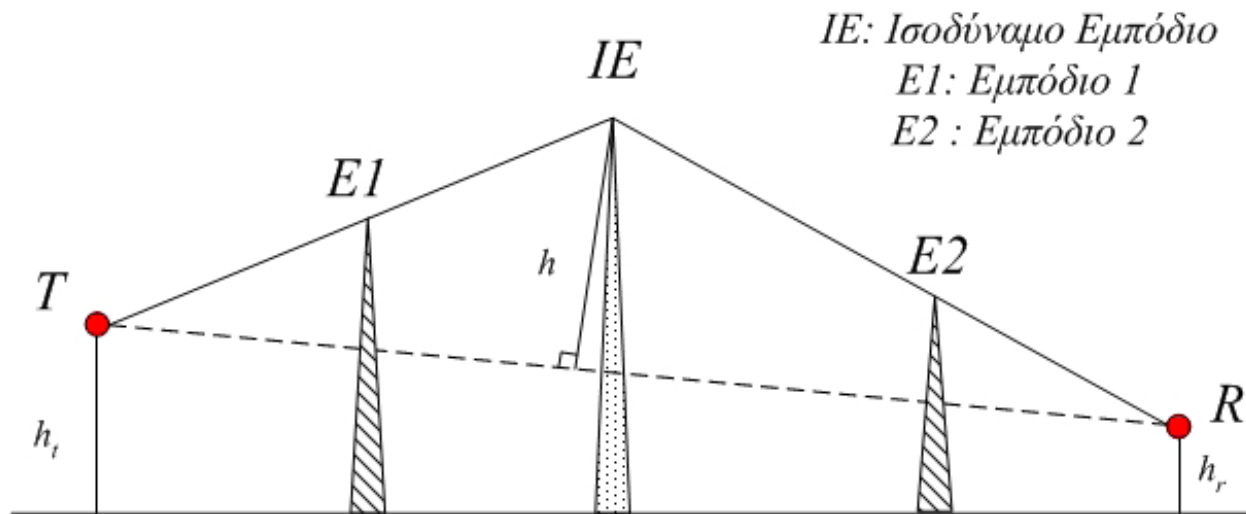
$$T(m, n) = km^b = (8.2 + 12n)m^{0.73 + 0.27[1 - \exp(-1.43n)]}$$

$$m = R \frac{\left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right)}{\left(\frac{\pi R}{\lambda} \right)^{1/3}}$$

$$n = h \frac{\left(\frac{\pi R}{\lambda} \right)^{2/3}}{R}$$

Περίθλαση από Πολλαπλές Ευθείες Ακμές

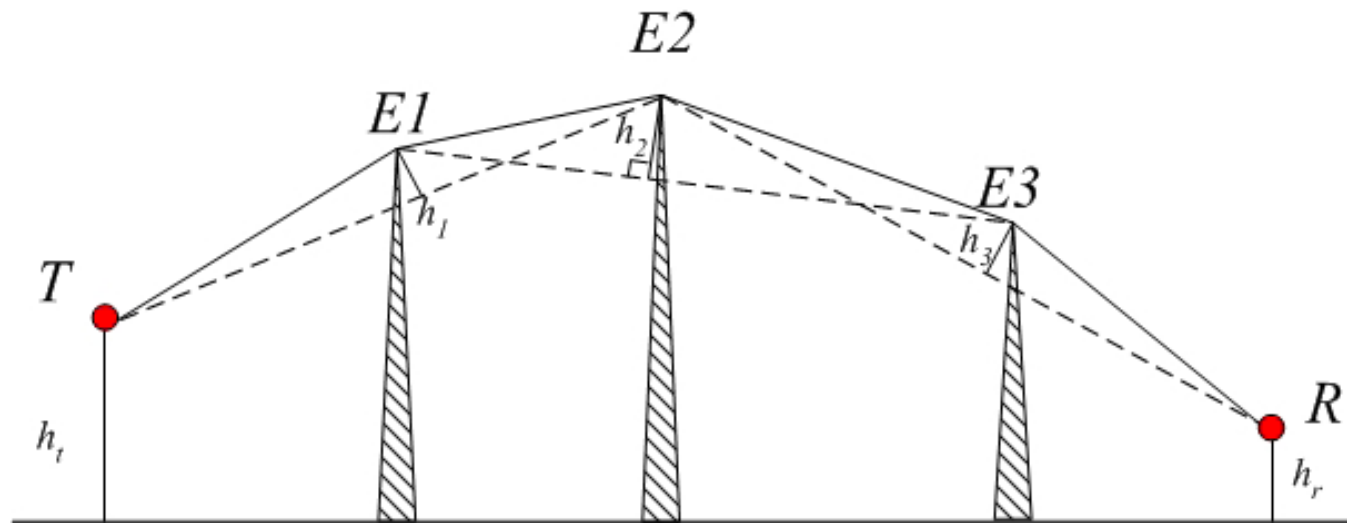
- ◆ Προσέγγιση Bullington



Αν προσδιοριστεί το ισοδύναμο εμπόδιο, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των απωλειών περίθλασης οι τύποι του μοντέλου περίθλασης από ευθεία ακμή.

Περίθλαση από Πολλαπλές Ευθείες Ακμές

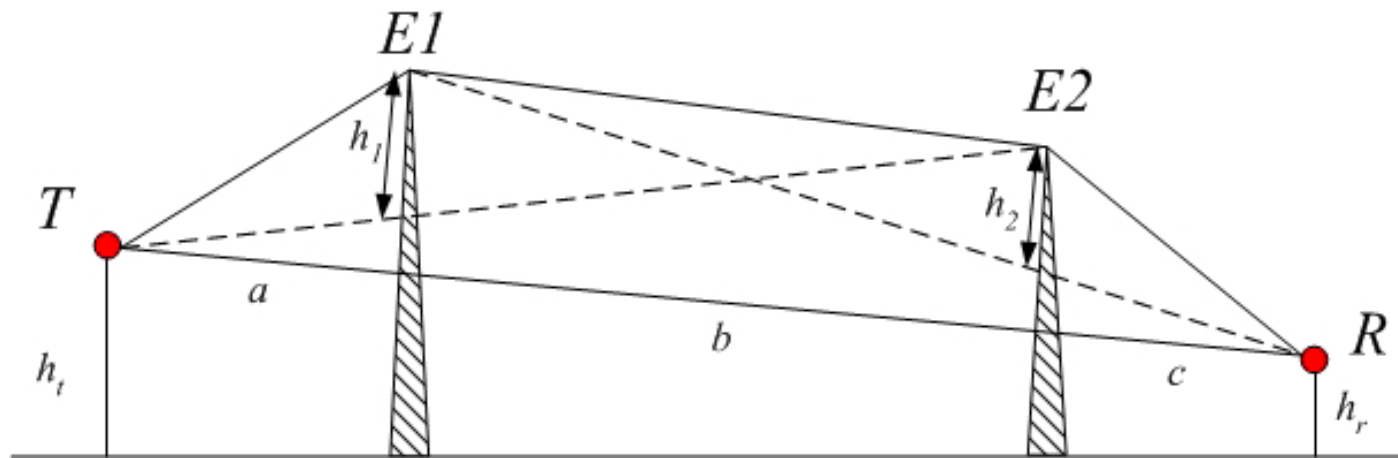
- ◆ Προσέγγιση Epstein-Peterson



Στην περίπτωση που τα εμπόδια είναι δύο, έχει αποδειχθεί από τον Millington ότι η προσέγγιση των Epstein-Peterson δεν είναι ικανοποιητική, αν τα δύο εμπόδια βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους.

Περίθλαση από Πολλαπλές Ευθείες Ακμές

- ◆ Διόρθωση Millington

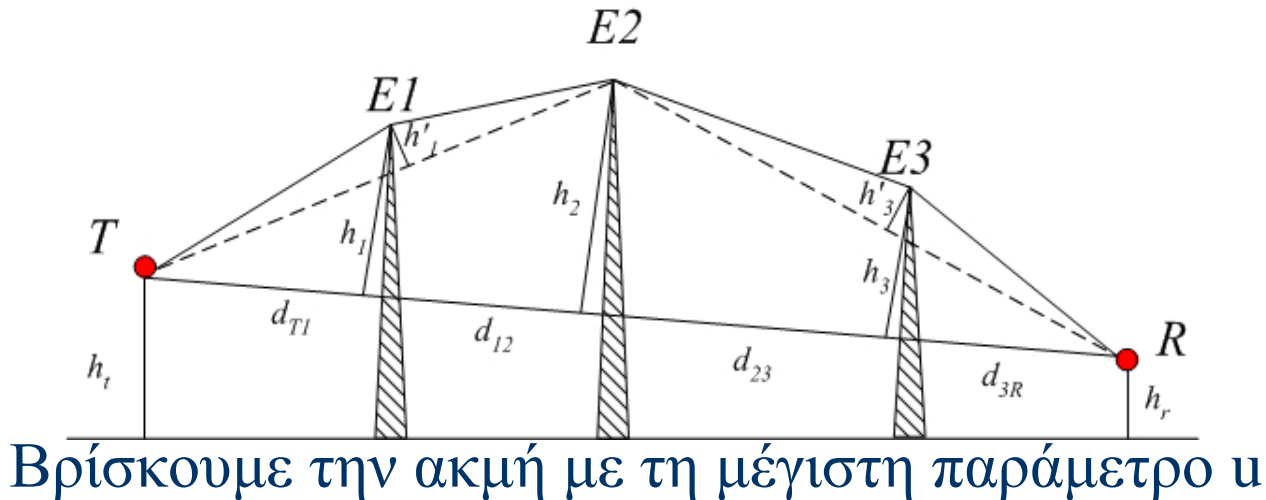


$$L_c(dB) = 10 \log \left[\frac{(a+b)(b+c)}{b(a+b+c)} \right]$$

$$L(dB) = L_{k.e.1}(dB) + L_{k.e.2}(dB) + L_c(dB)$$

Περίθλαση από Πολλαπλές Ευθείες Ακμές

- ◆ Προσέγγιση του Deygout ή Μέθοδος Κύριας Ακμής



$$u_n = h_n \sqrt{\frac{2(d_{n-1,n} + d_{n,n+1})}{\lambda d_{n-1,n} d_{n,n+1}}}$$

Περίθλαση από Πολλαπλές Ευθείες Ακμές

- ◆ Υπολογίζουμε τις απώλειες περίθλασης λόγω της κύριας ακμής (η E2 στο σχήμα)

$$L_{k.e.2}(d_{T1} + d_{12}, d_{23} + d_{3R}, h_2)$$

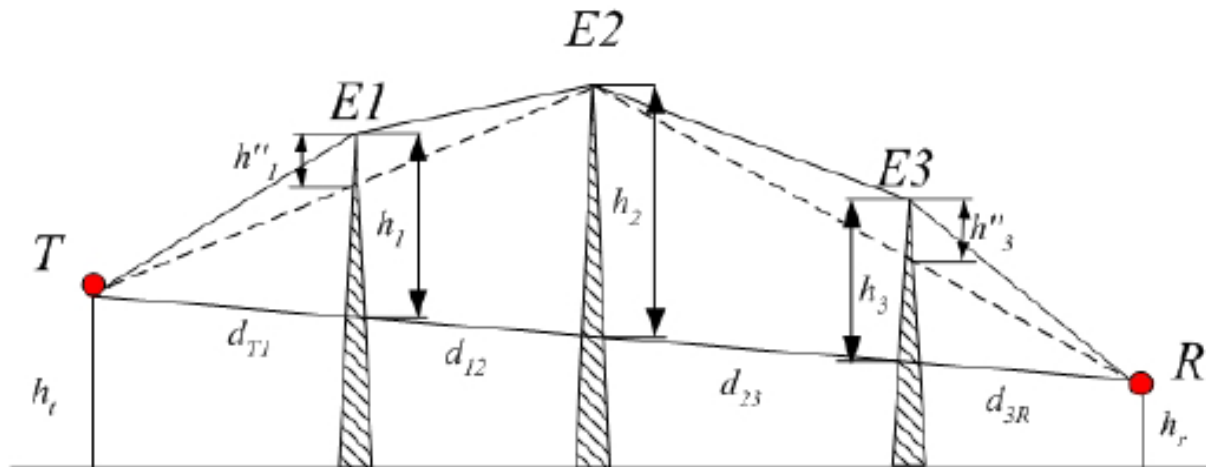
- ◆ Σε αυτές προσθέτουμε τις απώλειες που προκύπτουν από τις υπόλοιπες ακμές ως εξής

$$L_{k.e.1}(d_{T1}, d_{12}, h'_1) \quad L_{k.e.3}(d_{23}, d_{3R}, h'_3)$$

- ◆ Δηλαδή για όλες τις ακμές που προηγούνται της κύριας θέτουμε ως πομπό την προηγούμενη ακμή ή τον πομπό αν πρόκειται για την πρώτη ακμή και ως δέκτη θέτουμε την κύρια ακμή.

Περίθλαση από Πολλαπλές Ευθείες Ακμές

- ♦ Για όλες τις ακμές που έπονται της κύριας θεωρούμε ως πομπό πάλι την προηγούμενη ακμή και ως δέκτη τον πραγματικό δέκτη.
- ♦ Πολλές φορές χρησιμοποιούμε τα ύψη.



Μοντέλα Απωλειών Διάδοσης

- ◆ Τα περισσότερα μοντέλα διάδοσης των ραδιοσημάτων προσεγγίζουν το πρόβλημα της εξασθένησης (Transmission Loss) με συνδυασμό θεωρητικών και πειραματικών δεδομένων.
- ◆ Στα μοντέλα που ακολουθούν, d είναι η απόσταση μεταξύ Σταθμού Βάσης και Κινητού Σταθμού σε Km, h το ύψος που βρίσκεται η κεραία του ΚΣ και L η Μέση Τιμή της εξασθένησης του ραδιοσήματος σε dB.

Μοντέλα Απωλειών Διάδοσης

◆ Παράμετροι μοντέλων

- Συχνότητα λειτουργίας
- Απόσταση πομπού-δέκτη
- Ύψη κεραιών πομπού και δέκτη
- Τύπος περιοχής (urban, suburban, rural, κλπ.)
- Τύπος εδάφους και κλίση αν υπάρχει
- Φυσικά εμπόδια και τα χαρακτηριστικά τους
- Τεχνητά εμπόδια και τα χαρακτηριστικά τους (π.χ. μέσο ύψος κτιρίων, μέση απόσταση μεταξύ τους)
- Προσανατολισμός δρόμων σε σχέση με πομπό και δέκτη

Μοντέλα Απωλειών Διάδοσης

- ♦ Τα τοπογραφικά και γεωγραφικά δεδομένα συνήθως παρέχονται από ψηφιακούς χάρτες (3D) μέσω γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (GIS).



Μοντέλα Απωλειών Διάδοσης

- ◆ Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην πράξη μπορούν να κατηγοριοποιηθούν
 - **Εμπειρικά** (Okumura-Hata, COST231-Hata, RACE Dual-Slope) : Οι παράμετροι των μοντέλων έχουν υπολογιστεί με τη μέθοδο της προσαρμογής σε εκτεταμένες μετρήσεις
 - **Μοντέλα βασισμένα σε ιδεώδεις δομές** (Walfisch-Bertoni, Ikegami) : Οι απώλειες υπολογίζονται αναλυτικά με βάση μια ιδεώδη και απλή δομή του εδάφους και των κτιρίων, ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή θεωρητικών τύπων.
 - **Ημι-εμπειρικά** (COST 231-Walfisch-Ikegami) : Οι παράμετροι είναι ίδιες με τα προηγούμενα, αλλά προκύπτουν από προσαρμογές σε μετρήσεις.
 - **Ντετερμινιστικά-Αναλυτικά** : Χρήση αναλυτικών μεθόδων (UTD, GTD, PO, ray tracing) με εκτεταμένες γεωγραφικές πληροφορίες.

Μοντελοποίηση Απωλειών Διάδοσης

- ◆ Εξισώσεις Maxwell
 - Πολύπλοκες και μη-πρακτικές
- ◆ Free space path loss
 - Απλό
- ◆ Ray tracing models
 - Απαιτεί πληροφορία site-specific
- ◆ Εμπειρικά μοντέλα
 - Δεν γενικοποιούνται πάντα και σε άλλα περιβάλλοντα
- ◆ Στατιστικά μοντέλα
 - Βασίζονται σε συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας, όπως Rayleigh, Rician και η Log-Normal.
- ◆ Αναλυτικά μοντέλα
 - Χρησιμοποιούν γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τη θεωρία H/M διάδοσης

Η επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή.

Μοντέλο Ελευθέρου Χώρου (Free Space)

- ♦ Αποτελεί το βασικό θεωρητικό μοντέλο για τον υπολογισμό της εξασθένησης των ραδιοσημάτων που οφείλεται στην απομάκρυνση του κινητού σταθμού από την κεραία εκπομπής του ΣΒ.
- ♦ Η περιοχή στην οποία κινείται ο συνδρομητής θεωρείται ιδανική χωρίς γεωγραφικούς περιορισμούς.
- ♦ Η απώλεια διάδοσης δίνεται από την σχέση:

$$PL(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_R}{P_T} = 10 \log_{10} G_T + 10 \log_{10} G_R - 20 \log_{10} f - 20 \log_{10} d + k$$
$$k = 20 \log_{10} \left(\frac{3 \times 10^8}{4\pi} \right) = 147.6$$

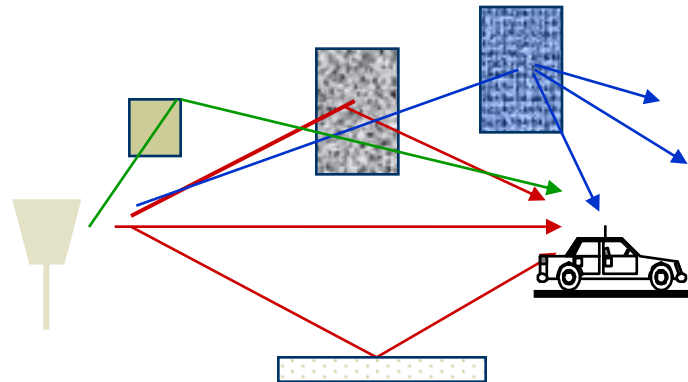
Μοντέλο Επίπεδης Γήινης Επιφάνειας (Plane Earth)

- ◆ Το μοντέλο αυτό έχει σαν θεωρητική βάση την ιδανική περίπτωση μιας γήινης επίπεδης επιφάνειας με πεπερασμένη αγωγιμότητα
 - χωρίς να λαμβάνει υπόψη το σχήμα του εδάφους και διάφορα υπαρκτά εμπόδια (κτίρια, δένδρα κ.λ.π).
- ◆ Χρησιμοποιείται όπως και το προηγούμενο μοντέλο σαν αναφορά για την σύγκριση των διαφόρων μοντέλων.

$$PL(dB) = 40\log(d) - 10\log G_t(\theta_t, \varphi_t) - 10\log G_r(\theta_r, \varphi_r) - 20\log h_t - 20\log h_r$$

$$P_r(d) = P_t \cdot G_t(\theta_t, \varphi_t) \cdot G_r(\theta_r, \varphi_r) \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \cdot 4 \sin^2\left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d}\right) \quad \text{χωρίς προσέγγιση}$$

Στατιστικά Μοντέλα Ραδιοδιαύλων



- ◆ Τυχαίος αριθμός πολυδιαδρομικών συνιστωσών, όπου η κάθε μια από αυτές χαρακτηρίζεται από:
 - Τυχαίο Πλάτος
 - Τυχαία φάση
 - Τυχαία ολίσθηση Doppler
 - Τυχαία καθυστέρηση
- ◆ Μεταβολή αυτών με τον χρόνο τ , t
- ◆ Συνεπώς έχουμε χρονικά μεταβαλλόμενες κρουστικές αποκρίσεις των ραδιοδιαύλων.

Εμπειρικά Μοντέλα

(Χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις κυψελωτών συστημάτων)

- ◆ **Okumura model**
 - Εμπειρικό (site/freq specific)
 - Μη εύχρηστο (uses graphs)
- ◆ **Hata model**
 - Αναλυτική προσέγγιση του Okumura μοντέλου.
- ◆ **Cost 136 Model**
 - Επέκταση του Hata σε υψηλότερες συχνότητες (2 GHz)
- ◆ **Walfish/Bertoni**
 - Cost 136 επέκταση ώστε να ληφθούν υπόψη επιπλέον και οι περιθλάσεις (diffractions) από τις στέγες των κτιρίων.

Μοντέλο Okumura

- ◆ Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε **στατιστική ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων** της ισχύος του ραδιοσήματος.
- ◆ Χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ισχύος του σήματος σε εδάφη με συγκεκριμένη διαμόρφωση (συνήθως αστικές περιοχές).
- ◆ Το μοντέλο συνίσταται από ένα σύνολο καμπυλών με τις οποίες είναι δυνατή η εκτίμηση της ενδιάμεσης (50% ή median) απόσβεσης σε σχέση με τον ελεύθερο χώρο.
- ◆ Οι βασικές καμπύλες είναι για:
 - Ύψος κεραίας εκπομπής
 - Ύψος κεραίας λήψης
- ◆ Οι καμπύλες δίνουν την ενδιάμεση (median) απόσβεση σαν συνάρτηση της συχνότητας.

Μοντέλο Okumura

- ◆ Τα χαρακτηριστικά των περιβαλλόντων διάδοσης όπου ισχύει το μοντέλο συνοψίζονται ακολούθως:
 - Περιοχή συχνοτήτων 150-1920 MHz
 - Αποστάσεις 1 έως 100 Km
 - Ύψος κεραίας Σταθμού Βάσης από 30 έως 1000 m
 - Ύψος κεραίας Κινητού Σταθμού από 1 έως 10 m

Μοντέλο Okumura

Η median απόσβεση διάδοσης μπορεί να βρεθεί από την ακόλουθη έκφραση, όπου όλες οι ποσότητες είναι σε dB:

$$L_{50} = L_f + A(f_0, d) - G(h_t) - G(h_r) - G_{area} \pi$$

Όπου:

- Η απόσβεση ελευθέρου χώρου είναι: $L_f = 10 \log \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}$
- $A(f_0, d)$ η μεσαία εξασθένιση
- f_0 η συχνότητα φέροντος σε MHz
- d η απόσταση σε km και

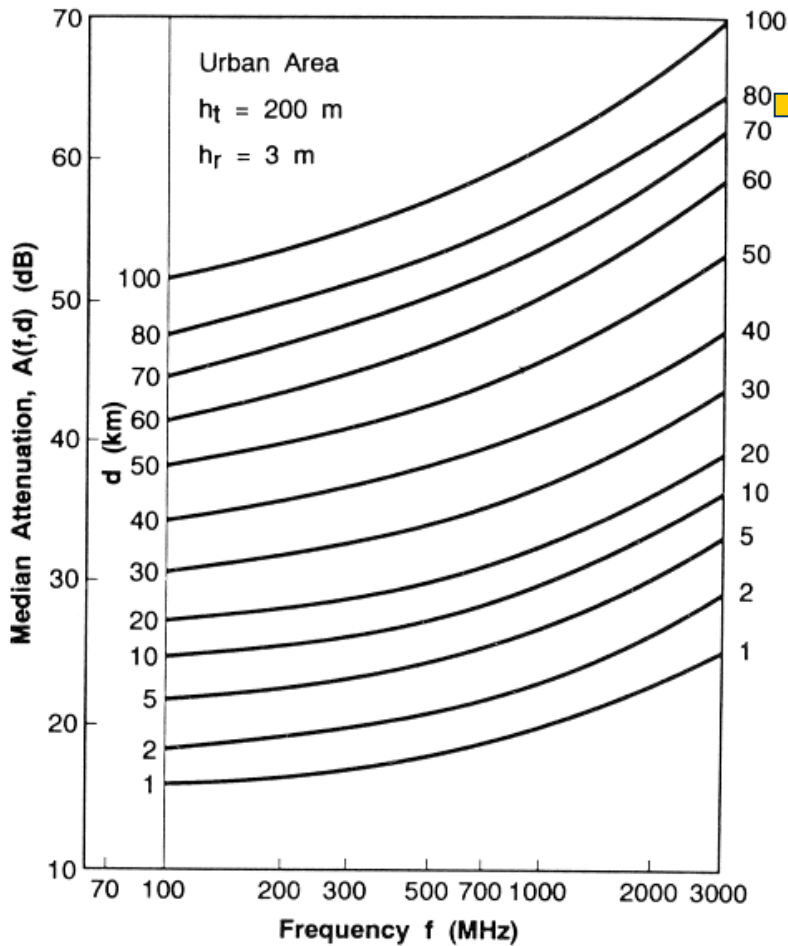
$$G(h_t) = 20 \log(h_t / 200), \text{ για } 10m < h_t < 1000m$$

$$G(h_r) = 10 \log(h_r / 3), \text{ για } h_r < 3m$$

$$G(h_r) = 20 \log(h_r / 3), \text{ για } 3m < h_r < 10m$$

Ο G_{area} είναι ένας συντελεστής διόρθωσης εξαρτώμενος από το είδος του εδάφους.

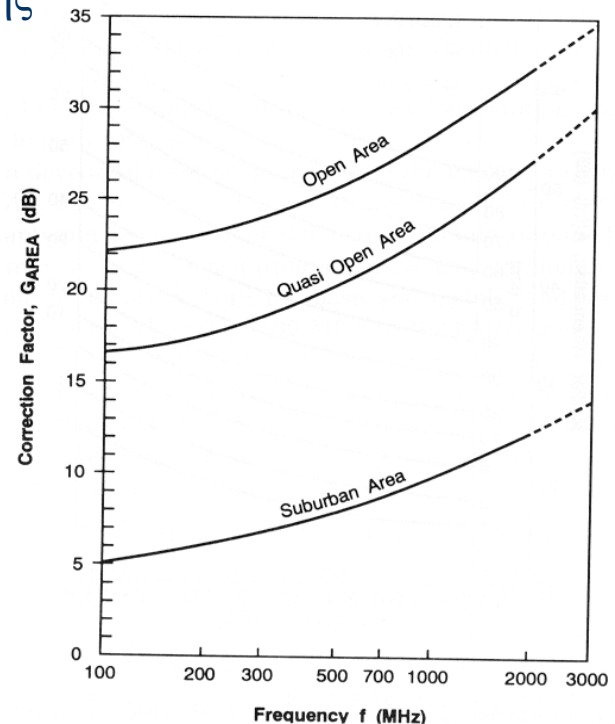
Μοντέλο Okumura



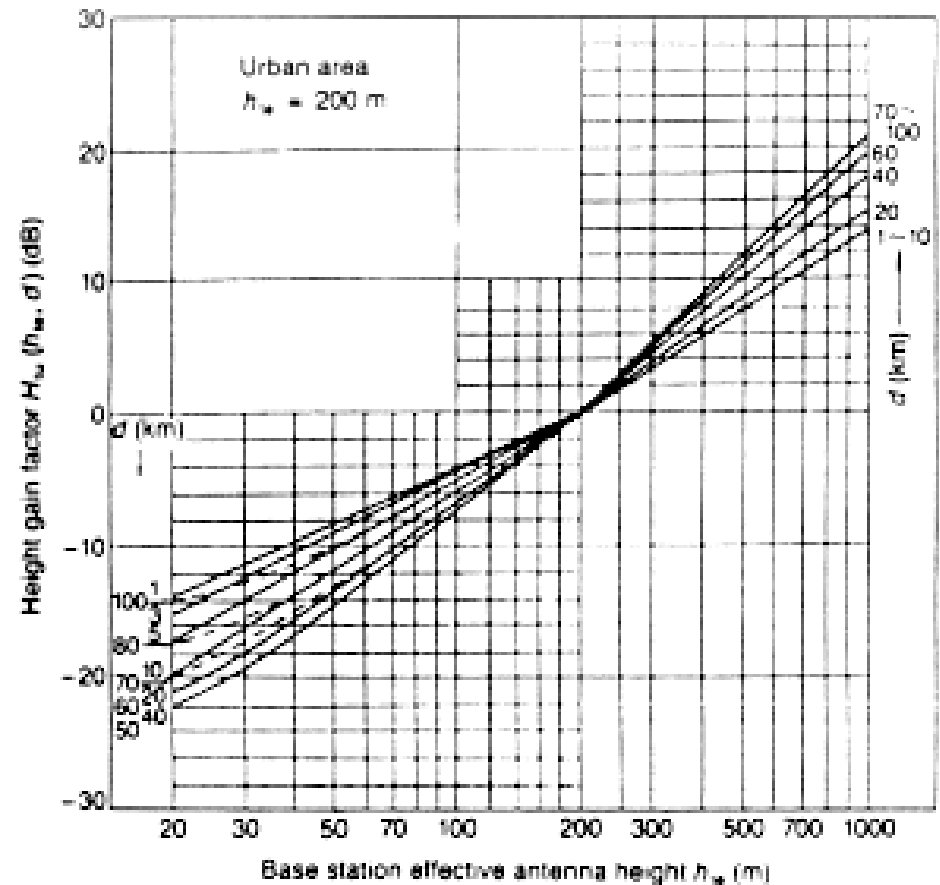
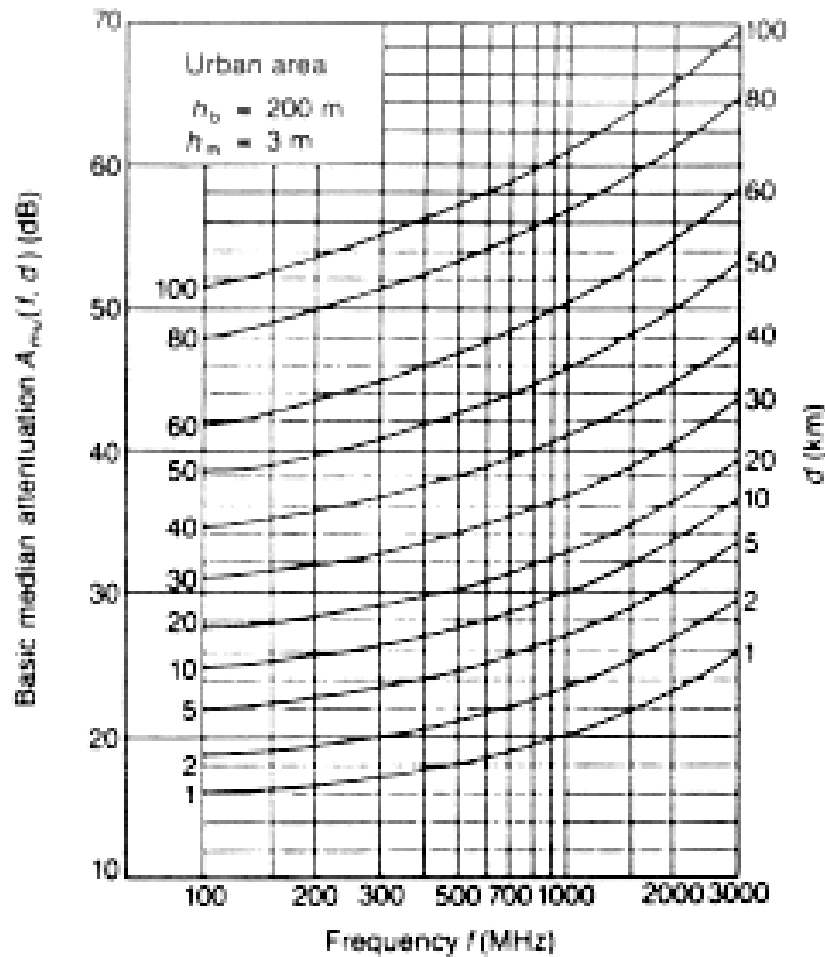
Ο πίνακας μας δίνει την median εξασθένιση:

$$A(f_0, d)$$

Με αυτήν και όλα τα προηγούμενα μπορούμε να υπολογίσουμε την median απόσβεση διάδοσης



Μοντέλο Okumura



Μοντέλο Hata

- ◆ Το μοντέλο Hata είναι η **εμπειρική αλγεβρική έκφραση** της απώλειας διάδοσης η οποία παρέχεται γραφικά από το μοντέλο Okumura.
- ◆ Το μοντέλο είναι ευέλικτο διότι επιτρέπει την χρήση εξισώσεων αντί γραφικών παραστάσεων.
- ◆ Τα μοντέλα Okamura και Hata δίνουν συγκρίσιμα αποτελέσματα για $d > 1 \text{ km}$
- ◆ Υπάρχουν εκφράσεις για αστικές, ημιαστικές και αγροτικές περιοχές.
- ◆ Αυτές οι εκφράσεις ισχύουν για την περιοχή συχνοτήτων 150 - 1500 MHz
- ◆ Στις εκφράσεις αυτές χρησιμοποιούνται :
 - Την συχνότητα σε MHz
 - Το ύψος της κεραίας σε m
 - Την απόσταση πομπού-δέκτη σε km

$$\begin{aligned} 150 &\leq f \leq 1500 \text{ MHz} \\ 30 &\leq h_T \leq 200 \text{ m} \\ 1 &\leq h_R \leq 10 \text{ m} \\ 1 &\leq d \leq 20 \text{ Km} \end{aligned}$$

Μοντέλο Hata

Η έκφραση για την ενδιάμεση απόσβεση σε ένα αστικό περιβάλλον δίδεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$L_p = \begin{cases} A + B \log_{10}(d) & \text{για αστική περιοχή} \\ A + B \log_{10}(d) - C & \text{για ημιαστική περιοχή} \\ A + B \log_{10}(d) - D & \text{για ανοιχτή περιοχή} \end{cases}$$

$$A = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f_c) - 13.82 \log_{10}(h_b) - a(h_m)$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)$$

$$C = 5.4 + 2[\log_{10}(f_c/28)]^2$$

$$D = 40.94 + 4.78[\log_{10}(f_c)]^2 - 18.33 \log_{10}(f_c)$$

Όπου:

h_b το ύψος της κεραίας στο BS

h_m το ύψος της κεραίας στο MS

Μοντέλο Hata

$$a(h_m) = \begin{cases} (1.1 \log_{10}(f_c) - 0.7)h_m - (1.56 \log_{10}(f_c) - 0.8) & \text{Για μέτρια ή μικρή πόλη} \\ \begin{cases} 8.29(\log_{10}(1.54h_m))^2 - 1.1 & \text{για } f_c \leq 200\text{MHz} \\ 3.2(\log_{10}(11.75h_m))^2 - 4.97 & \text{για } f_c \geq 400\text{MHz} \end{cases} & \text{Για μεγάλη πόλη} \end{cases}$$

COST 231 - extension Hata model

$$L_{50}(urban)(dB) = 46.3 + 33.9 \log f_c - 13.82 \log h_b \\ - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log h_b) \log d + C_M$$

$$C_M = \begin{cases} 0dB & \text{Για μικρές πόλεις και προάστια} \\ 3dB & \text{Για μητροπολιτικά κέντρα} \end{cases}$$

- περιοχή συχνοτήτων 1500-2000 MHz
- ύψος της κεραίας του Σ.Β. από 30 έως 200 m.
- ύψος της κεραίας του κινητού σταθμού από 1 έως 10 m.
- d=1km έως 20 km

Μοντέλο Walfisch - Bertoni

$$S = P_0 Q^2 P_1$$

$$P_0 = \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2$$

$$S(\text{dB}) = L_0 + L_{rts} + L_{ms}$$

Όπου:

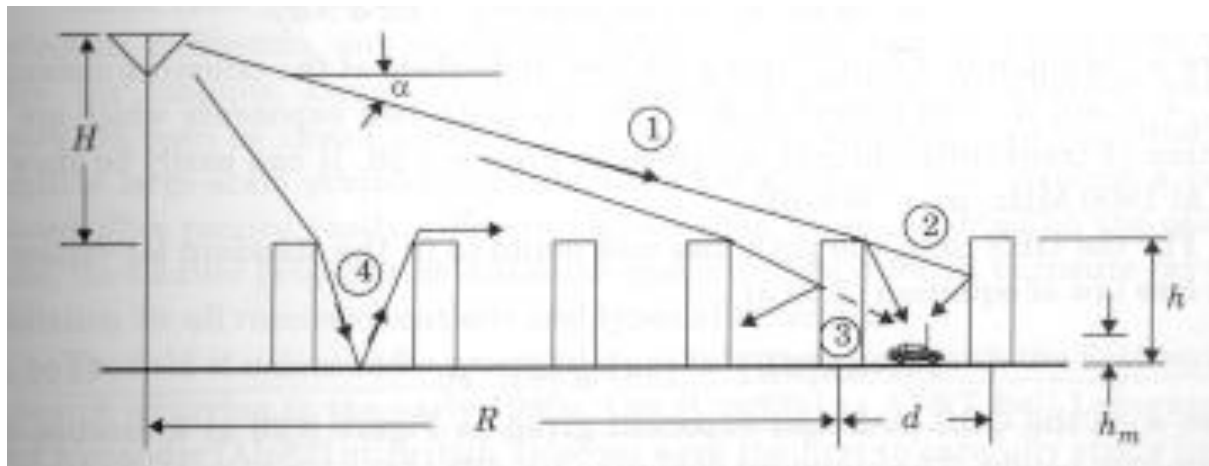
P_0 free space path loss

Q^2 reduction in the rooftop signal due to the row buildings

P_1 diffraction loss from roof to street

L_{rts} rooftop-to-street diffraction and scatter loss

L_{ms} diffraction loss due to the rows of buildings

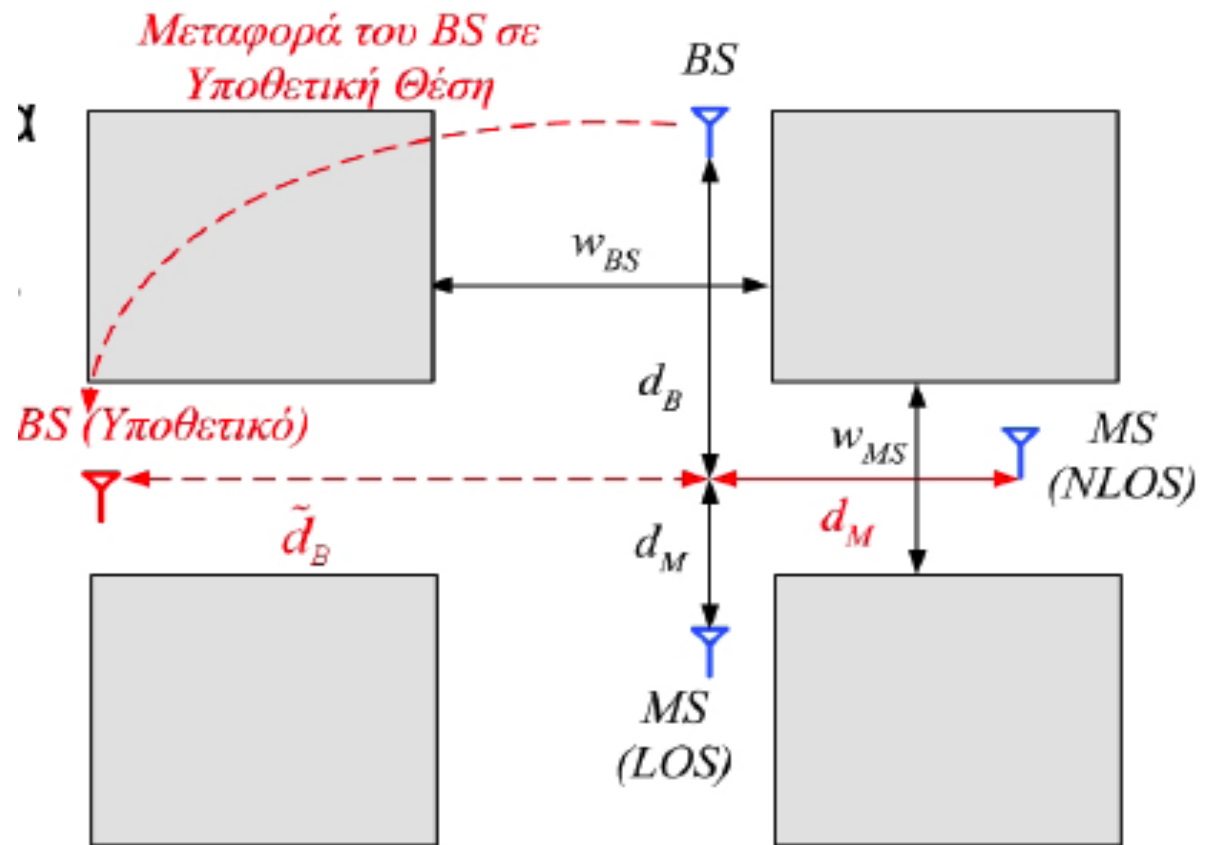


Street Microcells

- ◆ Σε περιπτώσεις όπου η κεραία του ΣΒ είναι αρκετά πιο χαμηλά από τις στέγες των κτιρίων και το σύστημα χρησιμοποιεί microcells, τα μοντέλα που έχουν προταθεί είναι τροποποιήσεις του μοντέλου επίπεδης γης (two-ray model).
- ◆ Για LOS μεταξύ BS και MS χρησιμοποιούν μοντέλο διπλής κλίσης με ένα συντελεστή απωλειών n_1 μέχρι το breakpoint και ένα άλλο n_2 μετά.
- ◆ Για NLOS υπάρχουν δύο προσεγγίσεις

RACE Dual Slope Model

- ◆ Σχετική γεωμετρία για LOS και NLOS



RACE Dual Slope Model

- ◆ Για LOS

$$PL(d) = 37 + 10 \log \left[\left(d^{n_1} \right)^p + \left(\frac{d^{n_2}}{d_{BP}^{n_2 - n_1}} \right)^p \right]^{1/p}$$

$(d = d_B + d_M)$ και $(d_{BP} : \text{Breakpoint})$

- ◆ Για NLOS αντικατέστησε $\tilde{d}_B \rightarrow d_B$ $\tilde{d}_{BP} \rightarrow d_{BP}$
- ◆ Το μοντέλο προέκυψε από μετρήσεις σε $f=1700\text{MHz}$
- ◆ Όπου ο παράγοντας επιλέγεται συνήθως $p=4$
- ◆ Και $n_1=2.24$ (variance 0.24), $n_2=5.58$ (variance 0.53),
- ◆ $d_{BP}=255\text{m}$ (variance 72.5m)

Άλλα Μοντέλα Εξωτερικού Χώρου

- ◆ Μοντέλο Egli (για επίπεδες επιφάνειες και συχνότητες από 40-1000MHz)
- ◆ Μοντέλο Ibrahim-Parsons
- ◆ Μοντέλο Blomquist-Ladell
- ◆ Μοντέλο Longley-Rice (point-to-point, 1-2000Km 20MHz-20GHz)
- ◆ Μοντέλο Lee
- ◆ Μοντέλο Allsebrook
- ◆ Μοντέλο McGeehan-Griffiths
- ◆ Μοντέλο Sakagami-Kuboi

Αναλυτικά Μοντέλα

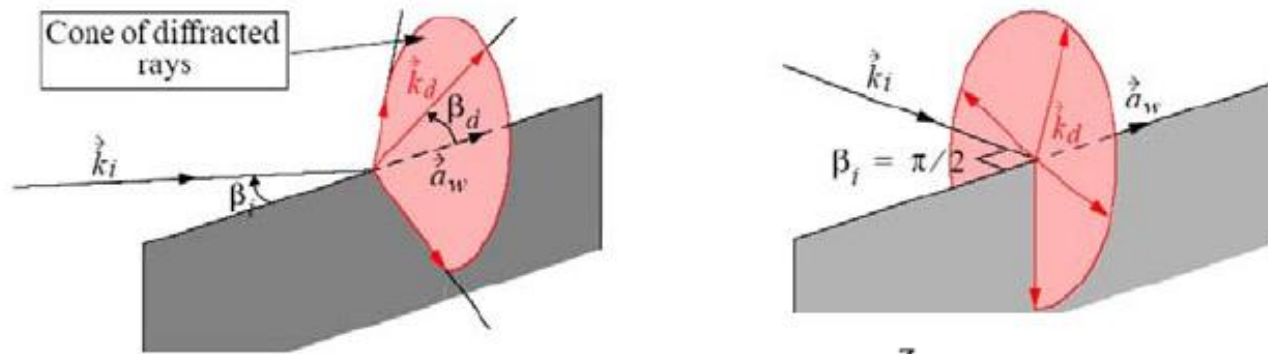
- ◆ Υπολογισμός των σημαντικότερων πεδιακών συνιστωσών στο δέκτη και άθροιση.

$$\vec{E}_{total} = \vec{E}_{LOS} + \vec{E}_{GO} + \vec{E}_{UTD} + \vec{E}_{PO}$$

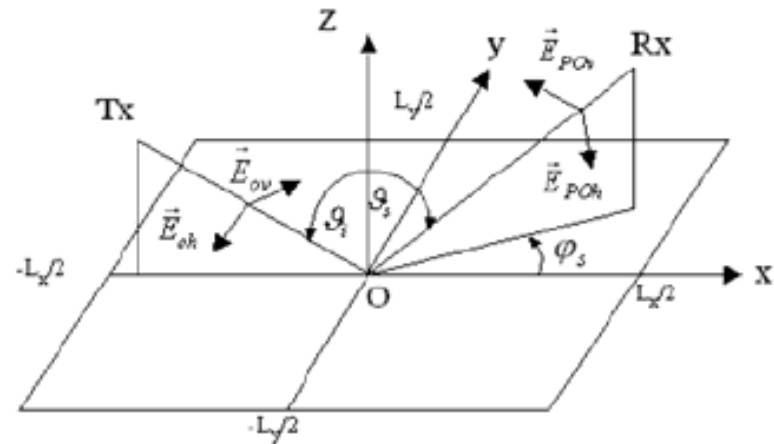
- ◆ Για τον υπολογισμό των συνιστωσών (π.χ. ανακλάσεις από το έδαφος ή άλλα τεχνητά εμπόδια όπως τα κτίρια, περιθλάσεις από γωνίες κτιρίων, κάθετες και οριζόντιες, σκέδαση από τραχιές επιφάνειες, ή συνδυασμοί των παραπάνω), χρησιμοποιούνται αντίστοιχες θεωρίες διάδοσης (π.χ. η Γεωμετρική Οπτική, GO, ή ο νόμος του Snell, η Ομοιόμορφη θεωρία της περίθλασης, UTD, ή ο νόμος του Keller, και η Φυσική Οπτική, PO).

Αναλυτικά Μοντέλα

Γεωμετρία Περίθλασης από Ακμή και Νόμος του Keller



Γεωμετρία Σκέδασης



Αναλυτικά Μοντέλα

Συνεισφορά Περίθλασης

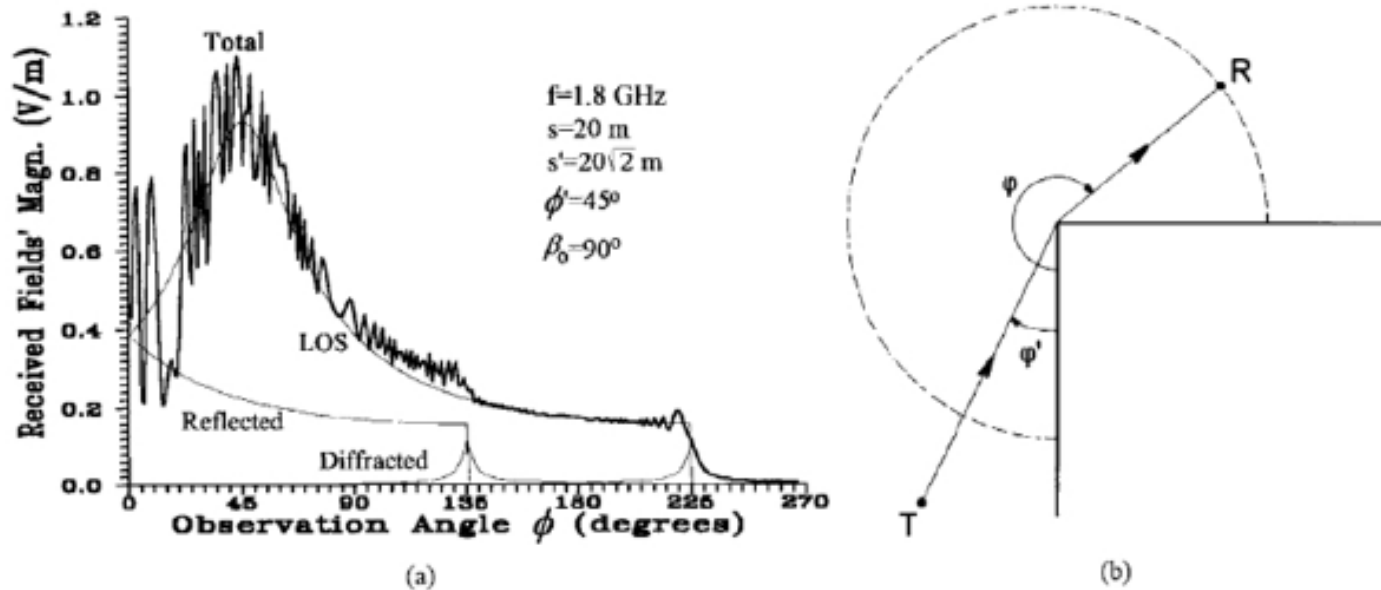
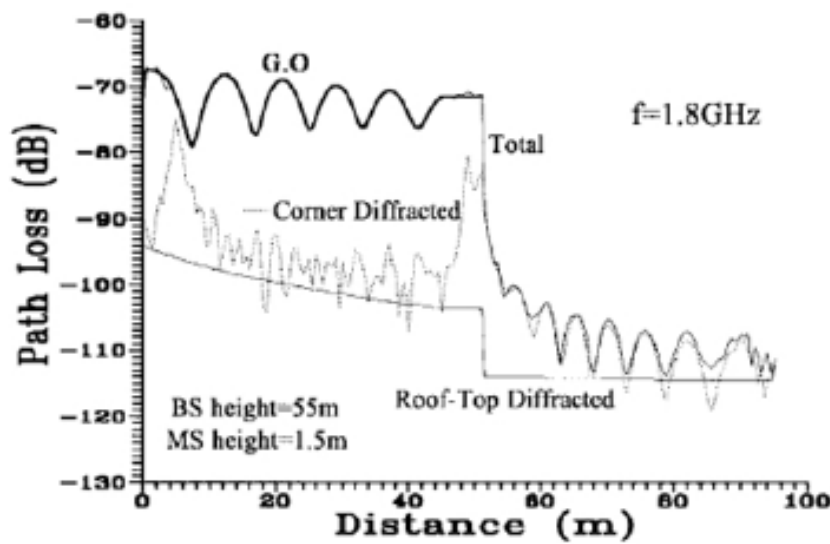


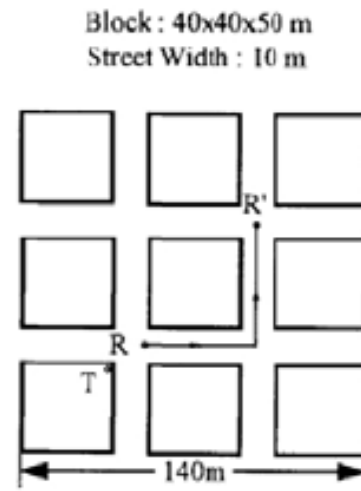
Fig. 4. (a) Field distribution of various components of a spherical wave normally incident on a 90° conducting wedge. Emitted field strength is $\sqrt{60}$ V/m. (b) Wedge diffraction geometry.

Αναλυτικά Μοντέλα

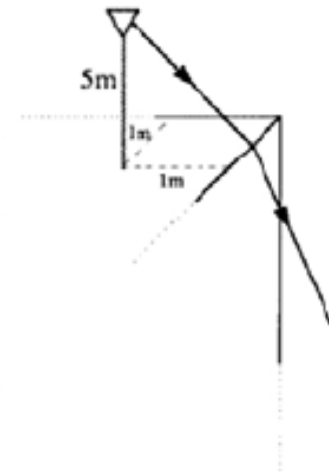
Συνεισφορά Συνιστωσών



(a)



(b)



(c)

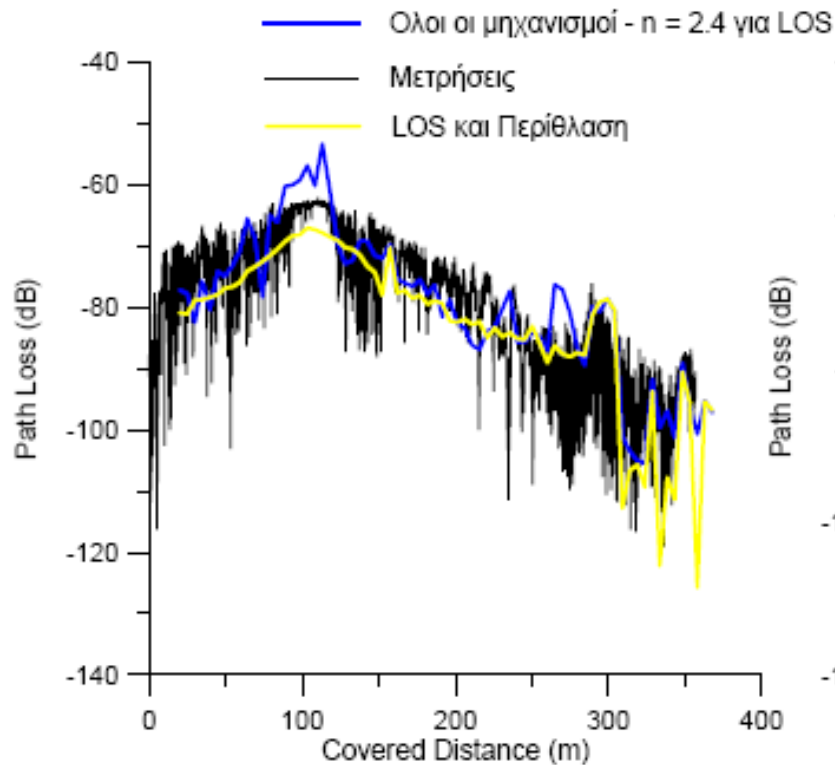
Fig. 7. (a) Path-loss characteristic, GO and diffraction contributions, (b) simulation geometry, and (c) rooftop local geometry of the BS location.

Αναλυτικά Μοντέλα

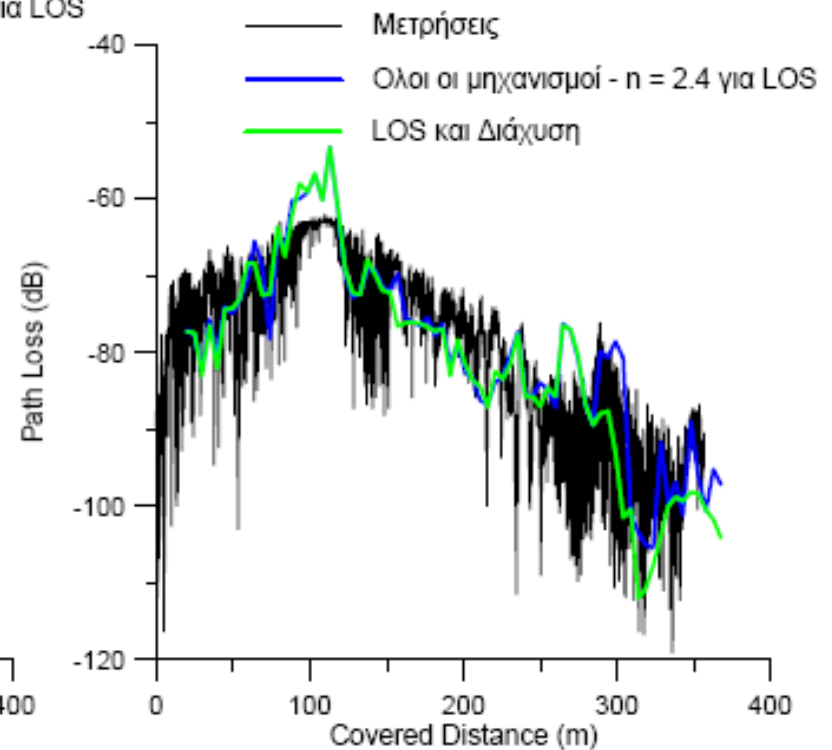
- ◆ Κάθε συνιστώσα αναπαρίσταται από μια ακτίνα (ray).
- ◆ Απαιτείται πλήρης γνώση της σχετικής γεωμετρίας πομπού-δέκτη-σκεδαστών καθώς και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των σκεδαστών.
- ◆ Υπάρχουν διαφορετικές προσεγγίσεις στο πρόβλημα υπολογισμού των συνιστωσών
 - Ray launching : δηλαδή εκπομπή ακτινών προς όλες τις κατευθύνσεις (ανάλογα και με το διάγραμμα ακτινοβολίας) και άθροιση στο δέκτη όσων καταφθάνουν, ικανοποιώντας τους αντίστοιχους νόμους.
 - Υπολογισμός συγκεκριμένων ακτινών (π.χ. μόνο ανακλάσεις και περιθλάσεις ή υβριδικές μέχρι 2ης τάξης), οι οποίες βρίσκονται σε συγκεκριμένα επίπεδα.

Αναλυτικά Μοντέλα

Καβάλα - Σταθμός Βάσης 8
Διαδρομή 1 - 40962 Ακτίνες
Προσομοίωση ανά 5 μ



Καβάλα - Σταθμός Βάσης 8
Διαδρομή 1 - 40962 Ακτίνες
Προσομοίωση ανά 5 μ



Αναλυτικά Μοντέλα



VPP (Vertical Propagation Plane) : Περιέχει τις Κίτρινες Συνιστώσες
TPP (Transverse Propagation Plane) : Περιέχει τις Κόκκινες Συνιστώσες
Οι μπλε Συνιστώσες είναι σκεδάσεις εκτός VPP ή TPP

Μοντέλα διάδοσης εσωτερικών χώρων

- ◆ Το κανάλι εσωτερικού χώρου είναι διαφορετικό από το εξωτερικού χώρου:
 - μικρότερες αποστάσεις
 - μεγάλη ποικιλία χώρων – λόγω διάταξης κτιρίων, επίπλων, υλικών κατασκευής, κ.λ.π.
 - σχετικά νέο πεδίο έρευνας (20 χρόνια νεότερο).
- ◆ Μοντέλα εσωτερικού χώρου
 - Μοντέλο Ericsson πολλαπλών κλίσεων
 - Μοντέλο παράγοντα εξασθένησης (attenuation factor)

Μοντέλο Keenan-Motley

◆ Μοντέλα Εσωτερικών Χώρων

$$PL(d) = PL(d_o) + 10n \log_{10} d + \sum_{i=1}^I k_{fi} L_{fi} + \sum_{j=1}^J k_{wj} L_{wj}$$

- ◆ $PL(d_o)$ είναι η εξασθένιση αναφορικά με την απόσταση αναφοράς (1 μέτρο) ($PL(d_o)=37dB$).
- ◆ n : είναι ο συντελεστής απωλειών διάδοσης ($n=2$).
- ◆ d : είναι η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη.
- ◆ L_{fi} : είναι οι απώλειες που προκαλούνται από τα πατώματα του τύπου i .

Μοντέλο Keenan-Motley

- ◆ I : το πλήθος των κατηγοριών για τα πατώματα
- ◆ J : το πλήθος των κατηγοριών για τους τοίχους
- ◆ k_{fi} : είναι ο αριθμός των ορόφων (πατωμάτων) του τύπου i , μεταξύ πομπού και δέκτη.
- ◆ L_{wj} : είναι οι απώλειες που οφείλονται στους τοίχους του τύπου j , που παρεμβάλλονται στο μονοπάτι διάδοσης.
- ◆ k_{wi} : είναι ο αριθμός των τοίχων του τύπου j ανάμεσα στο πομπό και στο δέκτη.

Μοντέλο Keenan-Motley

- ◆ Τυπικές Τιμές Απωλειών για $f=1700\text{MHz}$ - 1900MHz
- ◆ Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορες τιμές για διαφορετικές συχνότητες και άλλα υλικά.

Υλικό	Απώλειες (dB)
Τούβλο	2.5
Γυψοσανίδα	1.3
Τσιμέντο	10.8
Πλάκα Ορόφου	23.62

Μοντέλα Εσωτερικού Χώρου Απλής Κλίσης

$$PL(d) = PL(d_o) + 10n \log(d)$$

Τυπικές Τιμές n και $[PL(d_o)]$ για 0.8-1.9GHz (COST231)		
Περιβάλλον	n $[PL(d_o)]$	Κύριος Μηχανισμός
Διάδρομοι	1.4-1.9 [39.2-42.7]	Κυματοδήγηση
Μεγάλα, ανοικτά δωμάτια	~2 [37.5]	LOS
Πυκνά Επιπλωμένα Δωμάτια	~ 4 [33.3]	OBS, NLOS
Πολλαπλοί Όροφοι	5.2-5.4 [21.9-44.9]	Εξασθένηση από Δάπεδα και Τοίχους

Γραμμικό Μοντέλο Εσωτερικού Χώρου

$$PL(d) = FSL(d) + ad$$

Για εμπορικά κέντρα

Για συχνότητες από 0.9-4GHz και

Για αποστάσεις BS-MS μέχρι 100m

$$a(dB / m) = 0.2 - 0.6$$

Παρατηρήστε ότι όσο αυξάνει η απόσταση d , τόσο μεγαλύτερη η απόκλιση από το FSL