

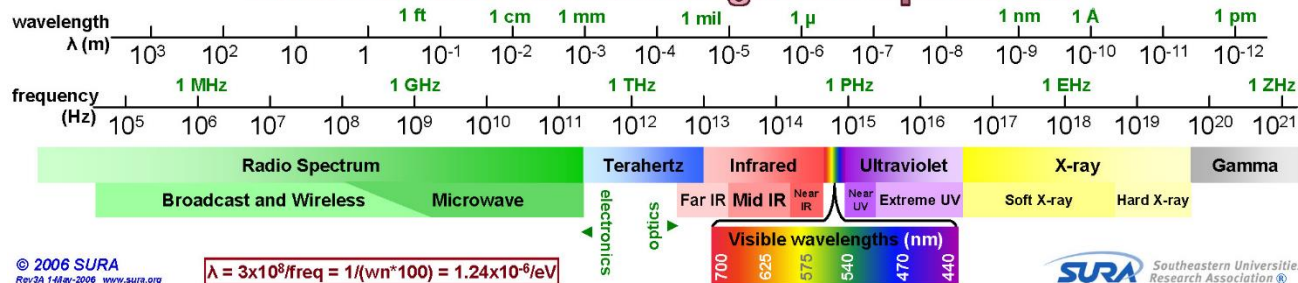
# Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

## Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

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

Όνομασία 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

### Chart of the Electromagnetic Spectrum



# Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

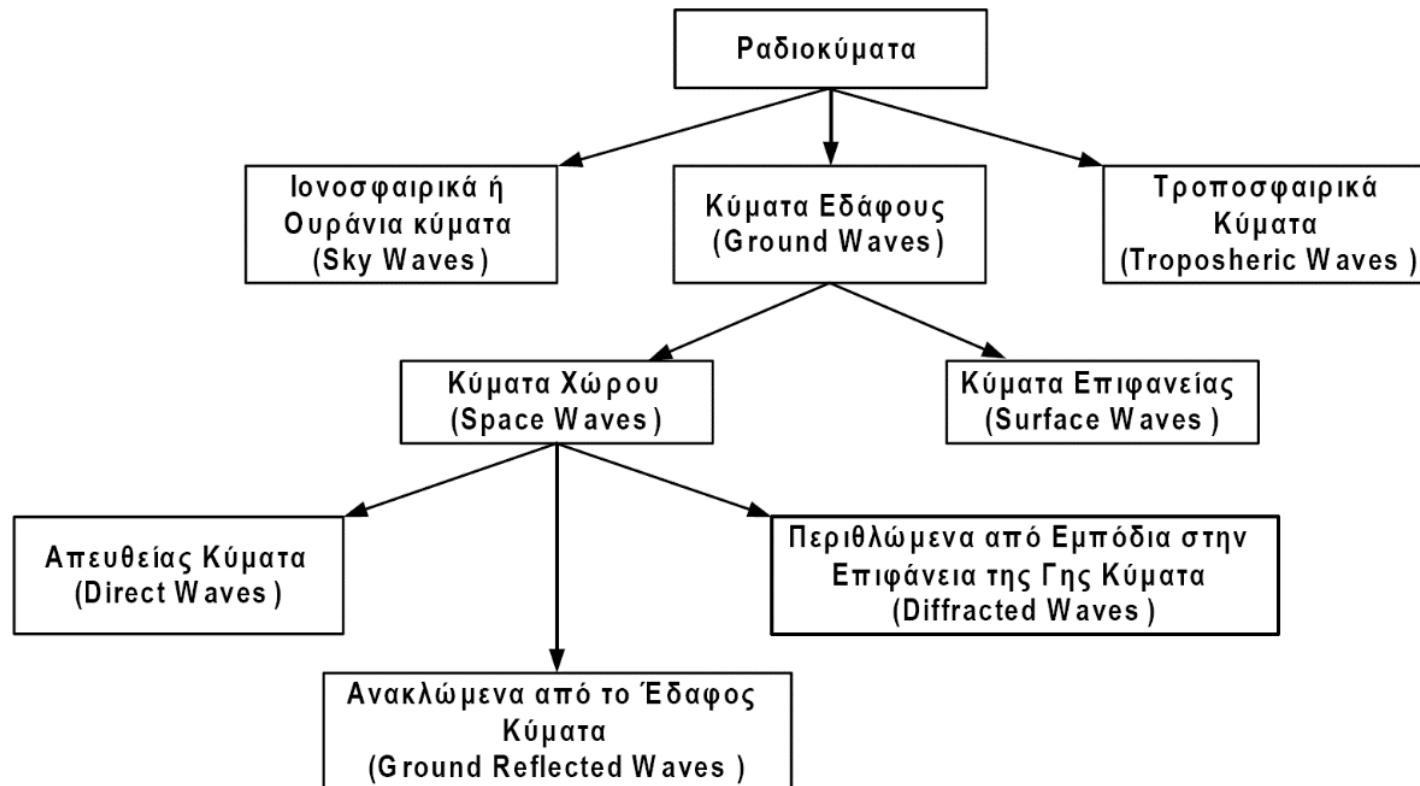
## Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

- 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

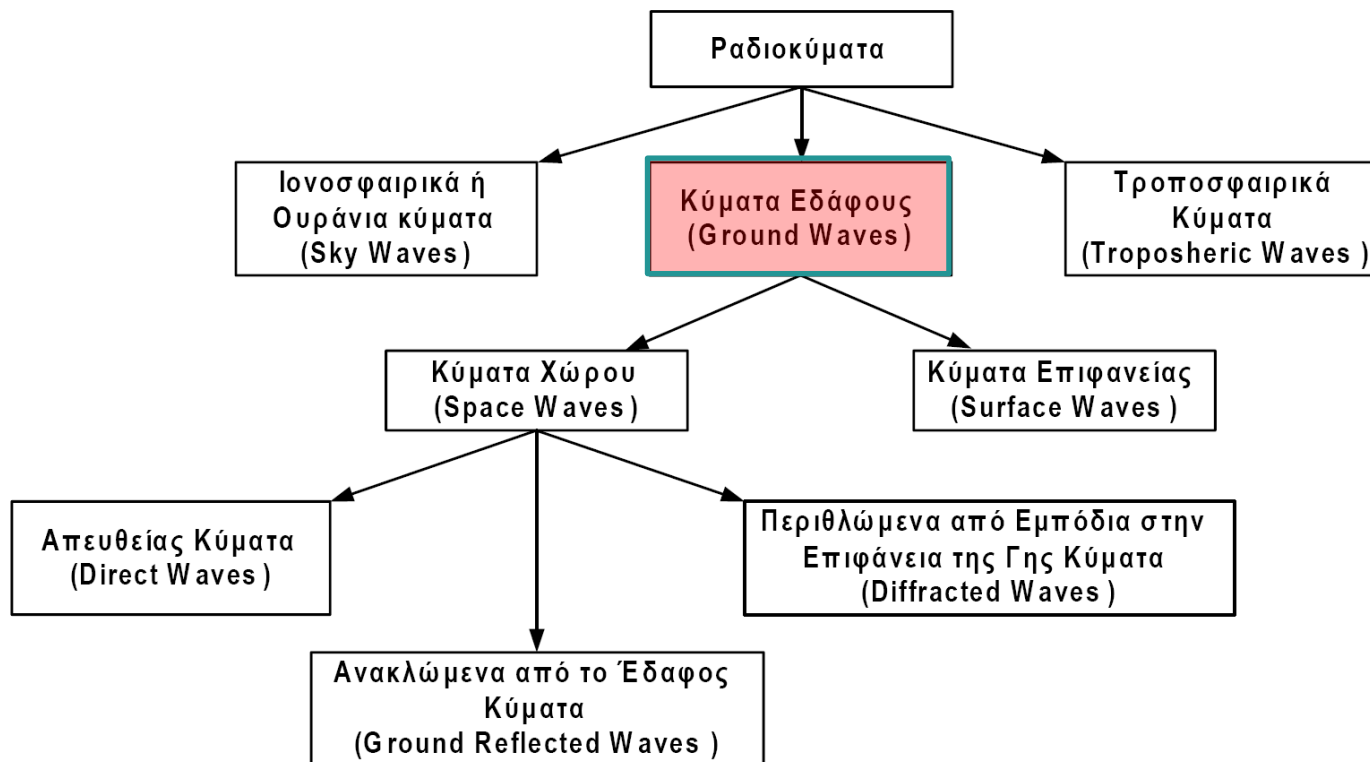
## Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

- 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

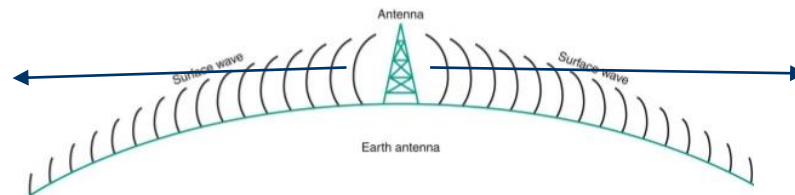
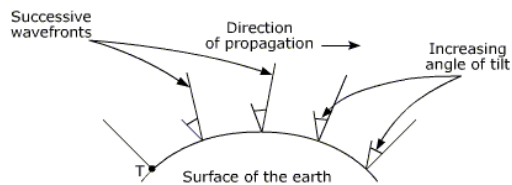


# Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

## 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  $< 3$  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

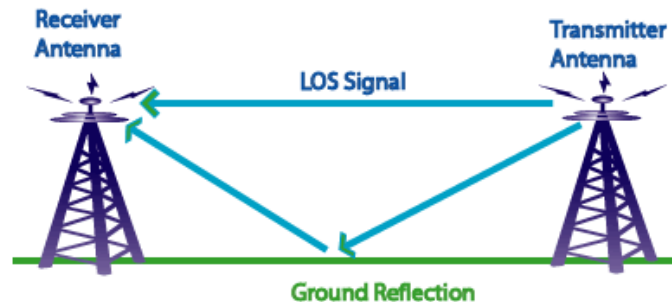


# Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

## 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

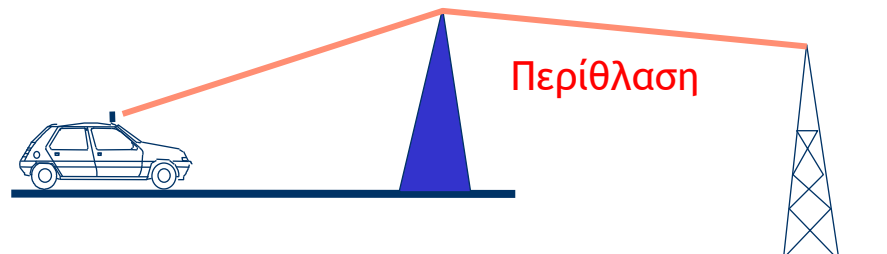


# Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

## Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων – Κύματα χώρου

### Space Wave - Non-LOS propagation

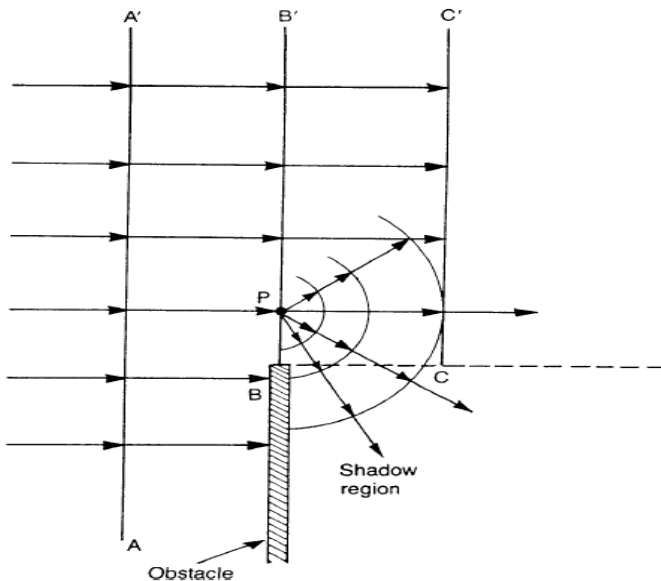
- Περιγράφει την ύπαρξη σήματος σε θέσεις που δεν υπάρχει οπτική επαφή λόγω ύπαρξης **εμποδίων** (δεν είναι όλα τα αντικείμενα εμπόδια)
- **Κατηγοριοποίηση με βάση τις διαστάσεις του εμποδίου**
  - Εμπόδιο με διαστάσεις  $\gg$  μήκους κύματος (μεγάλη συχνότητα)
    - Οι ιδιότητες του μέσου καθορίζουν την πορεία του κύματος
  - Εμπόδιο με διαστάσεις  $\ll$  μήκους κύματος (μικρή συχνότητα)
    - Π.χ. ένα κύμα συχνότητας 200KHz έχει μήκος κύματος  $\sim 1500$  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.

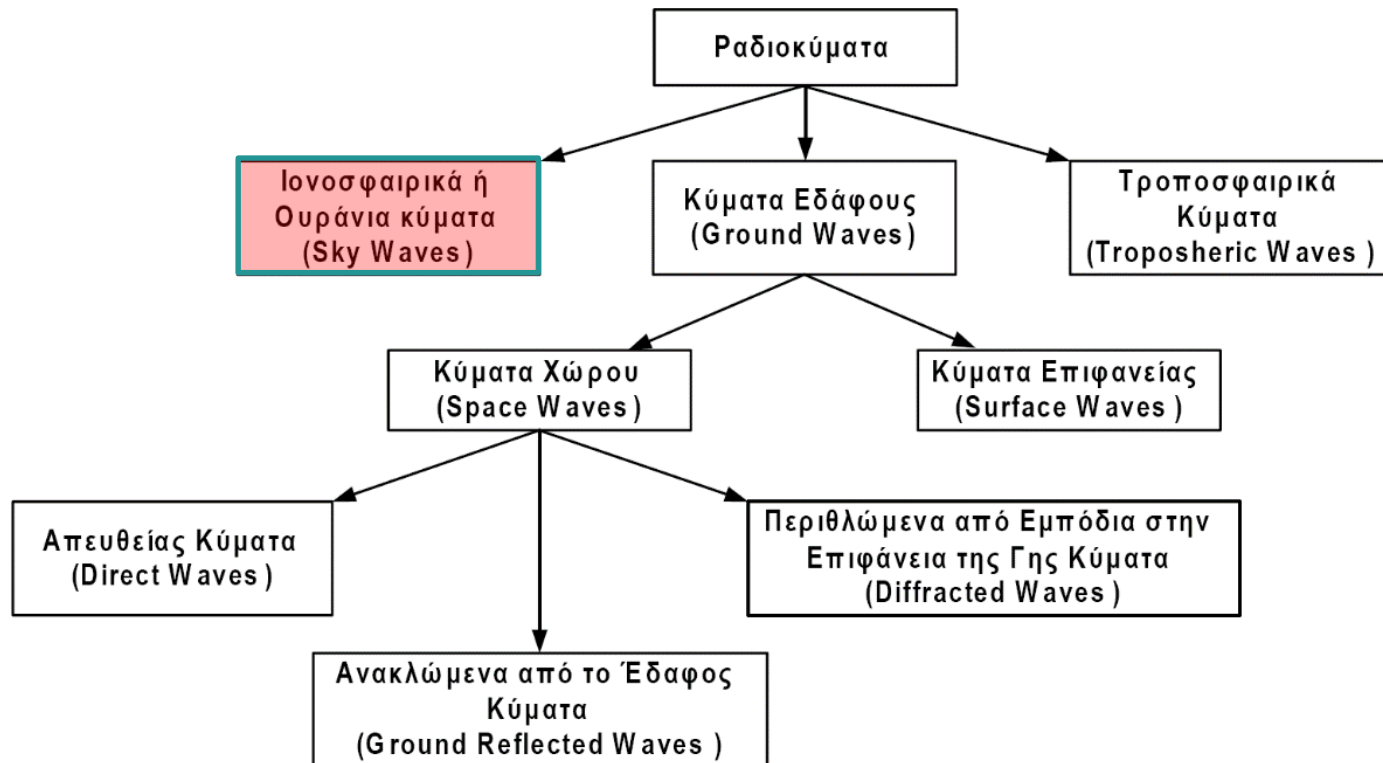
Με τη σειρά τους, όλα τα δευτερεύοντα κύματα κατά μήκος του μετώπου συνθέτονται για τη δημιουργία πιο προχωρημένων μετώπων

**Κύμα «πίσω από το εμπόδιο» - Περίθλαση**

# Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

## Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

- Κατηγοριοποίηση κυμάτων με βάση τον τρόπο διάδοσης

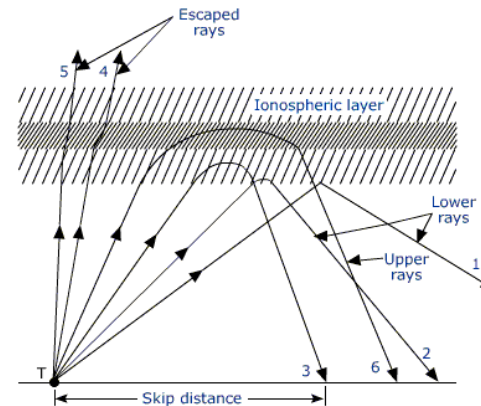
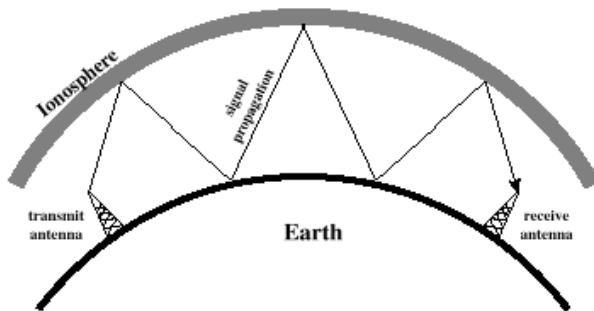


# Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

## 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

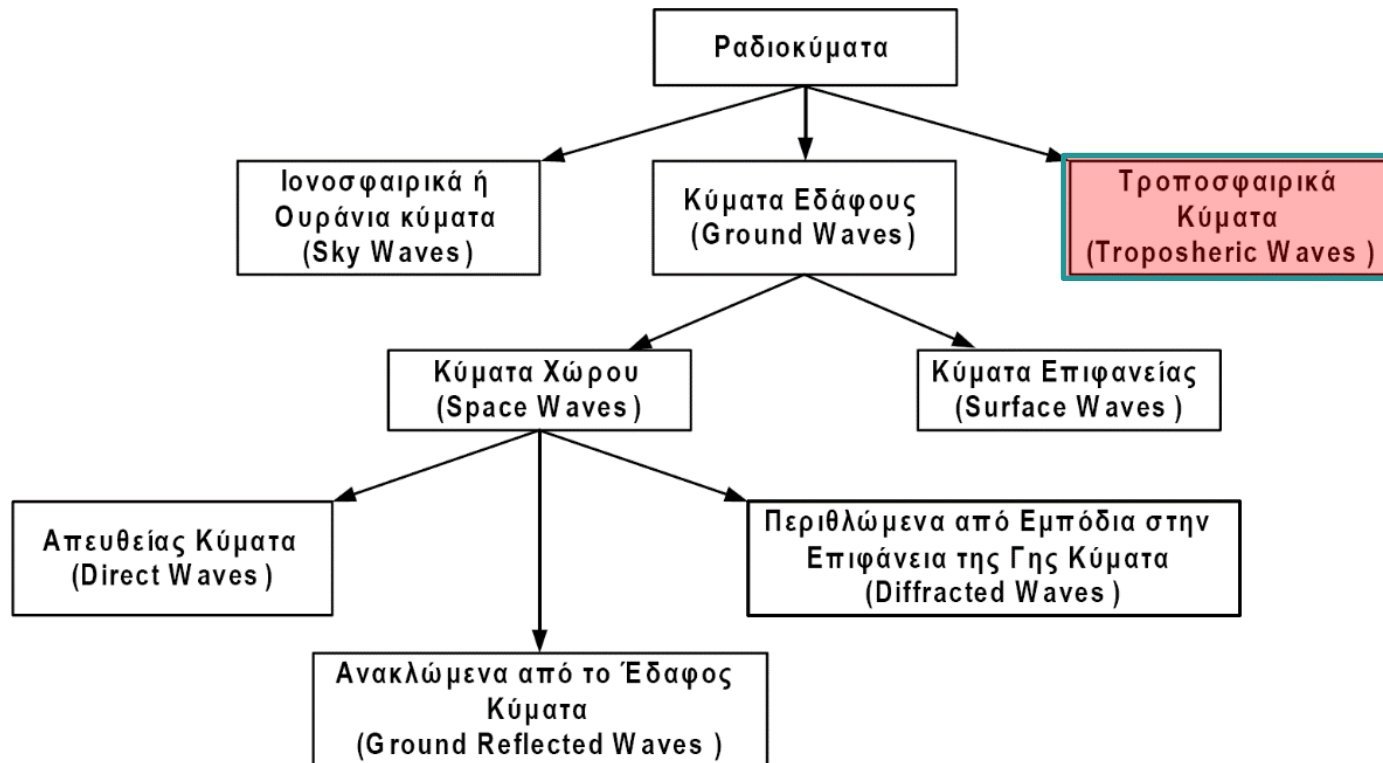
Name	Abbreviation Frequency	Frequency	Wave length
Very low	VLF	3 to 30 kHz	100 to 10km
Low	LF	30 to 300 kHz	10 to 1km
Medium	MF	300 to 3000 kHz	1km to 100 m
High	HF	3 to 30 MHz	100 to 10m
Very high	VHF	30 to 300 MHz	10 to 1cm
Ultrahigh	UHF	300 to 3000 MHz	1m to 10cm
Super high	SHF	3 to 30 GHz	10 to 1cm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



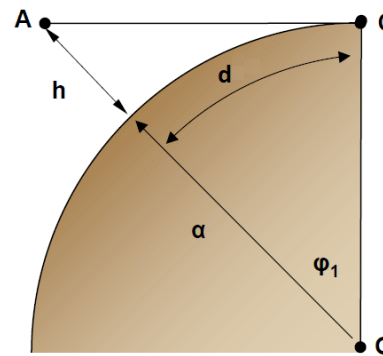
# Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

## 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

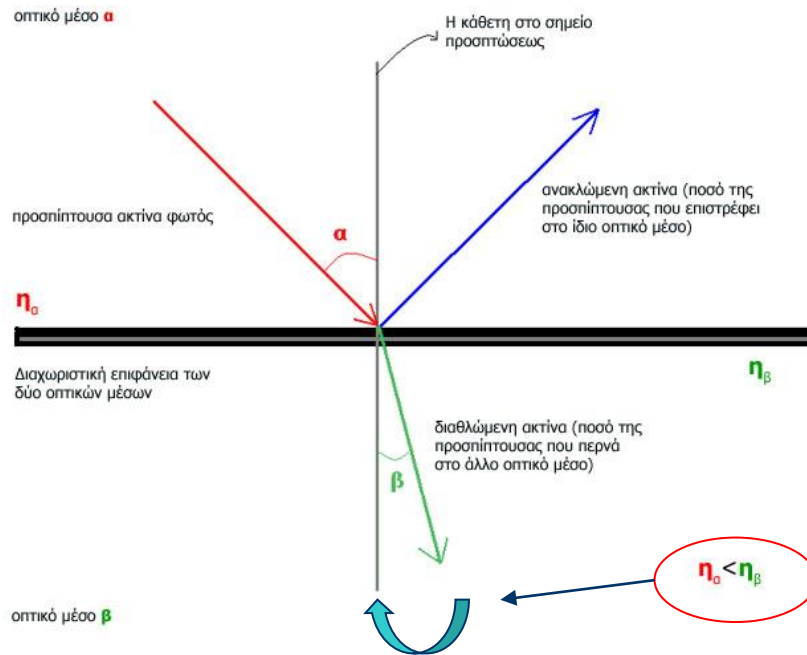
$$d = \sqrt{2ah} \text{ m}$$

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

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

# Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

## Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων - Τροποσφαιρικά



νόμος του Σνέλ (Snell)

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} &= \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \end{aligned} \right\} \text{Δείκτες διάθλασης}$$

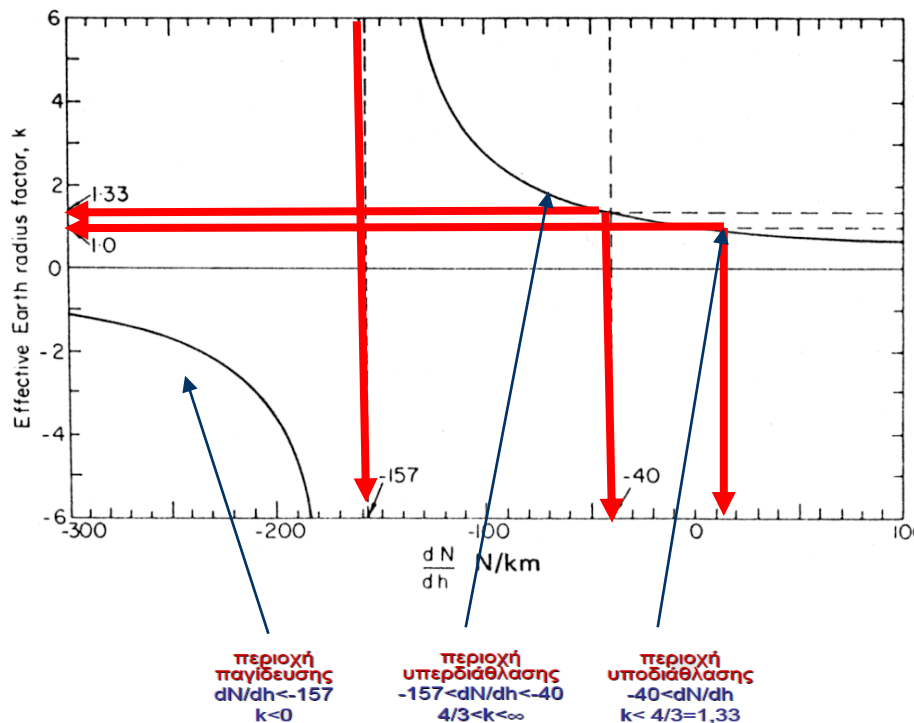
«σχεδόν» ευθεία και με μειούμενη ταχύτητα

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

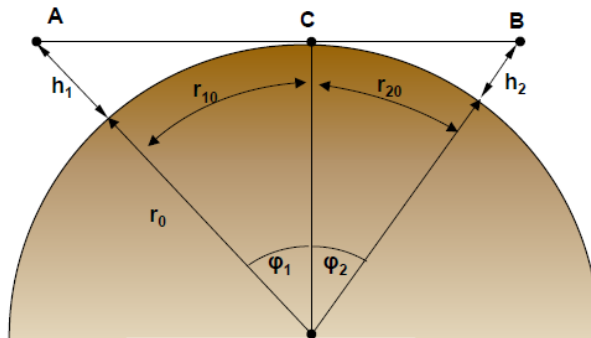
## Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων - Τροποσφαιρικά

- 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  $h \neq 0$ :

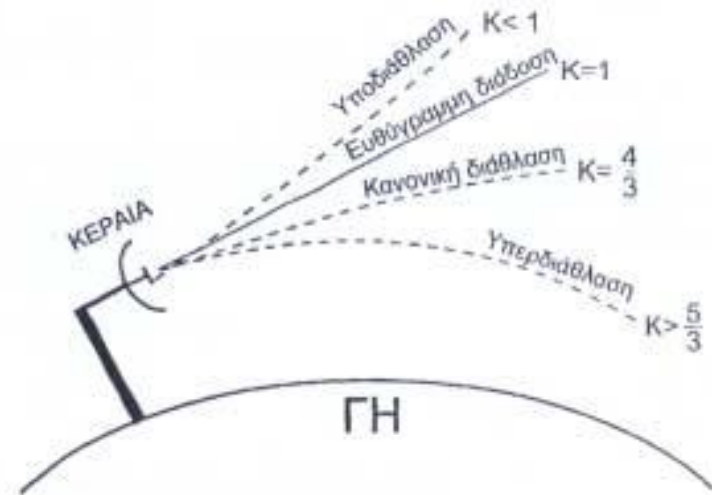
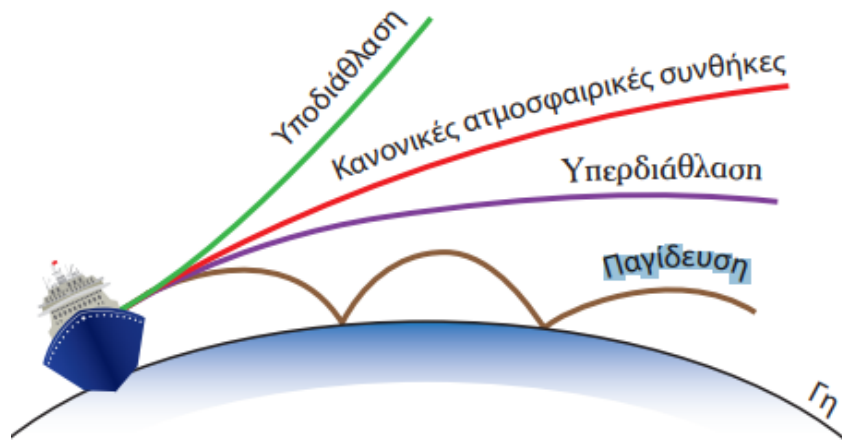
$$d = 3.57 \left( \sqrt{Kh_1} + \sqrt{Kh_2} \right) \quad (Km)$$





# 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

# Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

## Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων - Τροποσφαιρικά

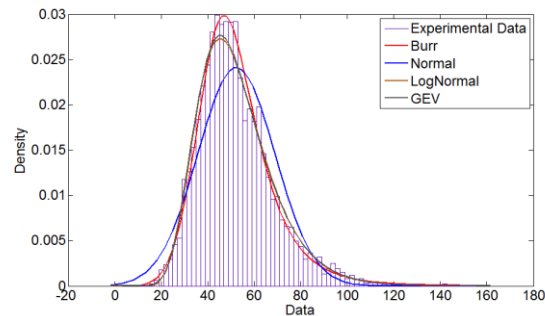
- Εμπειρικά μοντέλα
  - Χρήση δεδομένων από μετρήσεις
  - Περιγράφουν την στατιστική κατανομή των δεδομένων που μετρήθηκαν



- Okumura-Hata
- Cost-231
- ..

- Στατιστικά
  - Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας
  - Rayleigh, Rician, Lognormal
  - Περιγραφή των **διαλείψεων**

- Αναλυτικά Μοντέλα



# Βασικές αρχές μελέτης ασύρματης ζεύξης

## Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

- Εγγύς και απομακρυσμένο πεδίο
  - η εκπομπή στην πράξη δεν είναι από σημειακή πηγή!

Near Field region

$$R_{nf} = \frac{D^2}{4\lambda}$$

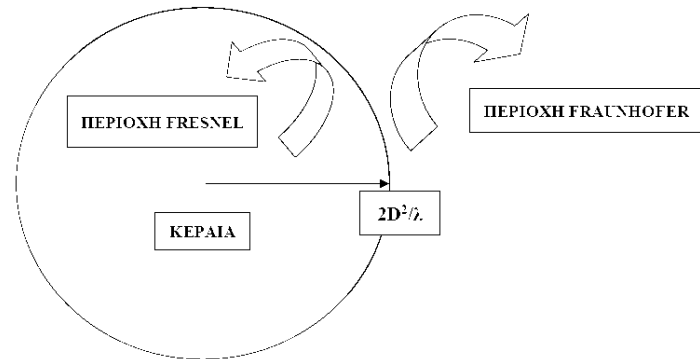
$$S_{nf} = \frac{16 \cdot P_{in}}{\pi \cdot D^2}$$

Transition region

$$S_t = \frac{S_{nf} R_{nf}}{R}, R_{nf} \leq R \leq R_{ff}$$

Far Field - Περιοχή Fraunhofer

$$R_{FF} = \frac{2 \cdot D^2}{\lambda}$$



# Αναλυτικά μοντέλα – Απώλειες μονοπατιού

## Απώλειες Ελευθέρου Χώρου (στο far field)

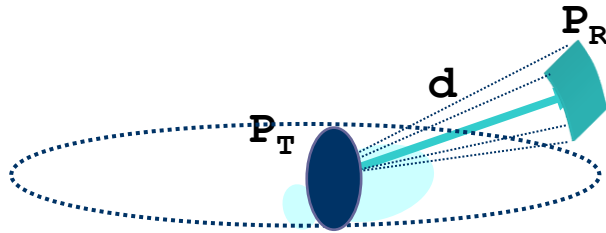
► Ισχύς λήψης στο δέκτη

Σημειακή ισχύς λήψης σε απόσταση  $d$  σε απόσταση

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

ισοτροπική πυκνότητα ισχύος

Εμβαδόν επιφάνειας σφαίρας



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

Πυκνότητα ισχύος στην κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολούμενης 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

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

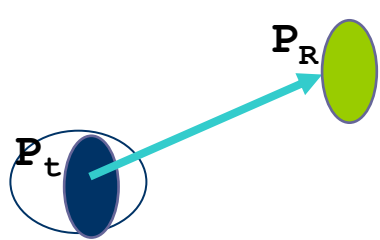


Ενεργό άνοιγμα  
Ενεργή περιοχή  
Ενεργή επιφάνεια

# Αναλυτικά μοντέλα – Απώλειες μονοπατιού

## Απώλειες Ελευθέρου Χώρου

- Υπολογισμός απωλειών



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

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \frac{0.57 * 10^{-3}}{(df)^2} \quad \begin{array}{l} f \text{ is in MHz} \\ d \text{ is in Km} \end{array}$$

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

**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).

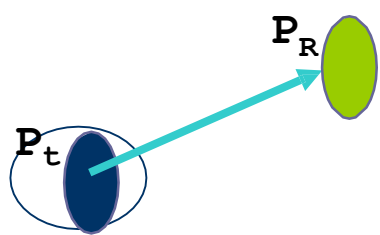
$$L = 32,5 + 20 \log d_{km} + 20 \log f_{MHz}$$

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

# Αναλυτικά μοντέλα – Απώλειες μονοπατιού

## Απώλειες Ελευθέρου Χώρου

- ▶ Υπολογισμός απωλειών



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

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \frac{0.57 \cdot 10^{-3}}{(df)^2}$$

$f$  is in MHz  
 $d$  is in Km

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

**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).

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

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



# Αναλυτικά μοντέλα – Απώλειες μονοπατιού

## Απώλειες Ελευθέρου Χώρου

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

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

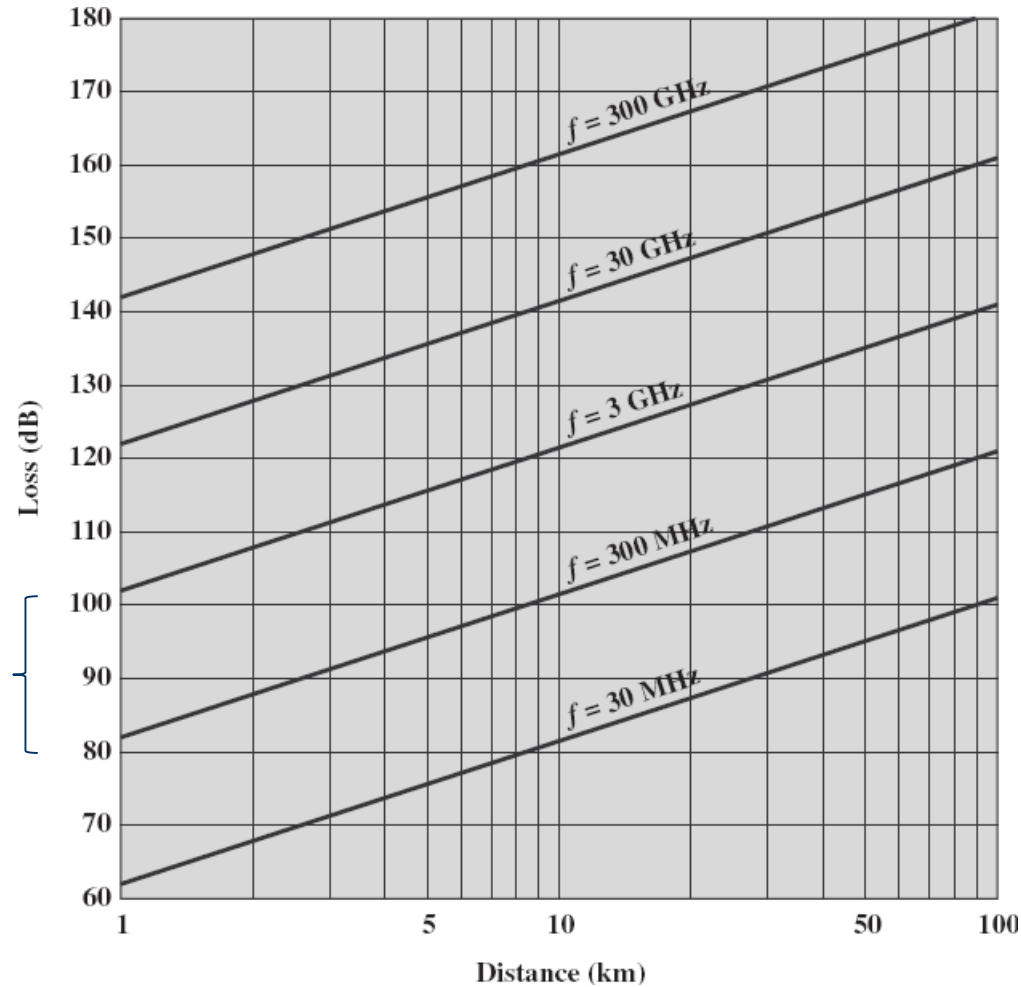
10πλασιασμός απόστασης = +20db απώλειες

2πλασιασμός απόστασης = +6db απώλειες

Ομοίως για συχνότητα

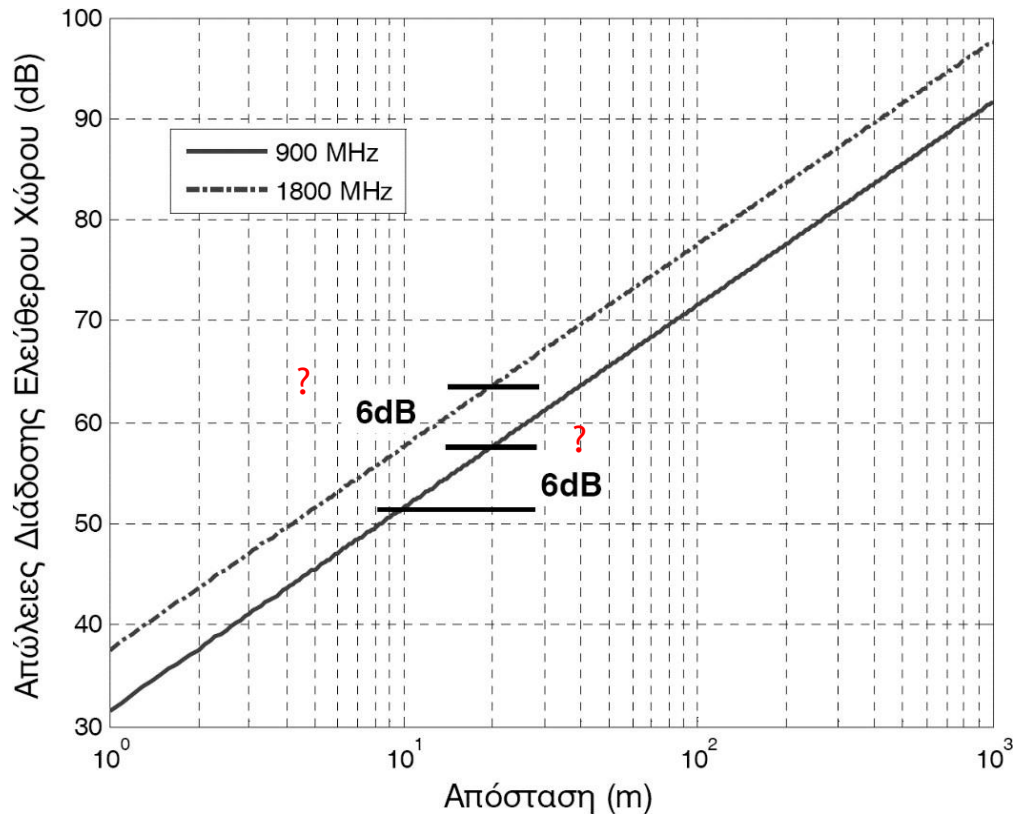
# Αναλυτικά μοντέλα – Απώλειες μονοπατιού

## Απώλειες Ελευθέρου Χώρου



# Αναλυτικά μοντέλα – Απώλειες μονοπατιού

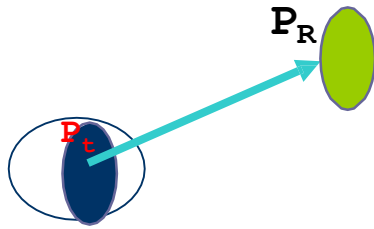
## Απώλειες Ελευθέρου Χώρου



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

# Αναλυτικά μοντέλα – Απώλειες μονοπατιού

## Απώλειες Ελευθέρου Χώρου

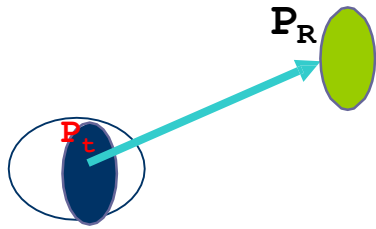


Οι κεραίες είναι ιστροπικές. Ποια είναι η λαμβανομένη ισχύς  $P_R$  (σε dBm) σε απόσταση **100m** από την κεραία εκπομπής? Ποια είναι η  $P_R$  στα **10Km**?

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

# Αναλυτικά μοντέλα – Απώλειες μονοπατιού

## 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  $d = 10\text{Km}$ )

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

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

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

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