

Ψηφιακές Επικοινωνίες

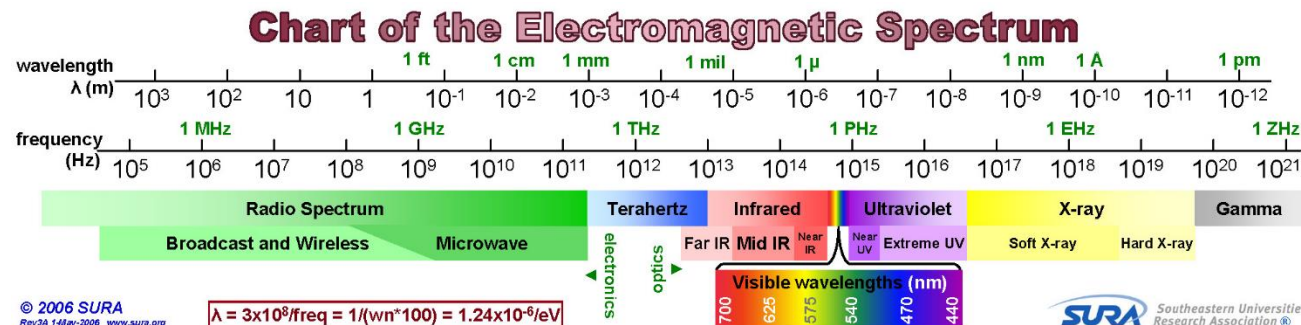
**Κεφ 5: Ανάλυση Ζεύξης
(Συνέχεια)**

Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

- Η/Μ κύματα ως Φορέας μεταφοράς πληροφορίας (?)
 - Mobile networks (π.χ. 0.9 - 4 GHz)

Ονομασία Ζώνης	Όρια Συχνοτήτων	Εφαρμογες
Extremely Low Frequencies (ELF)	1 Hz - 10 kHz	Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
Very Low Frequencies (VLF)	10 kHz - 30 kHz	Ραδιοπλοήγηση, Ραδιοφωνία AM
Low Frequencies (LF)	30 kHz - 300 kHz	Ραδιοπλοήγηση, Ραδιοφωνία AM
Median Frequencies (MF)	300 kHz - 3 MHz	Ραδιοφωνία AM
High Frequencies (HF)	3 MHz - 30 MHz	Ραδιοφωνία AM
Very High Frequencies (VHF)	30 MHz - 300 MHz	Ραδιοφωνία FM, Τηλεόραση, Κινητή τηλεφωνία (1ης γενιάς)
Ultra High Frequencies (UHF)	300 MHz - 3 GHz	Ραδιοζεύξεις, Τηλεόραση, Ραδιοπλοήγηση, Κινητή τηλεφωνία (2ης γενιάς), RADAR
Super High Frequencies (SHF)	3 GHz - 30 GHz	Επίγειες και Δορυφορικές Ζεύξεις, Ψηφιακή Δορυφορική Τηλεόραση, RADAR
Extremely High Frequencies (EHF)	30 GHz - 300 GHz	Μετεωρολογία, Αστρονομία



Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

- Η διάδοση ενός η/μ κύματος είναι μια σύνθετη διαδικασία και επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες
 - Για να κατανοήσουμε και μελετήσουμε την διάδοση απαιτείται να μοντελοποιήσουμε (απλοποιήσουμε και περιγράψουμε μαθηματικά) την πορεία του κύματος
- Στόχος: δημιουργία μαθηματικού μοντέλου για:
 - τον υπολογισμό της λαμβανόμενης ισχύος
 - την περιγραφή της επίπτωσης λόγω διάφορων φαινομένων, π.χ. διάθλαση, ανάκλαση,
- Κάθε μοντελοποίηση είναι κατάλληλη:
 - για συγκεκριμένες συχνότητες
 - σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα (π.χ., αστικό, ημιαστικό, κλπ)
 - για συγκεκριμένες ιδιότητες της ζεύξης (π.χ., οπτική επαφή ή όχι, ύψη κεραιών, κλπ)

Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

- Κατηγοριοποίηση κυμάτων με βάση τον τρόπο διάδοσης



Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

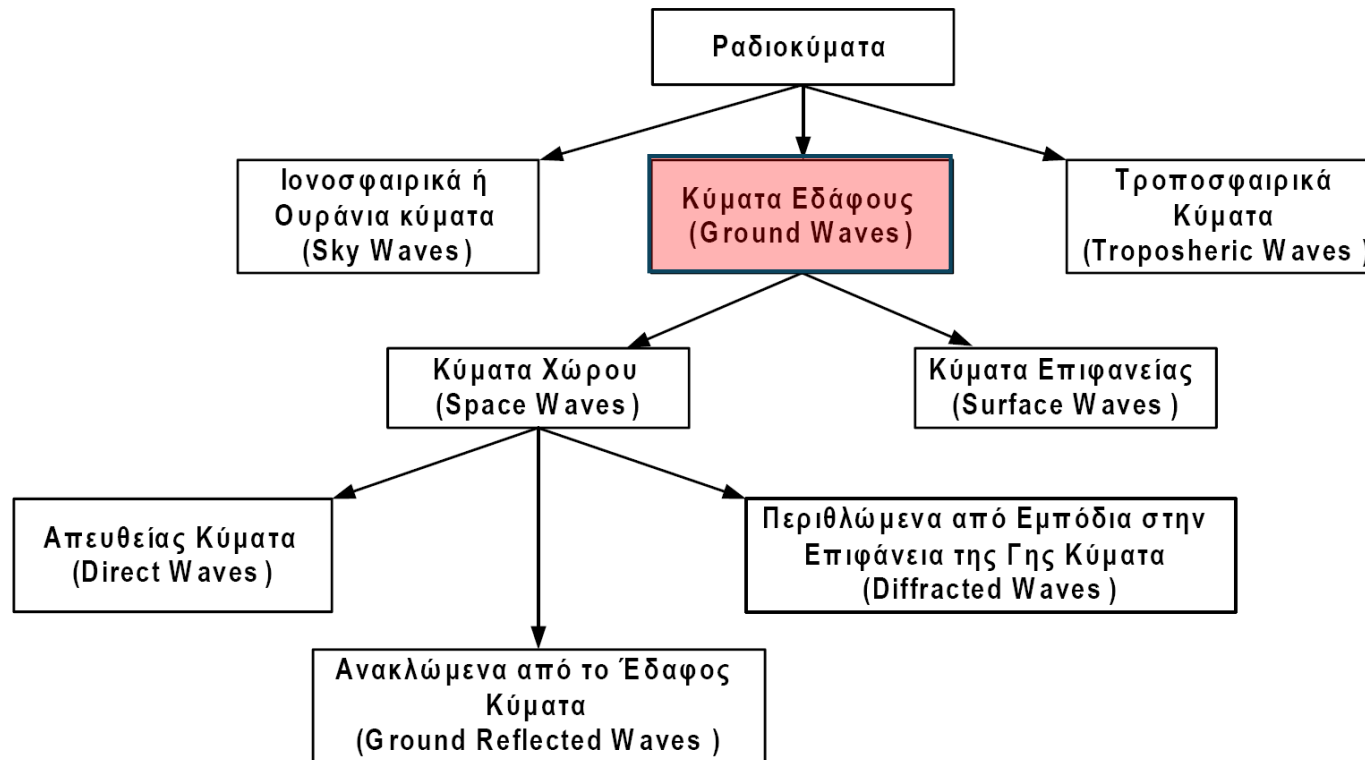
Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

- Κύματα εδάφους (Ground wave propagation)
 - Κύματα Επιφανείας (Surface)
 - **Κύματα Χώρου (Space Wave)**
 - Direct Waves - διάδοσης οπτικής επαφής (**LOS** - Line of sight propagation)
 - Reflected / Diffracted Waves - Διάδοσης μή οπτικής επαφής (**Non-LOS**)
- Ουράνια κύματα - Ιονοσφαιρικά (Sky wave propagation)
- Τροποσφαιρικά κύματα

Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

- Κατηγοριοποίηση κυμάτων με βάση τον τρόπο διάδοσης

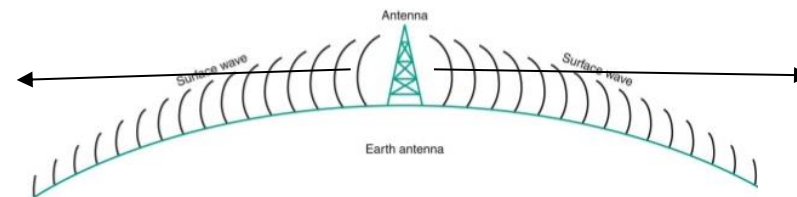
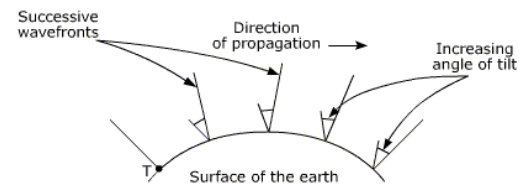


Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων – Κύματα επιφανείας

- ▶ Περιγραφή: Το η/μ κύμα (χαμηλής συχνότητας) ακολουθεί την καμπυλότητα της επιφάνειας της γης
 - ▶ Υψηλή θέση κεραίας εκπομπής - μεγάλο μήκος κύματος
- ▶ Ιδιότητες:
 - ▶ ικανοποιητικές αποστάσεις ζεύξεων
 - ▶ γρήγορη μείωσης ισχύος
 - ▶ συχνότητες ζεύξεως $< 3 \text{ MHz}$
- ▶ Εφαρμογή:
 - ▶ ραδιόφωνο AM

Name	Abbreviation Frequency	Frequency	Wave length
Very low	VLF	3 to 30 kHz	100 to 10km
Low	LF	30 to 300 kHz	10 to 1km
Medium	MF	300 to 3000 kHz	1km to 100 m
High	HF	3 to 30 MHz	100 to 10m
Very high	VHF	30 to 300 MHz	10 to 1cm
Ultrahigh	UHF	300 to 3000 MHz	1m to 10cm
Super high	SHF	3 to 30 GHz	10 to 1cm
Extremely high	EHF	30 to 300 GHz	10 to 1mm

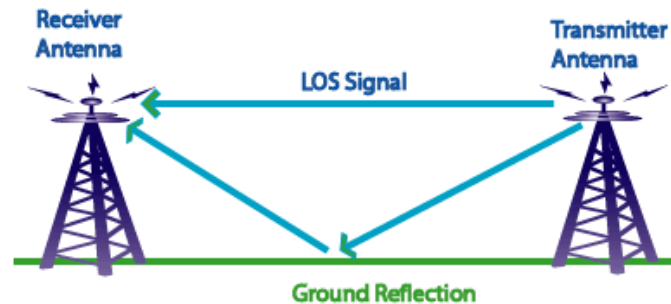


Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων – Κύματα χώρου

Space Wave - Two ray ground reflection model

- Περιγραφή: η διάδοση έχει δύο σημαντικές συνιστώσες
 - την απευθείας συνιστώσας λόγω οπτικής επαφής
 - τη συνιστώσα από την ανάκλαση του η/μ κύματος στο έδαφος
- Ιδιότητες
 - ζεύξη κοντά στην επιφάνεια της γης (μικρά ύψη κεραιών)
 - ζεύξη μικρής απόστασης
- Εφαρμογή
 - ασύρματα τοπικά δίκτυα

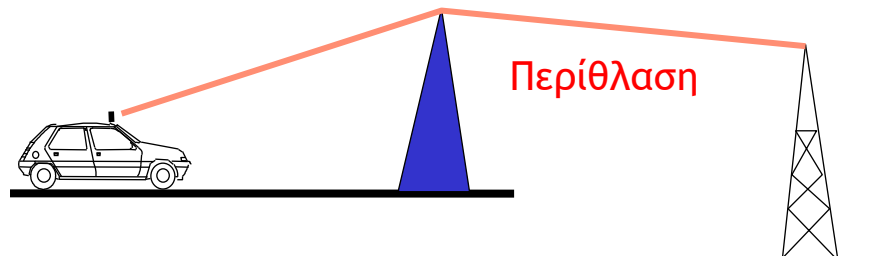


Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων – Κύματα χώρου

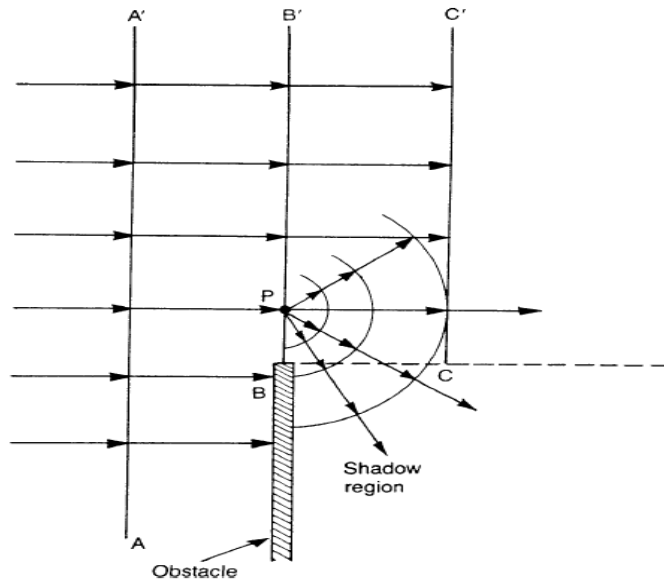
Space Wave - Non-LOS propagation

- Περιγράφει την ύπαρξη σήματος σε θέσεις που δεν υπάρχει οπτική επαφή λόγω ύπαρξης **εμποδίων** (**δεν είναι όλα τα αντικείμενα εμπόδια**)
- Κατηγοριοποίηση με βάση τις διαστάσεις του εμποδίου
 - Εμπόδιο με διαστάσεις $\gg$ μήκους κύματος (μεγάλη συχνότητα)
 - Οι ιδιότητες του μέσου καθορίζουν την πορεία του κύματος
 - Εμπόδιο με διαστάσεις $\ll$ μήκους κύματος (μικρή συχνότητα)
 - Π.χ. ένα κύμα συχνότητας 200KHz έχει μήκος κύματος ~ 1500 m άρα δεν επηρεάζεται από κτήρια
 - Εμπόδιο με διαστάσεις ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος κύματος
 - Η εμφάνιση κύματος **«πίσω από το εμπόδιο»** περιγράφεται από το νόμο του **Huygen**



Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων – Κύματα χώρου



Νόμος του Huygen:

Όλα τα σημεία του σφαιρικού μετώπου του κύματος μπορούν να θεωρηθούν ως δευτερεύουσες σημειακές πηγές.

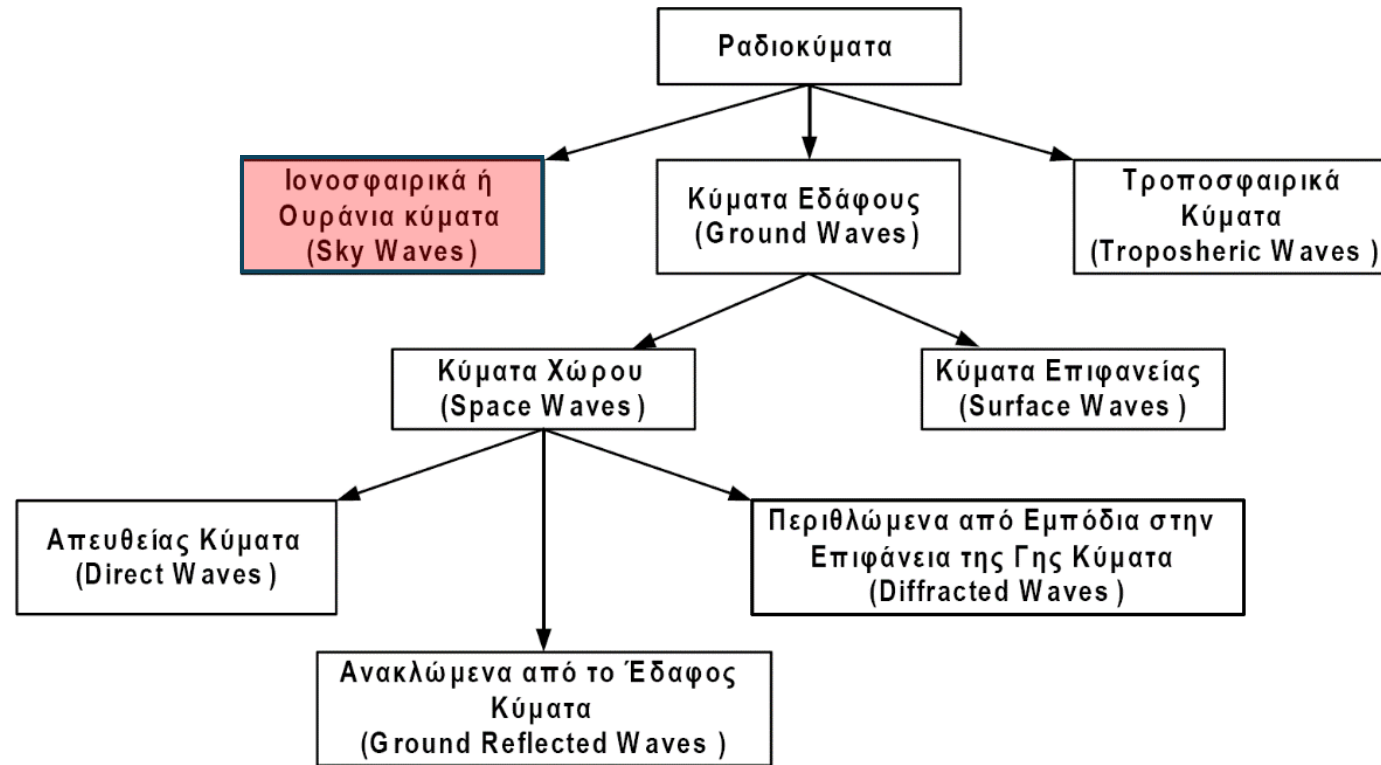
Με τη σειρά τους, όλα τα δευτερεύοντα κύματα κατά μήκος του μετώπου συνθέτονται για τη δημιουργία πιο προχωρημένων μετώπων

Κύμα «πίσω από το εμπόδιο» - Περίθλαση

Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

- Κατηγοριοποίηση κυμάτων με βάση τον τρόπο διάδοσης

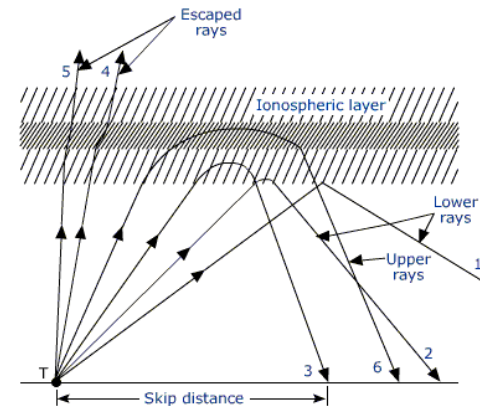
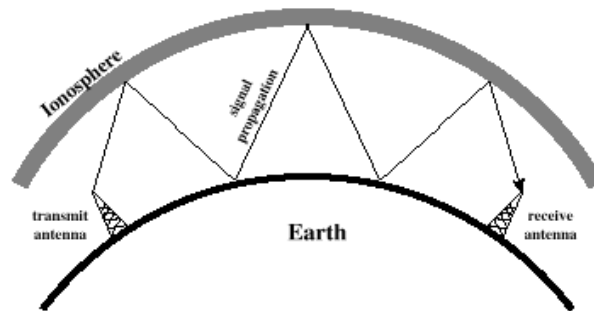


Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων – **Ιονοσφαιρικά**

- Περιγραφή: Το η/μ κύμα (HF, $3\text{MHz} < f < 30\text{MHz}$) διαθλάται από την ιονόσφαιρα (40-500 km ύψος)
- Ιδιότητες:
 - ζεύξεις με μεγάλο αριθμό διαθλάσεων
 - σχετικά μικρές απώλειες ισχύος
 - συχνότητες 3-30 MHz
- Εφαρμογή:
 - Ερασιτεχνικό ραδιόφωνο
 - CB radio

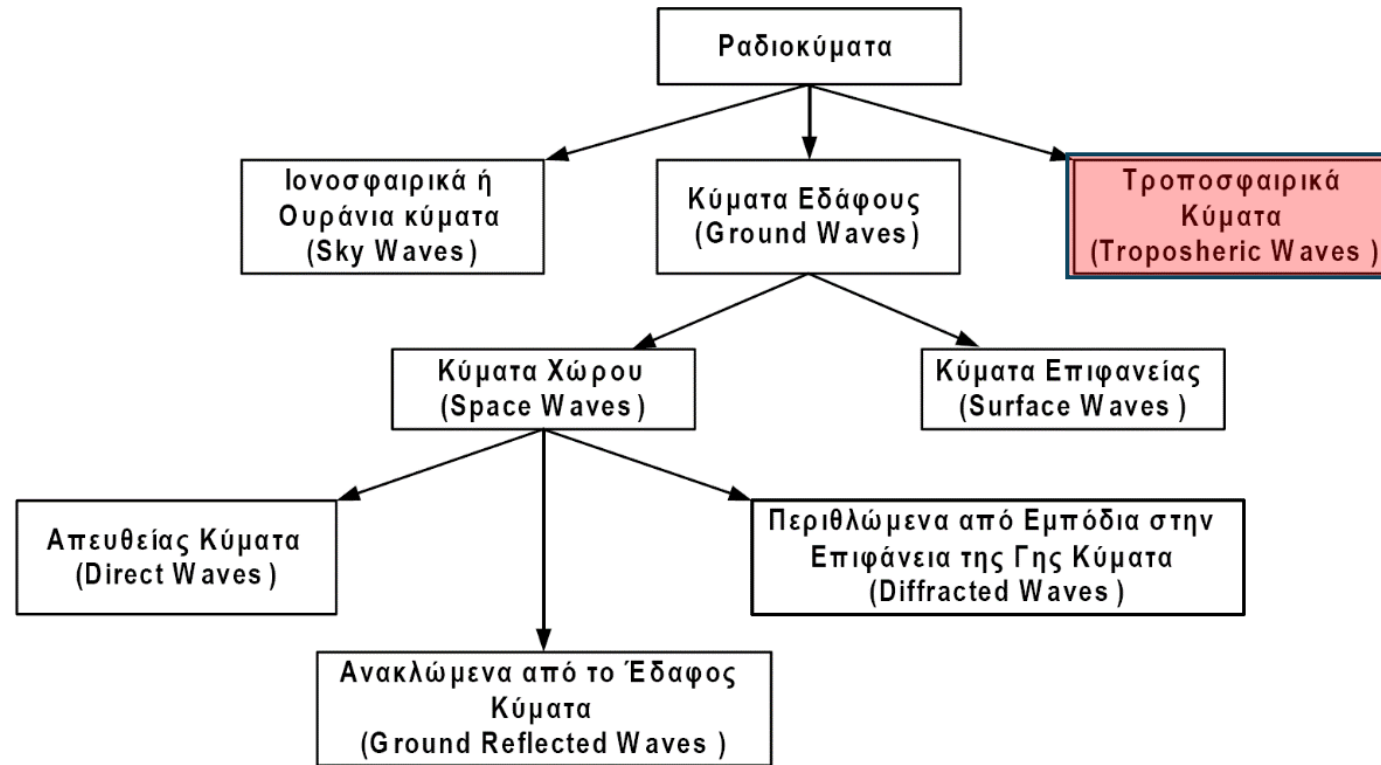
Name	Abbreviation Frequency	Frequency	Wave length
Very low	VLF	3 to 30 kHz	100 to 10km
Low	LF	30 to 300 kHz	10 to 1km
Medium	MF	300 to 3000 kHz	1km to 100 m
High	HF	3 to 30 MHz	100 to 10m
Very high	VHF	30 to 300 MHz	10 to 1cm
Ultrahigh	UHF	300 to 3000 MHz	1m to 10cm
Super high	SHF	3 to 30 GHz	10 to 1cm
Extremely high	EHF	30 to 300 GHz	10 to 1mm



Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

- Κατηγοριοποίηση κυμάτων με βάση τον τρόπο διάδοσης



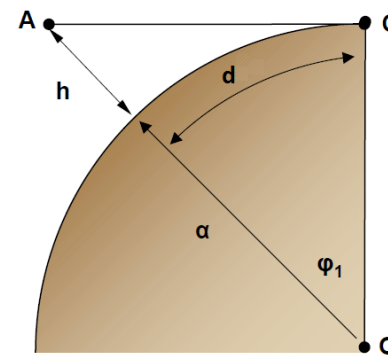
Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων - Τροποσφαιρικά

- Περιγραφή: Το η/μ κύμα διαδίδεται «**σχεδόν**» ευθεία (?)
- Το ύψος των κεραιών καθορίζει τη μέγιστη απόσταση ζεύξης
 - Η μέγιστη απόσταση για οπτική επαφή χωρίς εμπόδια καλείται:

Ενεργός ευθεία οπτικής επαφής

Name	Abbreviation Frequency	Frequency	Wave length
Very low	VLF	3 to 30 kHz	100 to 10km
Low	LF	30 to 300 kHz	10 to 1km
Medium	MF	300 to 3000 kHz	1km to 100 m
High	HF	3 to 30 MHz	100 to 10m
Very high	VHF	30 to 300 MHz	10 to 1cm
Ultrahigh	UHF	300 to 3000 MHz	1m to 10cm
Super high	SHF	3 to 30 GHz	10 to 1cm
Extremely high	EHF	30 to 300 GHz	10 to 1mm



Πιο μακρινό σημείο που περιμένω σήμα

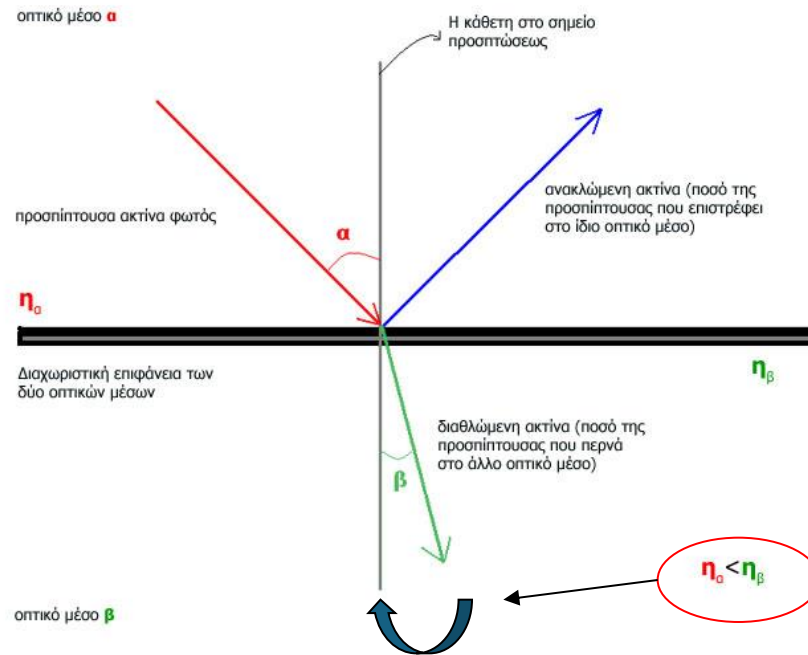
$$d = \sqrt{2ah} \text{ m}$$

$$\alpha = 6,375 \cdot 10^6 \text{ m}$$

$$d = 3.57 \sqrt{h} \text{ (Km)}$$

Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων - Τροποσφαιρικά



νόμος του Σνέλ (Snell)

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad \left. \vphantom{\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}} \right\} \text{Δείκτες διάθλασης}$$

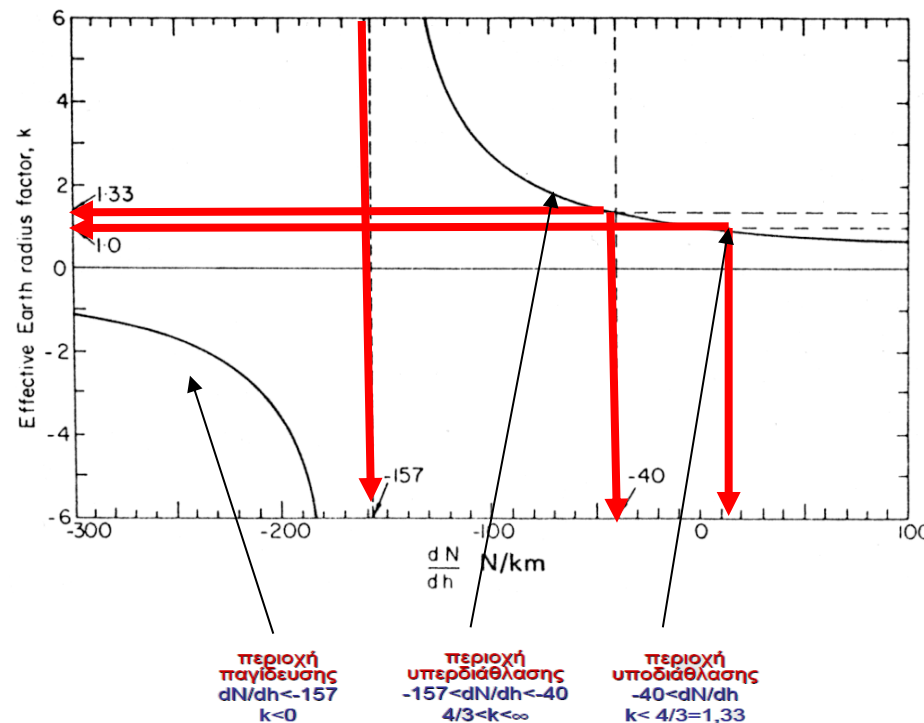
«σχεδόν» ευθεία και
με μειούμενη ταχύτητα

Διαδίδεται «σχεδόν» ευθεία - Διάθλαση

Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων - Τροποσφαιρικά

- Διόρθωση της ενεργού ευθείας οπτικής επαφής λόγω διάθλασης στην ατμόσφαιρα
- **k** = Effective Earth radius Factor (Παράγων ενεργού ακτίνας γης)



$$k = \frac{1}{1 + a \frac{dn}{dh}} = \frac{1}{1 + \frac{(dN/dh)}{157}}$$

Υψος κεραίας

$$N = (n - 1) \times 10^6$$

Δείκτης διάθλασης

Εξαρτάται από πίεση, θερμοκρασία, υγρασία ατμόσφαιρας κτλ.

Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

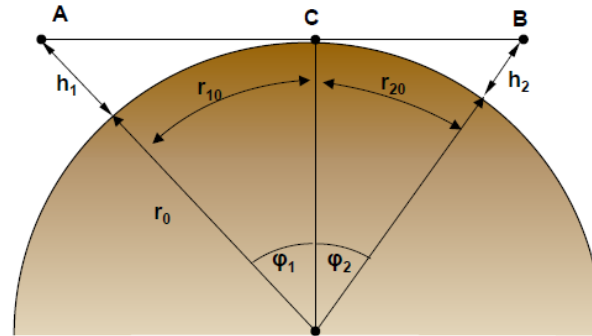
Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων - Τροποσφαιρικά

- Διόρθωση της ενεργού ευθείας οπτικής επαφής λόγω διάθλασης στην ατμόσφαιρα

$$d = 3.57\sqrt{Kh} \quad (Km)$$

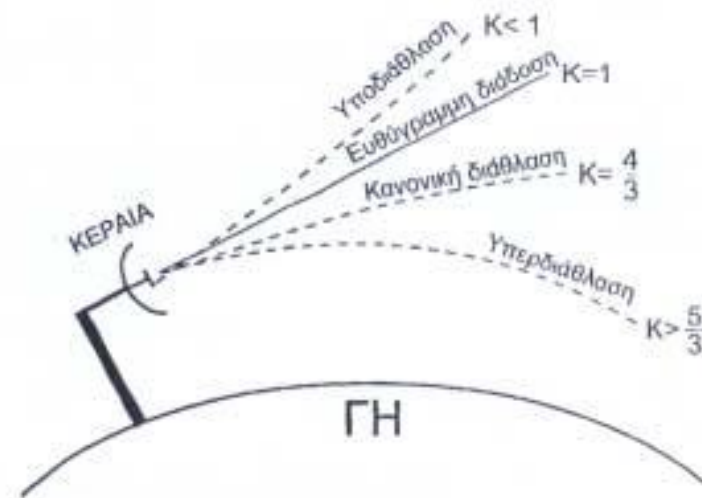
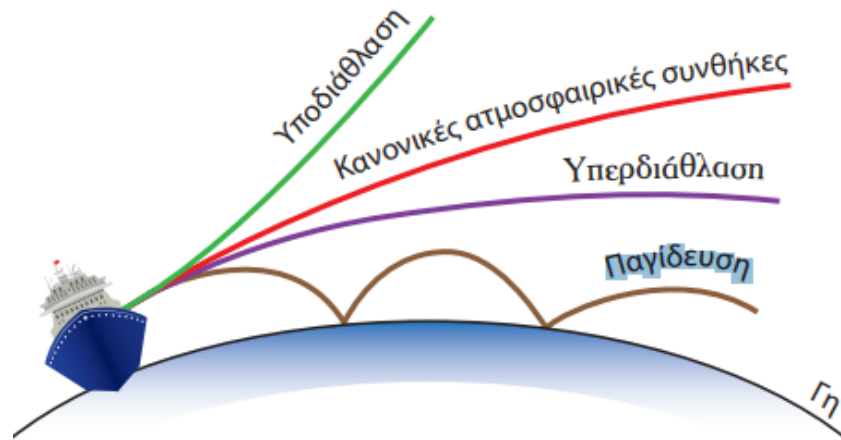
- h , ύψος κεραίας
- K , Παράγων ενεργού ακτίνας γης (αλλαγή καμπυλότητας γης)
- Για δύο κεραίες με $h \neq 0$:

$$d = 3.57 \left(\sqrt{Kh_1} + \sqrt{Kh_2} \right) \quad (Km)$$



Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων - Τροποσφαιρικά



περιοχή
παγίδευσης
 $dN/dh < -157$
 $k < 0$

περιοχή
υπερδιάθλασης
 $-157 < dN/dh < -40$
 $4/3 < k < \infty$

περιοχή
υποδιάθλασης
 $-40 < dN/dh$
 $k < 4/3 = 1,33$

Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Band	Frequency Range	Free-Space Wavelength Range	Propagation Characteristics	Typical Use
ELF (extremely low frequency)	30 to 300 Hz	10,000 to 1,000 km	GW	Power line frequencies; used by some home control systems.
VF (voice frequency)	300 to 3000 Hz	1,000 to 100 km	GW	Used by the telephone system for analog subscriber lines.
VLF (very low frequency)	3 to 30 kHz	100 to 10 km	GW; low attenuation day and night; high atmospheric noise level	Long-range navigation; submarine communication
LF (low frequency)	30 to 300 kHz	10 to 1 km	GW; slightly less reliable than VLF; absorption in daytime	Long-range navigation; marine communication radio beacons
MF (medium frequency)	300 to 3000 kHz	1,000 to 100 m	GW and night SW; attenuation low at night, high in day; atmospheric noise	Maritime radio; direction finding; AM broadcasting.
HF (high frequency)	3 to 30 MHz	100 to 10 m	SW; quality varies with time of day, season, and frequency.	Amateur radio; international broadcasting, military communication; long-distance aircraft and ship communication
VHF (very high frequency)	30 to 300 MHz	10 to 1 m	LOS; scattering because of temperature inversion; cosmic noise	VHF television; FM broadcast and two-way radio, AM aircraft communication; aircraft navigational aids
UHF (ultra high frequency)	300 to 3000 MHz	100 to 10 cm	LOS; cosmic noise	UHF television; cellular telephone; radar; microwave links; personal communications systems
SHF (super high frequency)	3 to 30 GHz	10 to 1 cm	LOS; rainfall attenuation above 10 GHz; atmospheric attenuation due to oxygen and water vapor	Satellite communication; radar; terrestrial microwave links; wireless local loop
EHF (extremely high frequency)	30 to 300 GHz	10 to 1 mm	LOS; atmospheric attenuation due to oxygen and water vapor	Experimental; wireless local loop mmWave communications in 5G
Infrared	300 GHz to 400 THz	1 mm to 770 nm	LOS	Infrared LANs; consumer electronic applications
Visible light	400 THz to 900 THz	770 nm to 330 nm	LOS	Optical communication

Μοντέλα Διάδοσης

- Αναλυτικά μοντέλα : Χρησιμοποιούν γεωμετρικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος διάδοσης – ντετερμινιστική εκτίμηση
- Εμπειρικά : Προέρχονται από προσαρμογές σε πειραματικά αποτελέσματα, δίνουν στατιστικές κατανομές των διαλείψεων και την εξασθένιση του σήματος με την απόσταση πομπού-δέκτη
- Στατιστικά μοντέλα : Βασίζονται σε συγκεκριμένες παραδοχές (πιο απλά)

Αναλυτικά Μοντέλα διάδοσης

- Βασίζονται στην άθροιση των κύριων συνιστωσών του σήματος στο δέκτη
- Αξιοποιούνται βασικές αρχές της γεωμετρικής οπτικής, Φυσικής κτλ
- Ray –tracing : Μέθοδος μελέτης διάδοσης βήμα-βήμα
 - Χρειάζονται πλήρης πληροφορίες σχετικά με τον πομπό, τον δέκτη και τους σκεδαστές καθώς και τα χαρακτηριστικά των υλικών των σκεδαστών
 - Βασίζεται είτε σε όλες τις ακτίνες που φθάνουν στον δέκτη, είτε στις πιο σημαντικές (μέχρι 2^{ης} τάξης)

Εμπειρικά μοντέλα διάδοσης

- Βασικές παράμετροι :
 - Συχνότητα
 - Περιβάλλον διάδοσης (αστικό, ήμι-αστικό, αγροτικό)
 - Απόσταση πομπού-δέκτη
 - Ύψη κεραίας εκπομπής και λήψης
 - Μορφολογία περιβάλλοντος διάδοσης(ύψη κτιρίων, θέσεις δρόμων, παρουσία δένδρων κτλ)
- Ο υπολογισμός της μέσης λαμβανόμενης ισχύος ή της απώλειας διάδοσης γίνεται με βάση τις τιμές της μέσης λαμβανόμενης ισχύος ή της απώλειας διάδοσης σε μία συγκεκριμένη απόσταση αναφοράς πομπού – δέκτη d_0 (Η d_0 πρέπει να είναι σχετικά μικρή αλλά να ανήκει στο μακρινό πεδίο)

Μοντέλο ανάλογα με τις συνθήκες διάδοσης

Models	Frequency Range	Applicable	Different terrain support/comments
ITU Terrain Model	Any	LOS	Support all terrains/based on diffraction theory
Egli model	Not specified	LOS	Not applicable in the foliage area
Early ITU model	Not specified	LOS	Support vegetation obstacles/ suitable for microwave link
Weissberger's model	230 MHz-95 GHz	LOS	Only applicable when foliage obstruction in the microwave link
Okumura model	200 MHz-1920 MHz	LOS/NLOS	Ideal in the city area
Hata model	150 MHz-1500 MGz	LOS/NLOS	Support all terrains/ limited antenna height 10 m. in small city
Lee model (Area to Area)	900 MHz	LOS/NLOS	Use more correction factors to make it flexible in all conditions
Lee model (Point to point)	900 MHz	LOS	Use more correction factors to make it flexible in all conditions
Longley –Rice model	20 MHz-20 GHz	LOS/NLOS	Suitable in VHF and UHF use

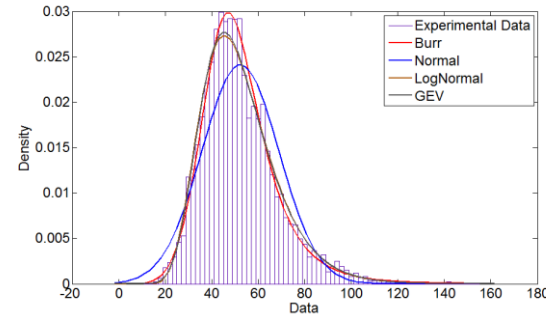
Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων - Τροποσφαιρικά

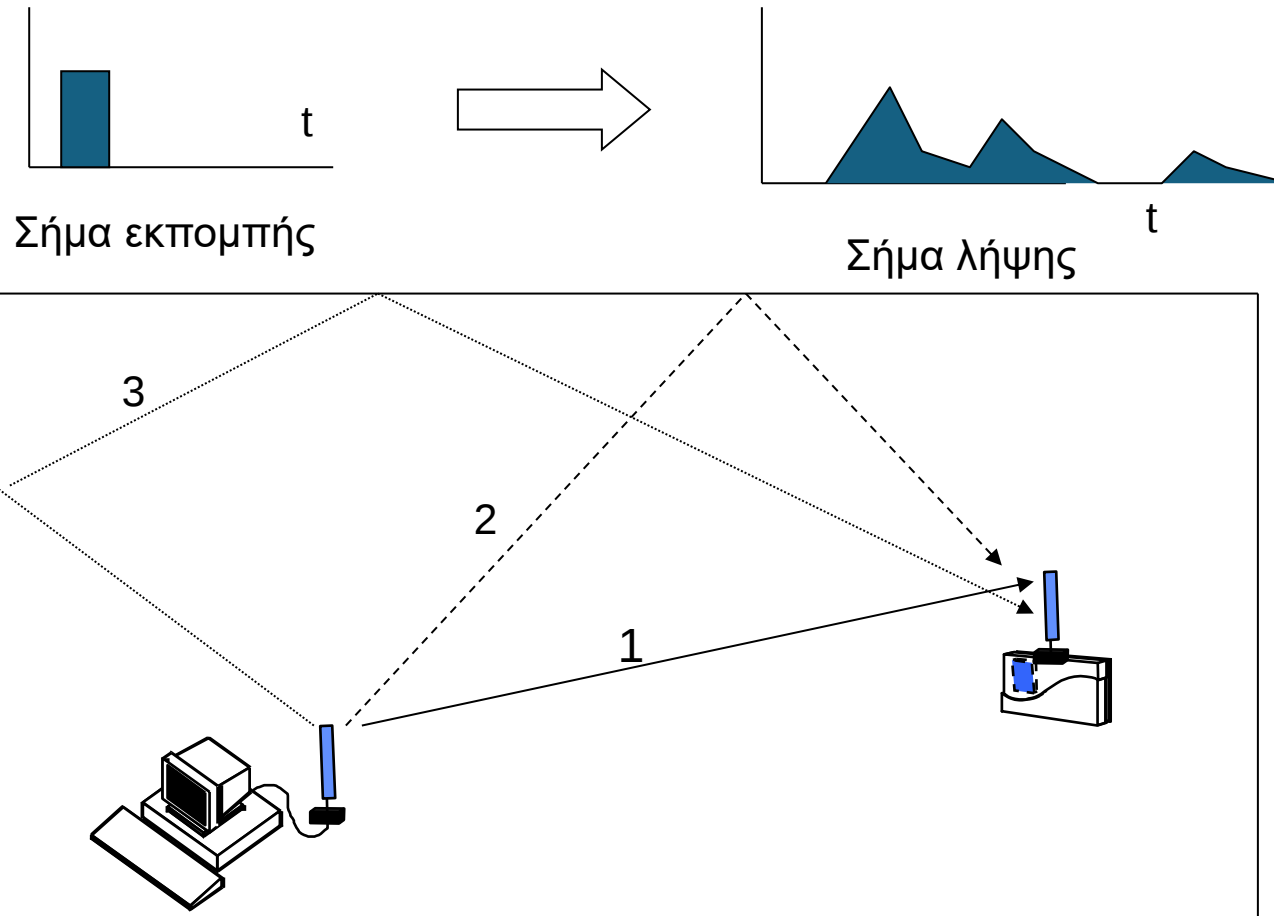
- Εμπειρικά μοντέλα
 - Χρήση δεδομένων από μετρήσεις
 - Περιγράφουν την στατιστική κατανομή των δεδομένων που μετρήθηκαν



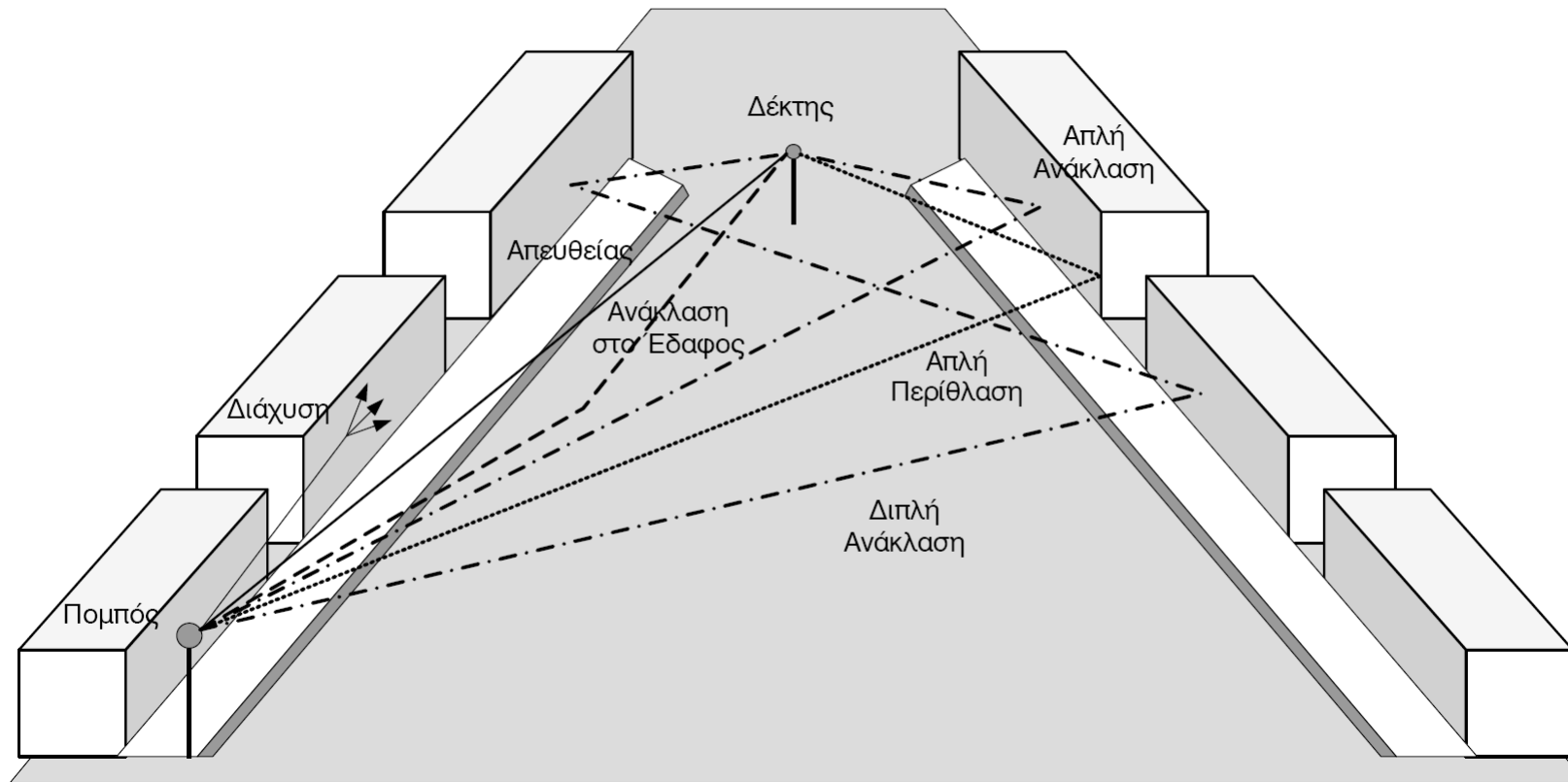
- Okumura-Hata
 - Cost-231
 - ..
- Στατιστικά
 - Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας
 - Rayleigh, Rician, Lognormal
 - Περιγραφή των **διαλείψεων**
- Αναλυτικά Μοντέλα



Πολλαπλά μοντέλα για πολλαπλά σήματα

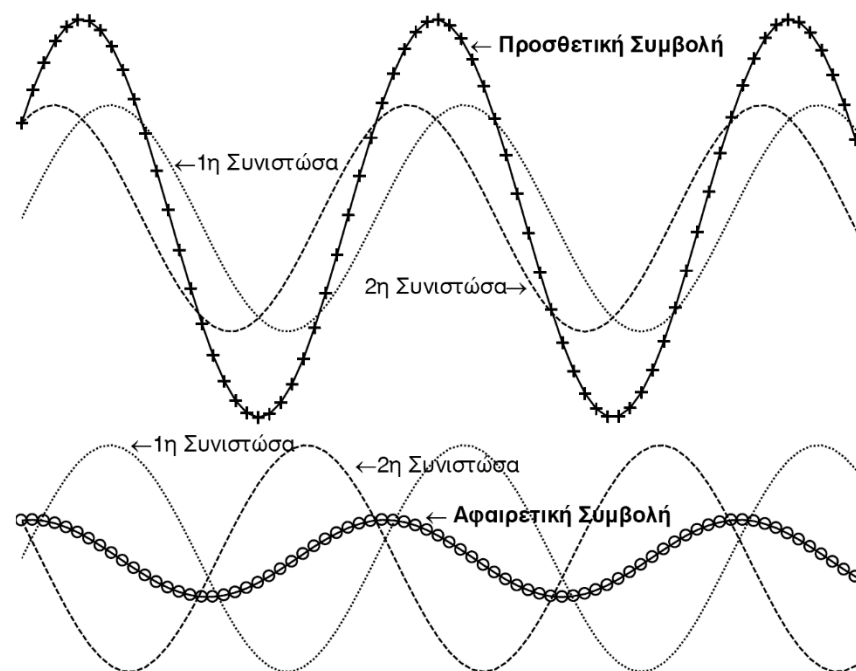


Περιβάλλον Διάδοσης=Διαλείψεις



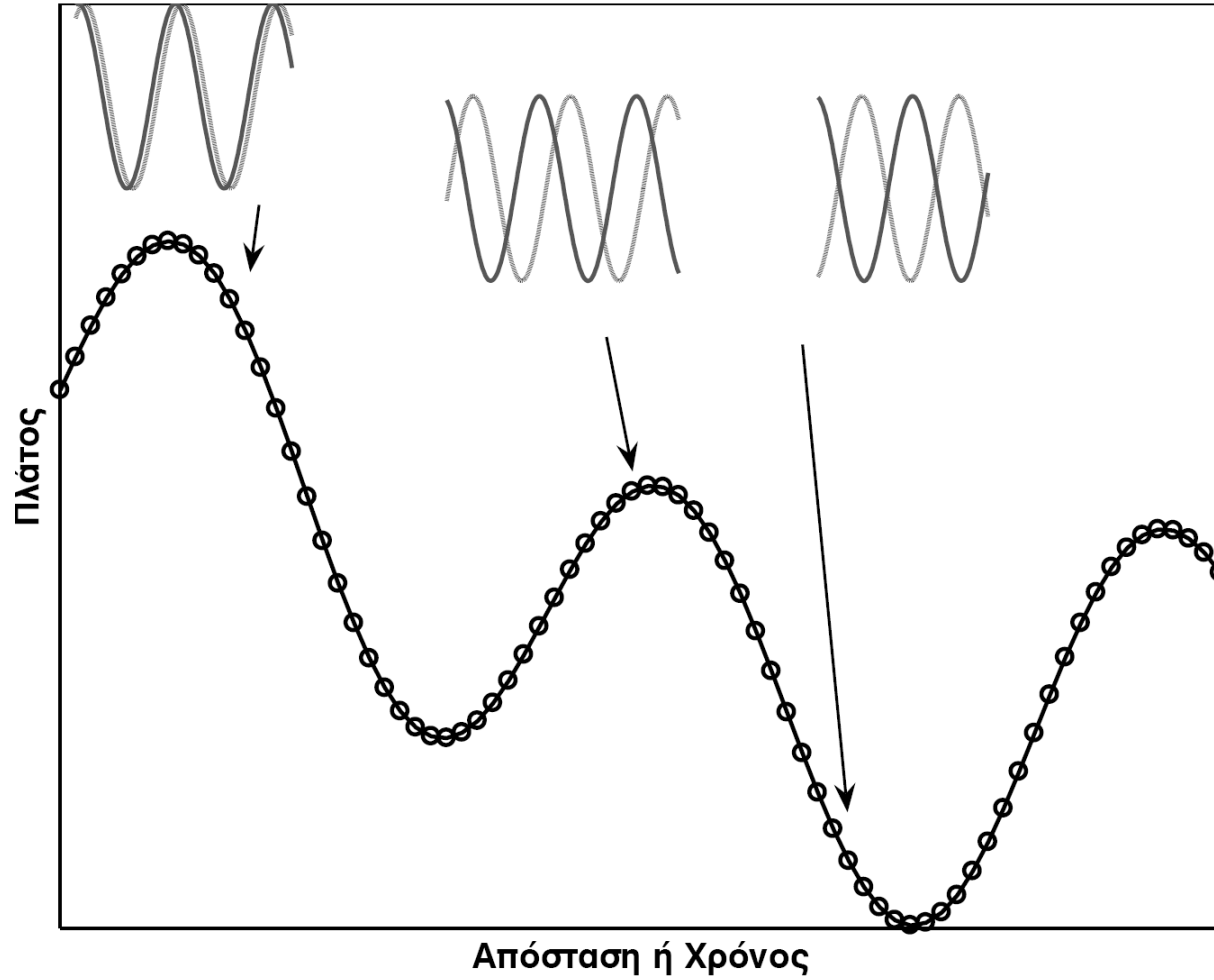
Ανάλογα με το περιβάλλον, ο δέκτης λαμβάνει πολλαπλές συνιστώσες (εκδόσεις) του ίδιου σήματος

Συμβολή Κυμάτων



- Διαφορετικό μονοπάτι = Ολίσθηση φάσης = Αφαιρετική ή Προσθετική συμβολή
- Κινούμενο δέκτης ή/και κινούμενα αντικείμενα = Πλήρως δυναμικό περιβάλλον

Χωρική Μεταβολή Περιβάλλουσας (πλάτους)



Απώλειες Ελευθέρου Χώρου

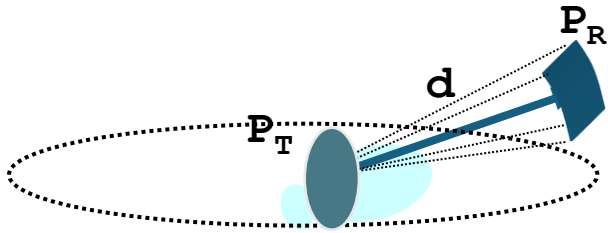
► Ισχύς λήψης στο δέκτη

Σημειακή ισχύς λήψης
σε απόσταση d

$$P_{Di} = \frac{P_T}{4\pi d^2} W / m^2$$

Ισοτροπική πυκνότητα ισχύος

Εμβαδόν επιφάνειας
σφαίρας



$$P_D = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2}$$

Πυκνότητα ισχύος στην κατεύθυνση
της μέγιστης ακτινοβολουμένης ισχύος

$$P_R = P_D A_{eff}$$

Ισχύς που φθάνει στην δέκτη

$$P_R = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} A_{eff}$$

$$\frac{A_{eff}}{G_R} = \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

Από τον τύπο της
απολαβής δέκτη με βάση
την ενεργό περιοχή

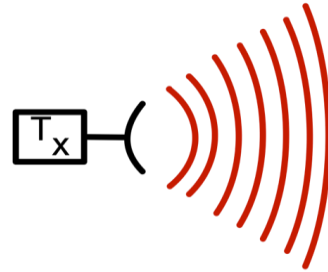
Υπολογισμός της ισχύος του
λαμβανομένου σήματος όταν ο πομπός
και ο δέκτης έχουν οπτική επαφή

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

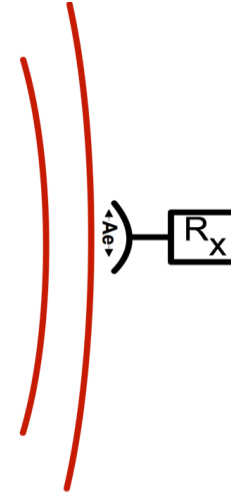
Εξίσωση του **Friis**
για την διάδοση
στον ελεύθερο χώρο

Απώλειες Ελευθέρου Χώρου

$$A_e = \frac{\lambda^2 G_r}{4\pi}$$



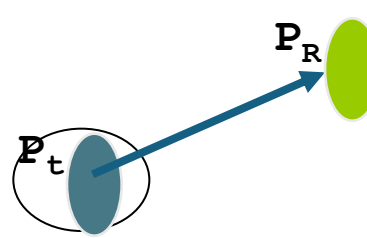
...



Ενεργό άνοιγμα
Ενεργή περιοχή
Ενεργή επιφάνεια

Απώλειες Ελευθέρου Χώρου

► Υπολογισμός απωλειών


$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$
$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \frac{0.57 \cdot 10^{-3}}{(df)^2} \quad \begin{array}{l} f \text{ is in MHz} \\ d \text{ is in Km} \end{array}$$
$$\left(\frac{P_R}{P_T} \right)_{dB} = (G_T)_{dB} + (G_R)_{dB} - (32.5 + 20 \log_{10} d + 20 \log_{10} f)$$

Απώλειες διαδρομής (Path Loss) είναι η απόσβεση του σήματος (μετρημένη σε dB) δηλαδή ο λόγος της εκπεμπόμενης ως προς την λαμβανομένη ισχύ (χωρίς να ληφθούν υπ' όψη τα κέρδη των κεραιών).

$$L = 32,5 + 20 \log d_{Km} + 20 \log f_{MHz}$$

$$L = 22 - 20 \log \lambda_m + 20 \log d_m$$

Απώλειες Ελευθέρου Χώρου

$$L=32,5 + 20 \log d_{km} + 20 \log f_{MHz}$$

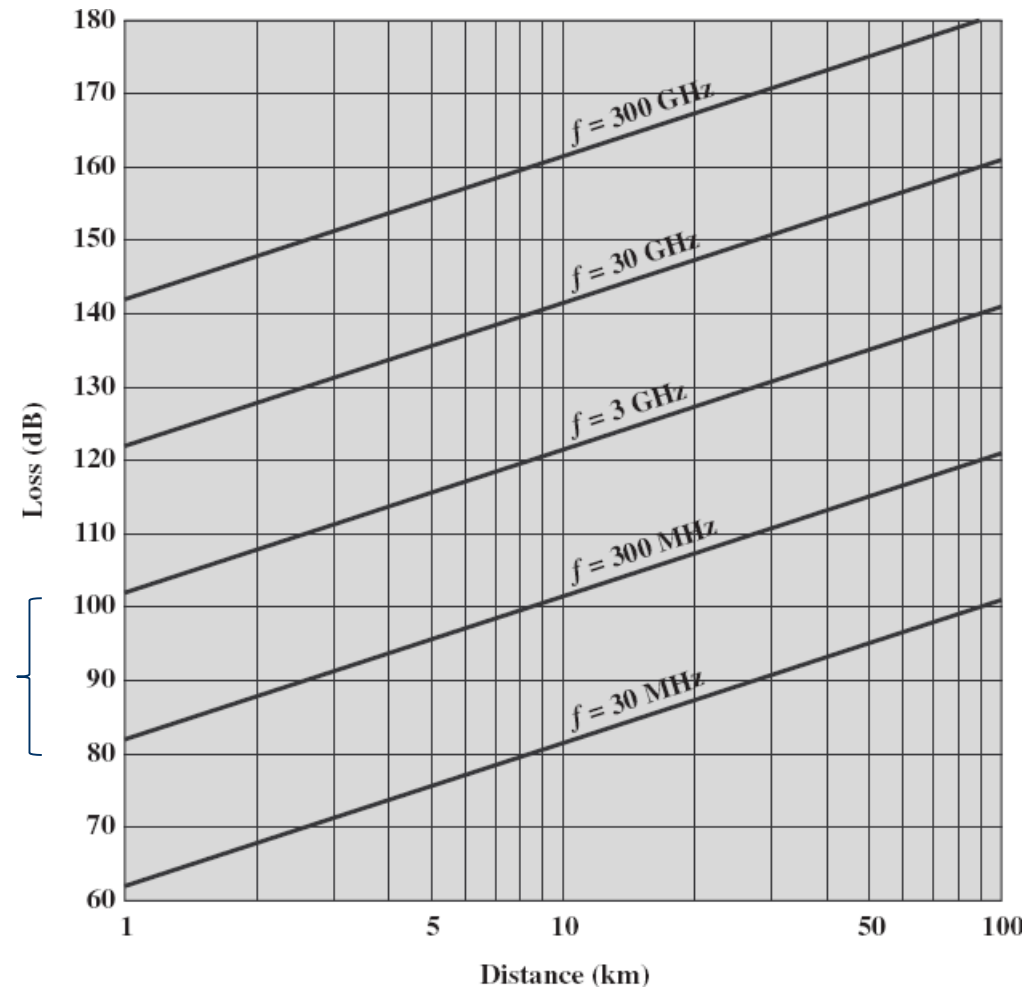
$$L=22 - 20 \log \lambda_m + 20 \log d_m$$

10πλασιασμός απόστασης = +20db απώλειες

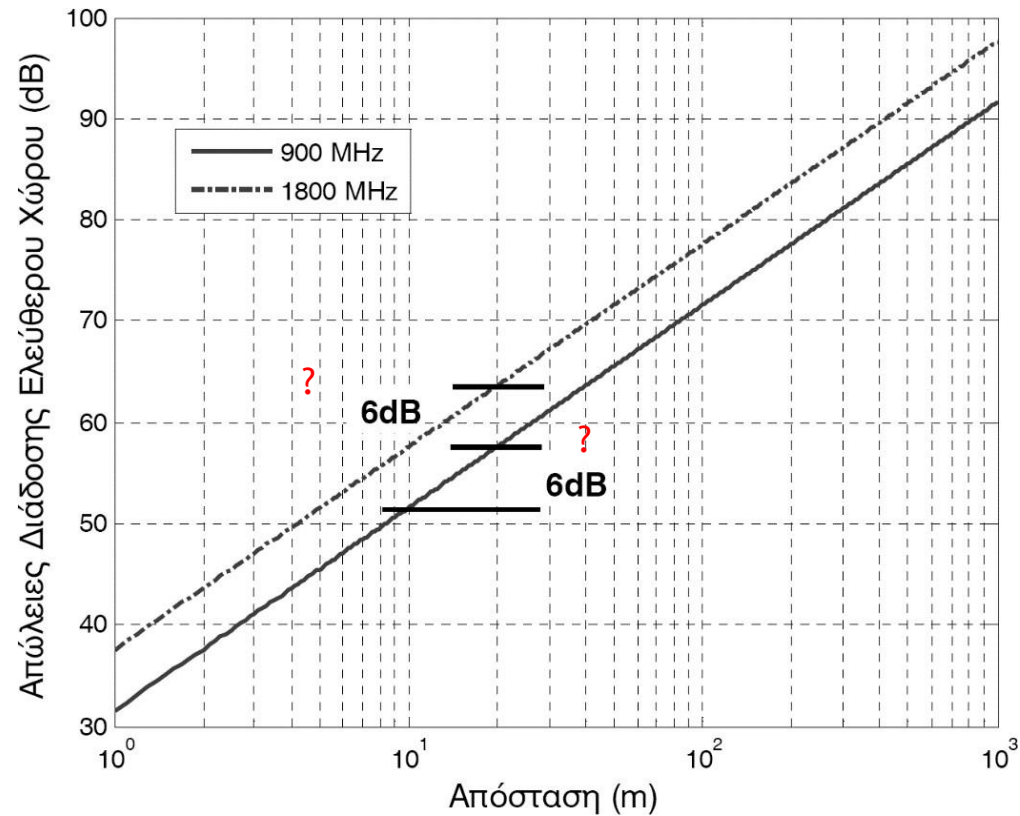
2πλασιασμός απόστασης = +6db απώλειες

Ομοίως για συχνότητα

Απώλειες Ελευθέρου Χώρου

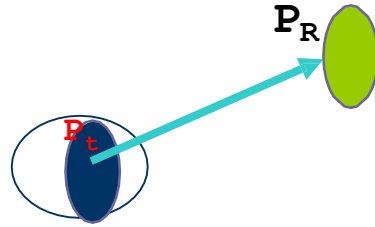


Απώλειες Ελευθέρου Χώρου



2 συχνότητες συστήματος GSM
Ομοίως για WiFi στα 2,4GHz και 5GHz

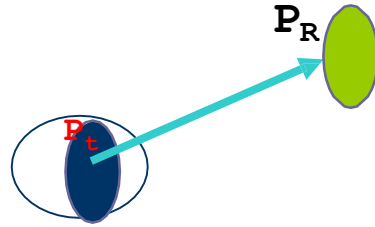
Απώλειες Ελευθέρου Χώρου



Οι κεραίες είναι ιστροπικές. Ποια είναι η λαμβανομένη ισχύς P_R (σε dBm) σε απόσταση **100m** από την κεραία εκπομπής? Ποια είναι η P_R στα **10Km**?

$P_t = 50 \text{ W} = 47 \text{ dBm}$ $f = 900 \text{ MHz}$ (Αν έχουμε $f = 1000 \text{ MHz}$?)

Απώλειες Ελευθέρου Χώρου



Οι κεραίες είναι ιστροπικές. Ποια είναι η λαμβανομένη ισχύς P_R (σε dBm) σε απόσταση **100m** από την κεραία εκπομπής? Ποια είναι η P_R στα **10Km**?

$P_t = 50 \text{ W} = 47 \text{ dBm}$ $f = 900 \text{ MHz}$ (Αν έχουμε $f = 1000 \text{ MHz}$?)

$$\left(\frac{P_R}{P_T} \right)_{dB} = (G_T)_{dB} + (G_R)_{dB} - (32.5 + 20 \log_{10} d + 20 \log_{10} f)$$

$$\left(\frac{P_R}{P_T} \right)_{dB} = 0 + 0 - (32.5 - 20 \log_{10} d + 20 \log_{10} 900)$$

-20 (για $d = 0.1 \text{ Km}$)

20 (για $d = 10 \text{ Km}$)

59

$$\left(\frac{P_R}{P_T} \right)_{dB} = -71.5 \text{ dB}$$

$$\left(\frac{P_R}{P_T} \right)_{dB} = -111.5 \text{ dB}$$

$$(P_R)_{dBm} = 47 \text{ dBm} - 71.5 \text{ dB} = -24.5 \text{ dBm}$$

$$(P_R)_{dBm} = 47 \text{ dBm} - 111.5 \text{ dB} = -64.5 \text{ dBm}$$

Απώλειες Ελευθέρου Χώρου

Προσοχή
σε dBm

Εμβέλεια συστήματος

Σταθμός Βάσης (ΣΒ) κινητής τηλεφωνίας εκπέμπει ραδιοκύματα συχνότητας 1800 MHz με ισχύ $P_{BS} = 1 \text{ W}$ και λαμβάνει με δέκτη που έχει ευαισθησία $P_{thBS} = -110 \text{ dBm}$. Οι κεραιές του έχουν απολαβή ισχύος $G_{BS} = 10 \text{ dBi}$. Οι κινητοί σταθμοί (ΚΣ) έχουν ισχύ εκπομπής $P_{MS} = 0,2 \text{ W}$, ευαισθησία $P_{thMS} = -104 \text{ dBm}$ και απολαβή ισχύος $G_{MS} = 0 \text{ dBi}$. Αν υποθεθεί ότι οι συνθήκες μετάδοσης προσομοιάζουν σε αυτές του ελευθέρου διαστήματος, να εκτιμηθούν α) οι μέγιστες αποδεκτές απώλειες και η εμβέλεια του συστήματος σε κάθε κατεύθυνση.

$$L_{down} = P_{1dB} + G_{1dB} + G_{2dB} - P_{2dB}$$

$$L_{up} = P_{1dB} + G_{1dB} + G_{2dB} - P_{2thdB}$$

$$L_{down} = 10 \log 10^3 + 10 + 0 - (-104) = 144 \text{ dB} \quad \text{ΣΒ προς ΚΣ (κατερχόμενη ζεύξη)}$$

Εμβέλεια μέσω του τύπου:

$$L = 22 - 20 \log \lambda_m + 20 \log d_m$$

λύνοντας ως προς d

ανά κατεύθυνση

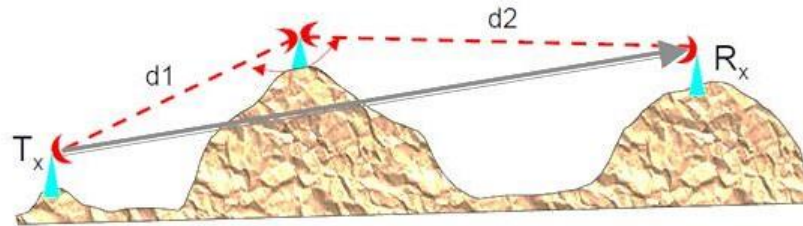
$$\text{Εμβέλεια } D = \min\{d_{down}, d_{up}\}$$

Αναλυτικά μοντέλα – Απώλειες μονοπατιού

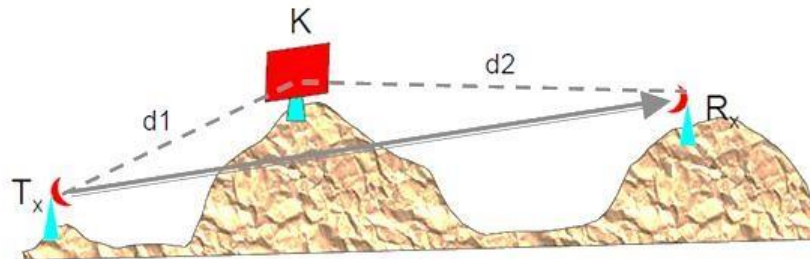
Απώλειες Ελευθέρου Χώρου – Αναμεταδότες

Παθητικοί αναμεταδότες

Παραβολικές κεραίες Back2Back



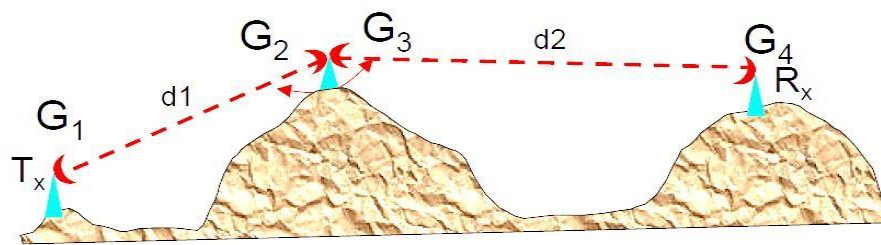
Παθητικά κάτοπτρα



Αναλυτικά μοντέλα – Απώλειες μονοπατιού

Απώλειες Ελευθέρου Χώρου – Αναμεταδότες

Παθητικοί αναμεταδότες (B2B)



$$P_{rx2} = P_{tx1} - (32.4 + 20\log d_1 + 20\log f) + G_1 + G_2$$

Στην έξοδο της κεραίας 2

Στην είσοδο της κεραίας 3

$$P_{rx4} = P_{rx2} - L_w - (32.4 + 20\log d_2 + 20\log f) + G_3 + G_4$$

Απώλειες καλωδίων



Αναλυτικά μοντέλα – Απώλειες μονοπατιού

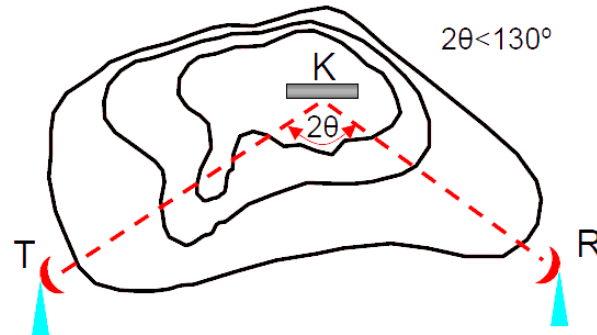
Απώλειες Ελευθέρου Χώρου – Αναμεταδότες

Παθητικοί αναμεταδότες (Κάτοπτρα)

$$\frac{1}{K} = \frac{\pi \cdot \lambda \cdot d}{4 \cdot A \cos \theta}$$

d: απόσταση κάτοπτρου-κεραίας
A: επιφάνεια κατόπτρου σε m²
Acos(θ): ενεργός επιφάνεια

Μακρινό πεδίο (Far field $1/K > 2.5$)



$$G_{PR} = 10 \cdot \log \left(\frac{4\pi \cdot A}{\lambda^2} \cos \theta \right)$$

ανά κατεύθυνση

$$G_{PR} = 20 \cdot \log \left(\frac{4\pi \cdot A}{\lambda^2} \cos \theta \right)$$

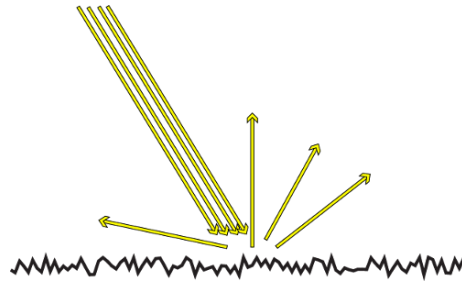
Για εκπομπή και λήψη μαζί

$$L = L_{TK} + L_{KR} - G_T - G_R - G_{PR}$$

Αναλυτικά μοντέλα – Απώλειες μονοπατιού

Απώλειες από σκέδαση

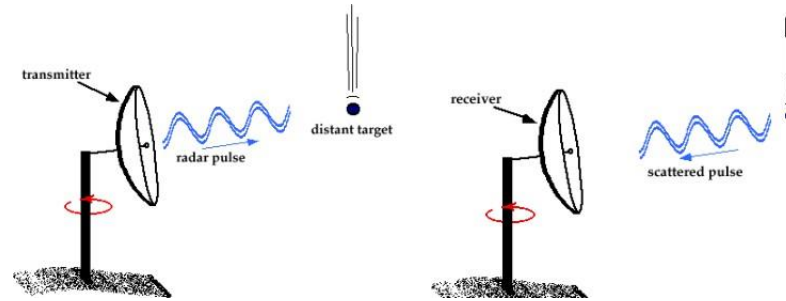
- Είναι το φαινόμενο το οποίο εμφανίζεται όταν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε αντικείμενα με ανώμαλες επιφάνειες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το ηλεκτρομαγνητικό κύμα να διασκορπίζεται προς πολλές και διαφορετικές κατευθύνσεις, άσχετες μεταξύ τους.



Διαστάσεις ανάλογες του λ

Αναλυτικά μοντέλα – Απώλειες μονοπατιού

Απώλειες από σκέδαση



- Υπολογισμός λαμβανόμενης ισχύος από σκέδαση σε αντικείμενο

Η εξίσωση του Radar

$$P_{\Lambda} = P_E \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{64 \pi^3 R^4}$$

P_{Λ} είναι η λαμβανόμενη ισχύς

P_E είναι η εκπεμπόμενη ισχύς

G η απολαβή της κεραίας

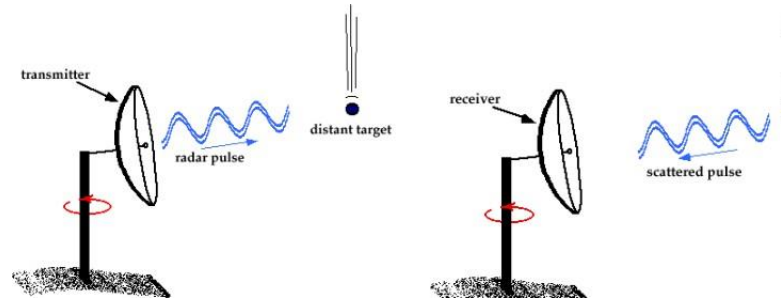
σ διατομή οπισθοσκέδασης

λ μήκος κύματος

R απόσταση

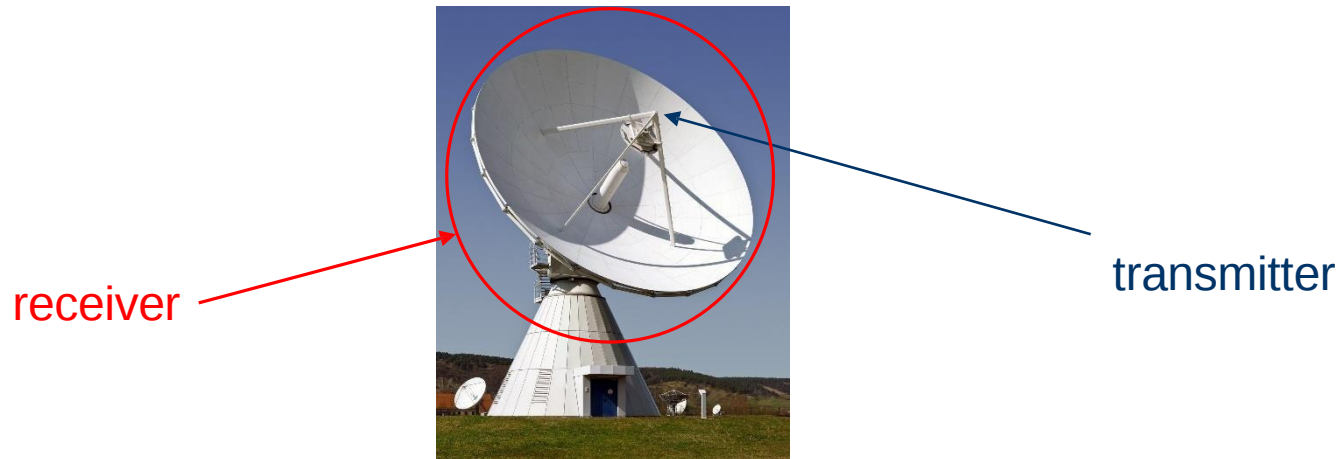
Αναλυτικά μοντέλα – Απώλειες μονοπατιού

Απώλειες από σκέδαση



► Διατομή οπισθοσκέδασης (backscattering cross section)

Ισοδύναμη επιφάνεια που θα χρειαζόταν από ένα ισότροπο σκεδαστή για να επιστρέψει στον δέκτη την ισχύ που πράγματι λαμβάνεται.

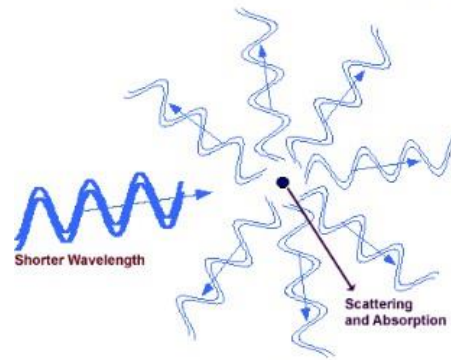


Αναλυτικά μοντέλα – Απώλειες μονοπατιού

Απώλειες από σκέδαση

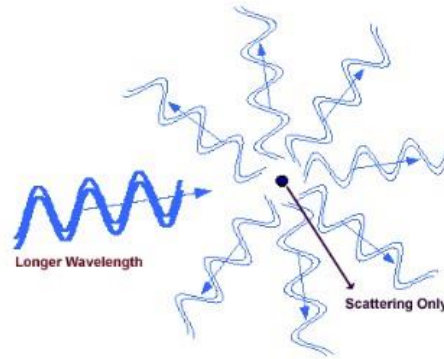
Εξασθένιση λόγω βροχής

πιο έντονη όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος



ατμοσφαιρικά αέρια
οι μικρές σταγόνες βροχής
τα σταγονίδια νεφών

→ εξασθένιση λόγω απορρόφησης



μεγάλες σταγόνες βροχής
το χιόνι
το χαλάζι

→ εξασθένιση λόγω απορρόφησης
και σκέδασης

R απόσταση

Ισοζύγιο Ζεύξης - Θόρυβος

- **Θόρυβος:** οποιοδήποτε σήμα που δεν ανήκει στο σήμα που μεταφέρει την πληροφορία
- Ο θόρυβος είναι συνήθως:
 - Στοχαστικός (Gaussian)
 - λευκός: έχει την ίδια ισχύ σε όλες τις συχνότητες
 - προσθετικός: δρα προσθετικά στο μεταδιδόμενο σήμα
- Το επίπεδο θορύβου (ισχύς) εκφράζεται σε σχέση με το μεταδιδόμενο σήμα από το λόγο ισχύος σήματος προς θόρυβο (S/N ή SNR) ή σηματοθορυβική σχέση



Ισοζύγιο Ζεύξης - Θόρυβος

- Υπάρχουν πολλά είδη θορύβου ανάλογα με τα αίτια δημιουργίας του
 - θόρυβος από παρεμβολές
 - θόρυβος ενδοδιαμόρφωσης
 - θόρυβος από εξωτερικές πηγές
 - **θερμικός θόρυβος (Noise floor)**
- **Θόρυβος από παρεμβολές**
 - δημιουργείται από την επίδραση του σήματος ενός χρήστη στο σήμα κάποιου άλλου
 - εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται από κοινού το κανάλι (μηχανισμός πρόσβασης)
- **Θόρυβος ενδοδιαμόρφωσης**
 - δημιουργείται λόγω ατέλειας των τηλεπικοινωνιακών διατάξεων
- **Θόρυβος από εξωτερικές πηγές**
 - πολλές συσκευές λόγω κατασκευαστικών ατελειών παράγουν εκπομπές σε διάφορες συχνότητες
 - συχνή είναι η δημιουργία παλμών θορύβου (κρουστικός θόρυβος)
 - μεγάλη ισχύς σε μικρή διάρκεια

Ισοζύγιο Ζεύξης - Θόρυβος

- **Θερμικός θόρυβος: $N_o = k \cdot T$**

- k – σταθερά του Boltzmann,
- T – θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin
- **Εύρος φάσματος - Bandwidth**

Σε θερμοκρασία δωματίου, 100kHz

$$N_o = -174 \text{ dBm} / \text{Hz}$$



$$N = -174 + 10 \log(B_{\text{Hz}})$$

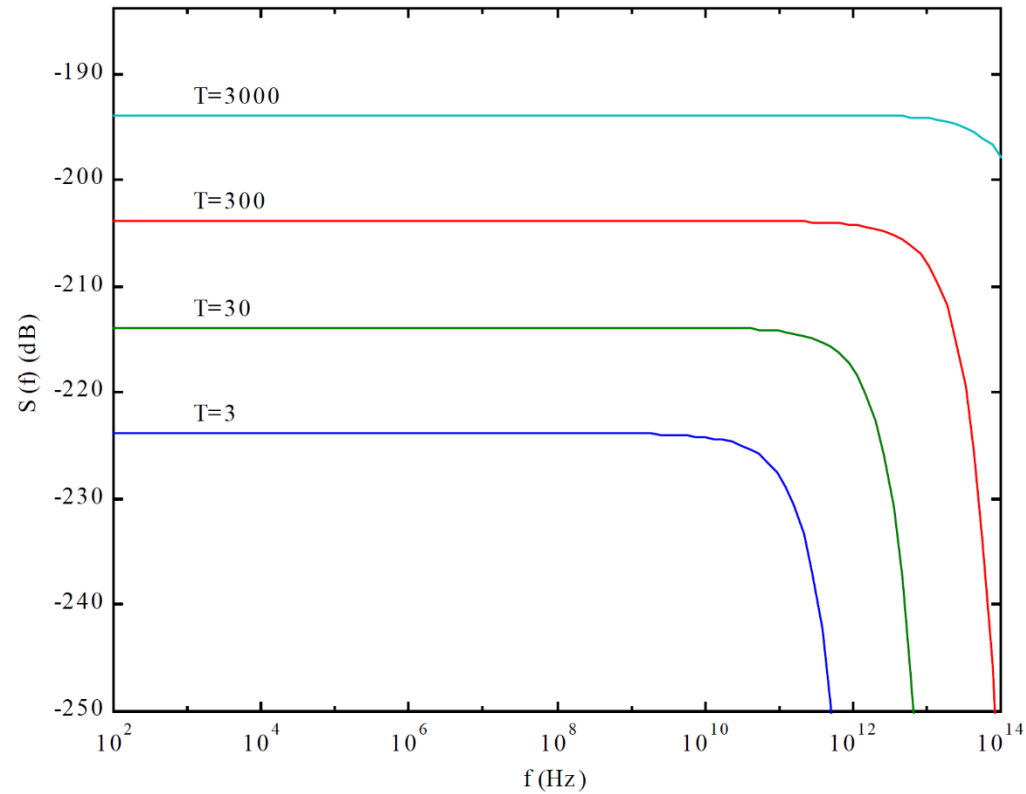


Noise Floor (dBm)

- προκαλείται στον πομπό και στο δέκτη
- αιτία: θερμική κίνηση των ηλεκτρονίων
- εξαρτάται από τη θερμοκρασία
- δεν μπορεί να εξαλειφθεί

- **Noise Figure (NF σε dB)** αποτελεί τον θόρυβο που δημιουργεί ηλεκτρονική διάταξη του δέκτη, και προστίθεται στο Noise Floor

Ισοζύγιο Ζεύξης – Θερμικός θόρυβος



Power Spectral Density of Thermal Noise

$$S(f) = \frac{hf}{\exp\left\{\frac{hf}{kT}\right\} - 1}$$

$$h = 6.6254 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

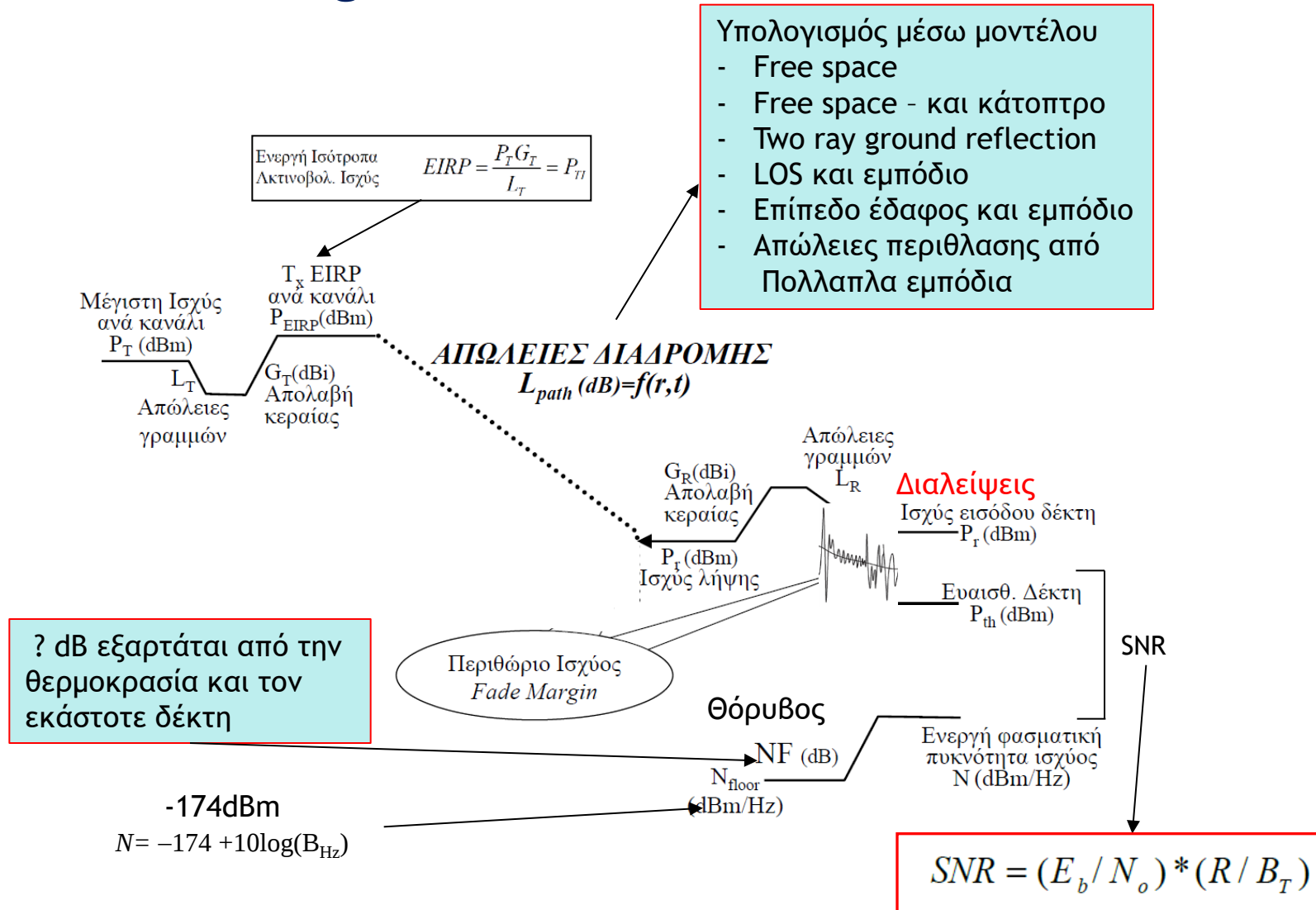
$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} / \text{K}$$

for $hf \ll kT$

$$S(f) \approx kT$$

$$N_0 = kT_{eq}$$

Link budget



Παράδειγμα

- Σε ζεύξη με πανκατευθυντικές κεραίες, σε απόσταση $d=1\text{km}$ και $f=1\text{GHz}$
- Δέκτης σε θερμοκρασία δωματίου ($N_0=-174\text{dBm/Hz}$), Noise Figure=15dB,
- Απώλειες Path loss ελευθέρου χώρου, $32.4+20\log d+20\log f$
- Επιθυμούμε $E_b/N_0=13\text{ dB}$, $R=40\text{kbps}$, $B=80\text{kHz}$
- Ποια η ελάχιστη ισχύ εκπομπής?

Παράδειγμα

- Σε ζεύξη με πανκατευθυντικές κεραίες, σε απόσταση $d=1\text{km}$ και $f=1\text{GHz}$
- Δέκτης σε θερμοκρασία δωματίου ($N_0=-174\text{dBm/Hz}$), Noise Figure=15dB,
- Απώλειες Path loss ελευθέρου χώρου, $32.4+20\log(d)+20\log(f)$ ($d(\text{km})$ $f(\text{MHz})$)
- Επιθυμούμε $E_b/N_0=13\text{ dB}$, $R=40\text{kbps}$, $B=80\text{kHz}$
- Ποια η ελάχιστη ισχύ εκπομπής?

Λύση

- $L = 32.4 + 20\log 1 + 20\log 10^3 = 92.4\text{dB}$
- $E_b/N_0 = 13\text{ dB} \rightarrow E_b/N_0 = 20$
- $E_b/N_0 * (R/B) = 20 * (40/80) = 10 \rightarrow \text{SNR} = 10\text{ dB}$
- $\text{NoiseFloor} + \text{NF} + \text{SNR} + \cancel{\text{FM}} = P_{\text{tr}} + \cancel{G_{\text{tr}}} + \cancel{G_{\text{r}}} - L \dots$ (λύνω ως προς P_{tr})
- $\text{NoiseFloor} = -174 + 10\log(B_{\text{Hz}}) = -174 + 10\log(80 \cdot 10^3)$
 $= -174 + 10\log(2^3) + 10\log(10^3) = -174 + 3 \cdot 3 + 3 \cdot 10 = -174 + 9 + 30 = -135$

$$P_{\text{tr}} = -135 + 15 + 10 + 92.4 = -17.6\text{dBm}$$