

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



ΚΕΡΑΙΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

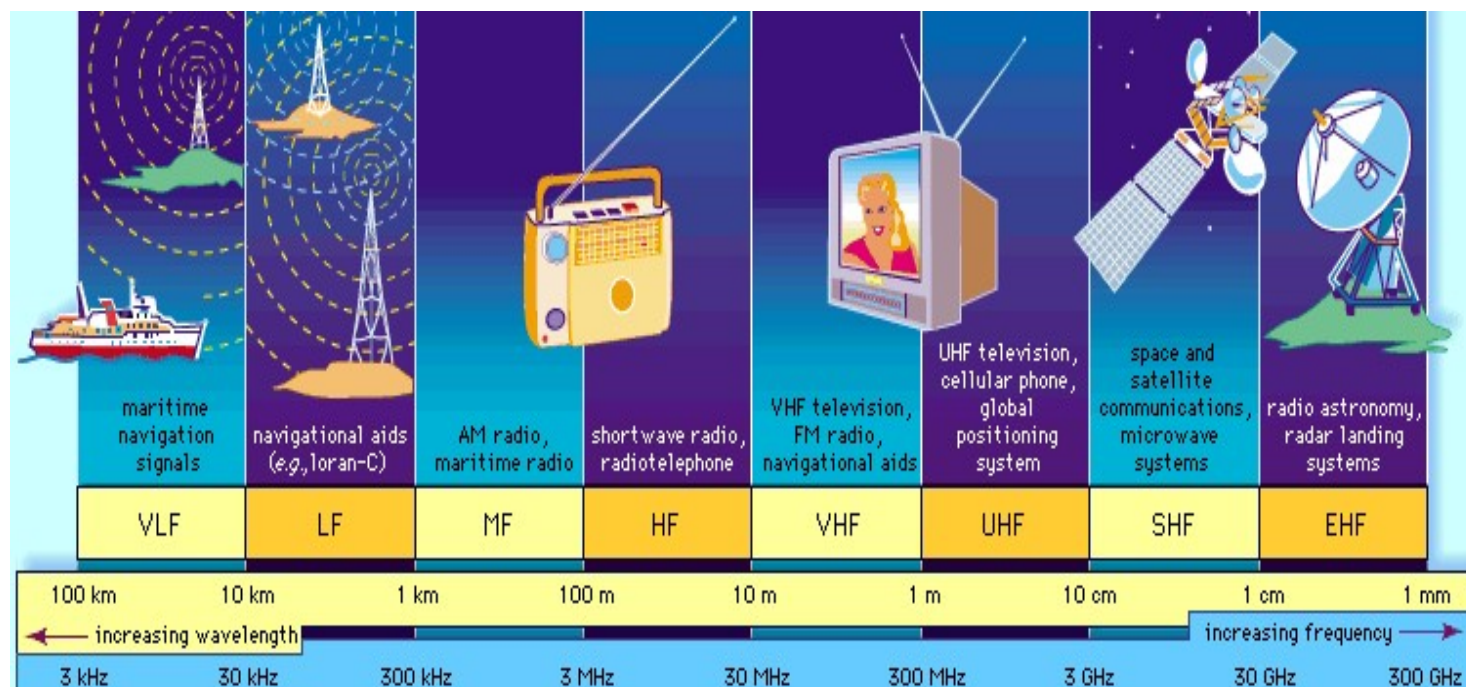


ΔΙΑΔΟΣΗ



ΡΑΔΙΟΦΑΣΜΑ

Ζώνη	Συχνότητες	Μήκος Κύματος
ELF	3-3000 Hz	10000 - 1000 km
VLF	3-30 kHz	100 - 10 km
LF	30-300 kHz	10 - 1 km
MF	300-3000 kHz	1000 - 100 m
HF	3-30 MHz	100 - 10 m
VHF	30-300 MHz	10 - 1 m
UHF	300-3000 MHz	100 - 10 cm
SHF	3-30 GHz	10 - 1 cm
EHF	30-300 GHz	10 - 1 mm



ΔΙΑΔΟΣΗ ΡΑΔΙΟΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

ΡΑΔΙΟΚΥΜΑΤΑ ή ΕΡΤΖΙΑΝΑ ΚΥΜΑΤΑ:

Σύμφωνα με την ITU [(RR1-I) ARTICLE 1, Introduction Terms and definitions)] ραδιοκύματα ή ερτζιανά κύματα ονομάζονται (αυθαίρετα) τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε συχνότητες χαμηλότερες των 3000 GHz, τα οποία διαδίδονται στο χώρο χωρίς τεχνητό «οδηγό».

Τα ραδιοκύματα διαδίδονται στην ατμόσφαιρα.

Ατμόσφαιρα: Το αεριώδες περίβλημα που μπορεί να περιβάλλει ένα ουράνιο σώμα και το οποίο συγκρατείται λόγω της βαρύτητάς του.

Η περιοχή έξω από την ατμόσφαιρα ονομάζεται διάστημα.

Η γήινη ατμόσφαιρα φτάνει πρακτικά στα 3.500 km.

Το όριο μεταξύ ατμόσφαιρας – διαστήματος δεν είναι αυστηρά καθορισμένο. Μεγαλώνοντας η απόσταση από τη Γη, σταδιακά αραιώνει η ατμόσφαιρα και εξαφανίζεται στο διάστημα.



ΔΙΑΔΟΣΗ ΡΑΔΙΟΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Χαρακτηριστικά Ραδιοκυμάτων:

- Εύκολα στη δημιουργία
- Μπορούν να ταξιδέψουν μεγάλες αποστάσεις
- Μπορούν να διεισδύσουν σε κτίρια
- Χρησιμοποιούνται για εσωτερική και εξωτερική επικοινωνία
- Είναι πανκατευθυντικά: μπορούν να ταξιδέψουν προς όλες τις κατευθύνσεις
- Μπορούν να εστιαστούν σε στενή δέσμη σε υψηλές συχνότητες (μεγαλύτερες από 100 MHz) χρησιμοποιώντας παραβολικές κεραίες (όπως δορυφορικά πιάτα)
- Οι ιδιότητες των ραδιοκυμάτων εξαρτώνται από τη συχνότητα
 - Σε χαμηλές συχνότητες, περνούν καλά μέσα από εμπόδια, αλλά η ισχύς πέφτει απότομα με την απόσταση από την πηγή
 - Στις υψηλές συχνότητες, τείνουν να ταξιδεύουν σε ευθείες γραμμές και να διαπερνούν εμπόδια (με διάφορους τρόπους) ή και να απορροφηθούν εξαιτίας καιρικών φαινομένων (π.χ. βροχή)
 - Υπόκεινται σε παρεμβολές από άλλες πηγές ραδιοκυμάτων



ΔΙΑΔΟΣΗ ΡΑΔΙΟΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Τα ραδιοκύματα συμπεριφέρονται περισσότερο σαν φως σε υψηλότερες συχνότητες

- Παρουσιάζουν δυσκολία στη διέλευση εμποδίων
- Ακολουθούν πιο άμεσες διαδρομές

Συμπεριφέρονται διαφορετικά σε χαμηλότερες συχνότητες και μπορούν να διαπεράσουν

Για τις ραδιοεπικοινωνίες ενδιαφέρον παρουσιάζουν δύο περιοχές της ατμόσφαιρας:

Τροπόσφαιρα (κατώτερη ατμόσφαιρα): εκτείνεται μεταξύ 0 - 9 ή 18 km (ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος)

Ιονόσφαιρα: εκτείνεται μεταξύ 60 και 600 km (τα όρια εξαρτώνται από το γεωγραφικό πλάτος)



ΔΙΑΔΟΣΗ ΡΑΔΙΟΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Οι συχνότητες λειτουργίας των ραδιοζεύξεων συνδέονται άμεσα με τους φυσικούς μηχανισμούς που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά τους.

Τα ραδιοκύματα κατά τη διέλευση τους από την ατμόσφαιρα (κατώτερη ή ανώτερη) υφίστανται:

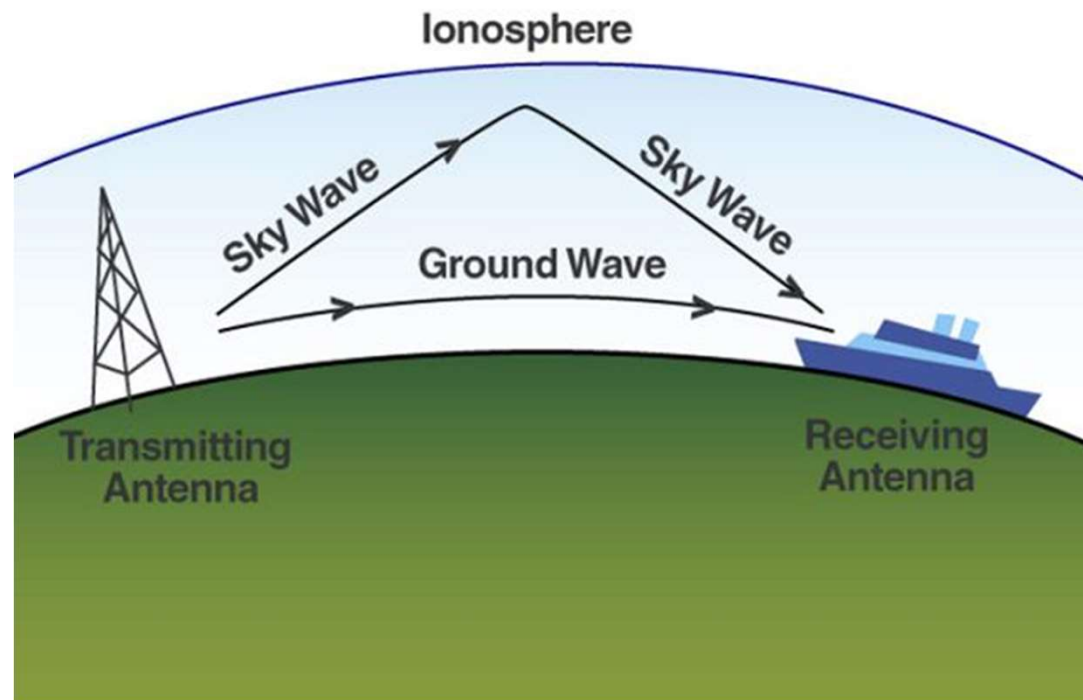
- Ανάκλαση
- Διάθλαση
- Περίθλαση
- Απορρόφηση από τα αέρια της ατμόσφαιρας ή τα ατμοσφαιρικά μετέωρα (σύννεφα)
- Στροφή πόλωσης
- Σκέδαση

Ο βαθμός επηρεασμού των ραδιοκυμάτων από τα φαινόμενα αυτά εξαρτάται από τις συχνότητες λειτουργίας και τις ατμοσφαιρικές (κυρίως) συνθήκες ή/και από συνδυασμό τους.

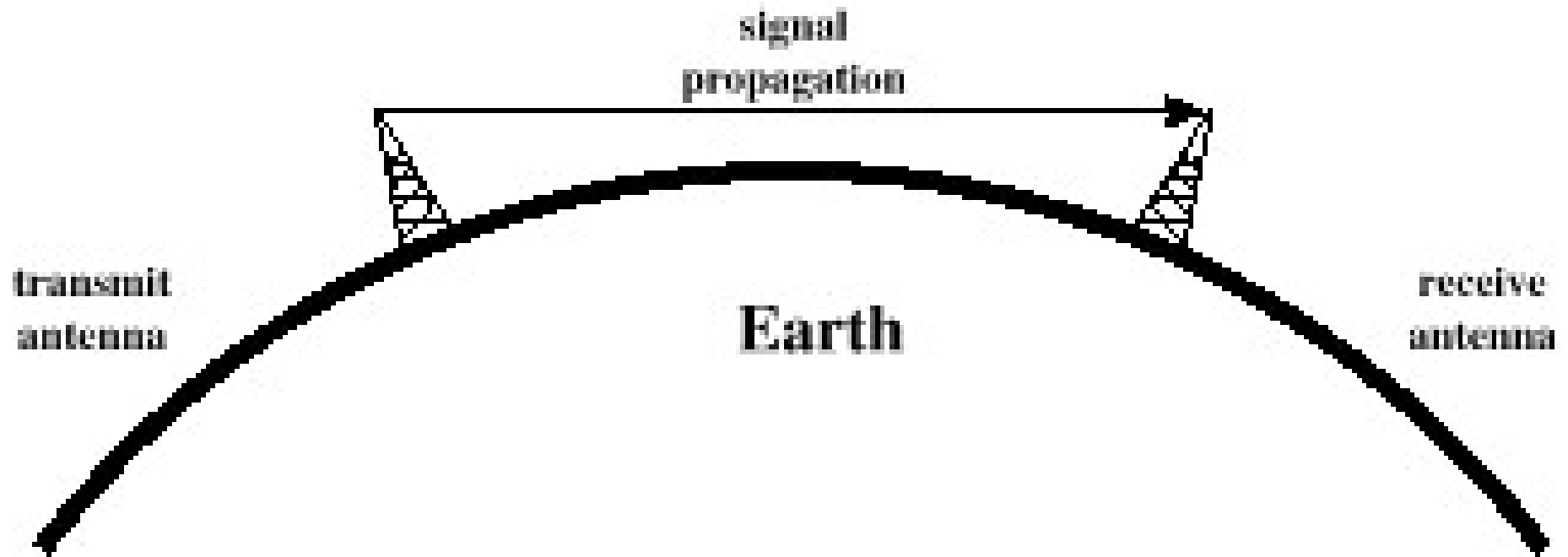


ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΔΟΣΗΣ

- Οπτική Επαφή
- Κύμα Εδάφους
- Κύμα Χώρου
- Ουράνιο Κύμα



Διάδοση με Οπτική Επαφή (Line Of Sight Propagation – LOS)



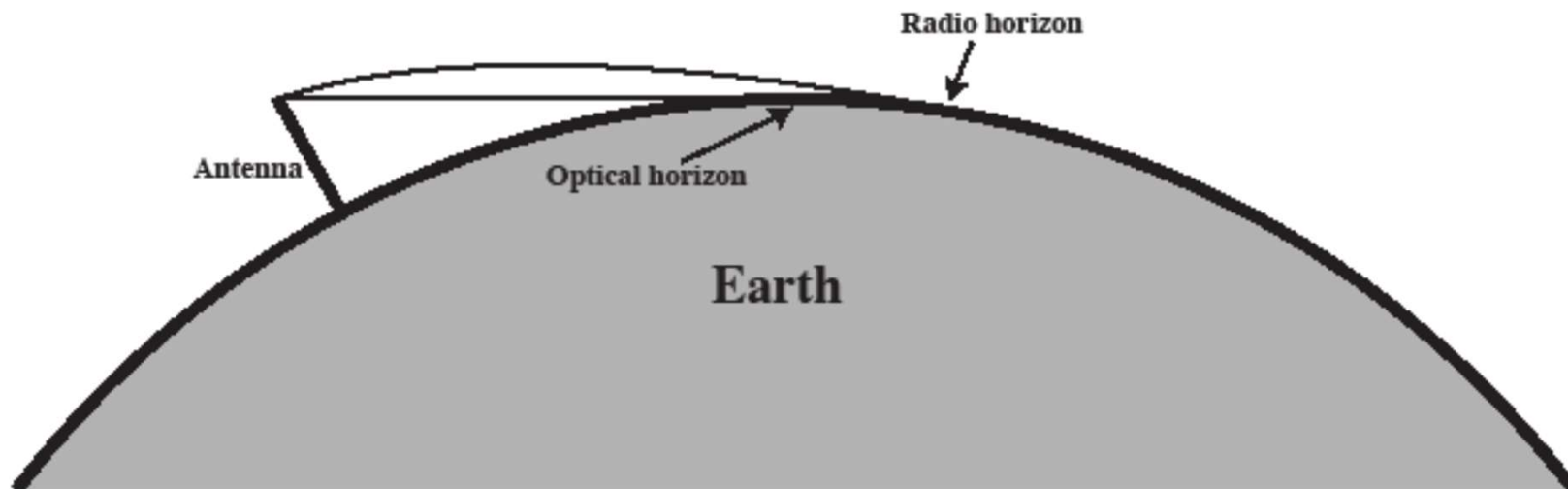
Διάδοση με Οπτική Επαφή (Line Of Sight Propagation – LOS)

- Απαιτείται άνω των 30 MHz
- Οι κεραίες εκπομπής και λήψης πρέπει να βρίσκονται εντός οπτικού πεδίου
 - Δορυφορική επικοινωνία – σήμα άνω των 30 MHz ανακλάται από την ιονόσφαιρα
 - Επίγεια επικοινωνία – κεραίες εντός LOS λόγω διάθλασης
- Διάθλαση – κάμψη μικροκυμάτων από την ατμόσφαιρα
 - Η ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι συνάρτηση της πυκνότητας του μέσου
 - Όταν το κύμα αλλάζει μέσο, αλλάζει η ταχύτητα
 - Το κύμα κάμπτεται στο όριο μεταξύ των μέσων



Διάδοση με Οπτική Επαφή (Line Of Sight Propagation – LOS)

Οπτικός και Ραδιοηλεκτρικός ορίζοντας:



Διάδοση με Οπτική Επαφή (Line Of Sight Propagation – LOS)

Οπτικός και Ραδιοηλεκτρικός ορίζοντας:

Οπτικός ορίζοντας:

$$d = 3.57\sqrt{h}$$

Ραδιοηλεκτρικός ορίζοντας:

$$d = 3.57\sqrt{Kh}$$

d = απόσταση μεταξύ κεραίας και ορίζοντα (km)

h = ύψος κεραίας (m)

K = συντελεστής διόρθωσης για να ληφθεί υπόψη η διάθλαση,
εμπειρικός κανόνας **$K = 4/3$**



Διάδοση με Οπτική Επαφή (Line Of Sight Propagation – LOS)

Μέγιστη απόσταση μεταξύ δύο κεραιών για διάδοση LOS:

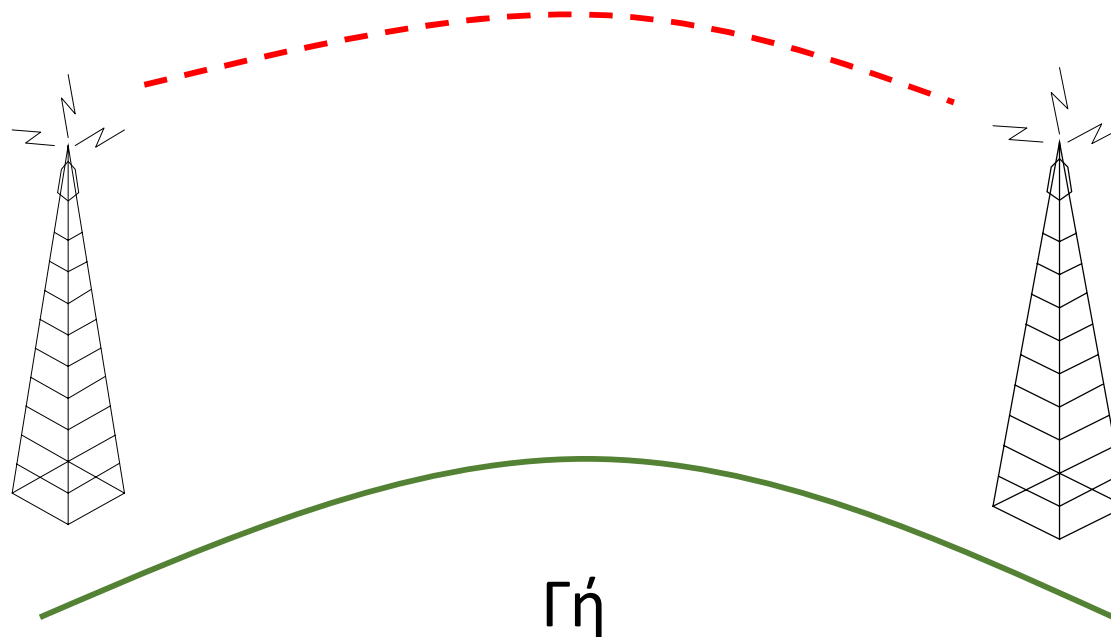
$$3.57 \left(\sqrt{K h_1} + \sqrt{K h_2} \right)$$

h_1 = ύψος κεραίας ένα

h_2 = ύψος κεραίας δύο



Διάδοση επίγειων κυμάτων – Κύμα εδάφους (Ground Wave Propagation)



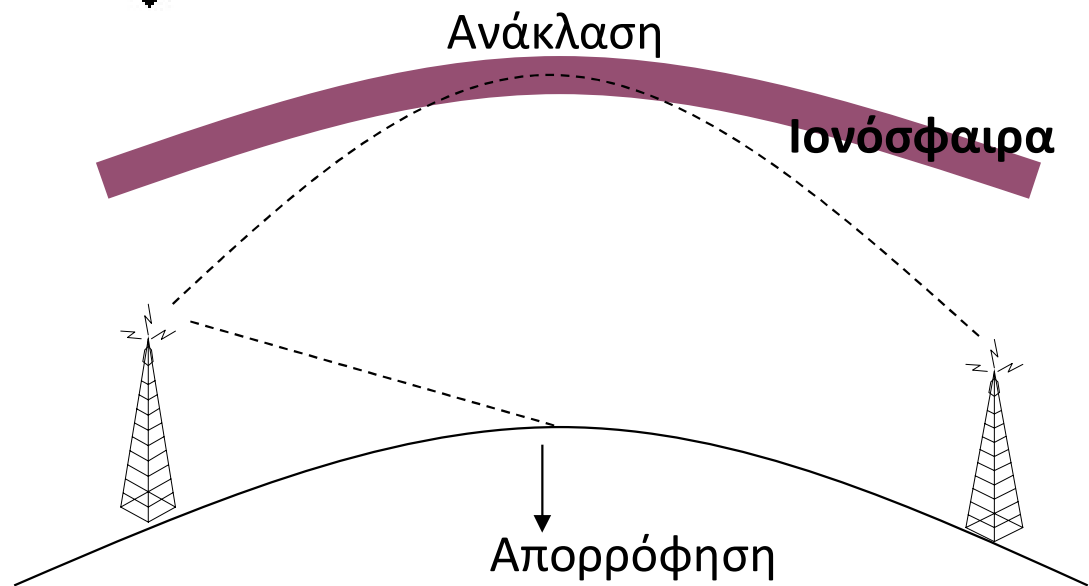
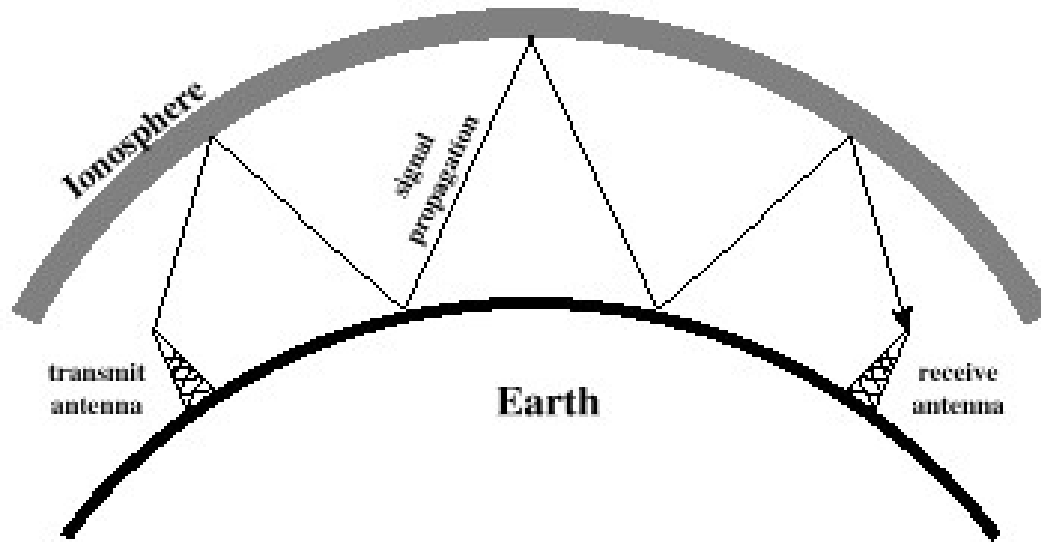
Στις ζώνες **VLF**, **LF** και **MF**, τα ραδιοκύματα ακολουθούν την καμπυλότητα του εδάφους.

Διάδοση επίγειων κυμάτων – Κύμα εδάφους (Ground Wave Propagation)

- Ακολουθεί το περίγραμμα της γης
 - Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα προκαλεί ρεύμα στην επιφάνεια της γης με αποτέλεσμα το ραδιοκύμα να κλίνει προς τα κάτω
 - Υπόκειται σε Περίθλαση
- Μπορεί να διαδοθεί σε μεγάλες αποστάσεις
- Συχνότητες έως 2 MHz
- Παράδειγμα
 - Ραδιόφωνία AM



Διάδοση με ουράνια κύματα (Sky Wave Propagation)



Διάδοση με ουράνια κύματα (Sky Wave Propagation)

- Στις ζώνες **HF**, τα κύματα του εδάφους τείνουν να απορροφώνται από τη γη. Τα κύματα που φτάνουν στην ιονόσφαιρα (ιονισμένο στρώμα της ατμόσφαιρας) σε αποστάσεις 100-500km πάνω από την επιφάνεια της γης, διαθλώνται και στέλνονται πίσω στη γη.
- Το σήμα μπορεί να ταξιδέψει αρκετές φορές μπρος-πίσω μεταξύ της ιονόσφαιρας και της επιφάνειας της γης
- Το φαινόμενο της ανάκλασης προκαλείται από διάθλαση στην ιονόσφαιρα
- Παραδείγματα
 - Ερασιτεχνικό ραδιόφωνο (Amateur radio)
 - Ραδιόφωνο CB (CB radio)



ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΟΡΥΒΟΥ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΕΣ



Επίδραση Θορύβου

Η «ποιότητα» ενός σήματος ραδιοσυχνοτήτων, όπως αυτό λαμβάνεται από τον δέκτη, καθορίζεται από τον λόγο της ισχύος του σήματος S (σε Watt) προς την ισχύ του θορύβου N (σε Watt) (**Signal-to-Noise Ratio - SNR**) δηλαδή το κλάσμα:

$$SNR = \frac{S}{N} \quad \acute{\eta} \quad SNR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{S}{N} \quad \sigma\epsilon \quad dB$$

Αναφερόμαστε στον ηλεκτρικό/ηλεκτρομαγνητικό και όχι τον ακουστικό θόρυβο. Μιλάμε δηλαδή για τις μικρές, τυχαίες διακυμάνσεις που προστίθενται στο σήμα της πληροφορίας και το παραμορφώνουν. Συνήθεις τιμές για το **SNR**:

- Αναλογική τηλεόραση (σταθερή λήψη): 30 dB
- Δορυφορική λήψη: 10 - 15 dB
- Τερματικό κινητής τηλεφωνίας: 14 - 18 dB

Το **SNR** μπορεί να μεταβάλλεται πολύ έντονα και πολύ γρήγορα, ανάλογα πάντα με τις συνθήκες διάδοσης του σήματος.



Ενδεικτικές πηγές Θορύβου

- Κοντινές ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές
- Ηλεκτρικό δίκτυο
- Συγκαναλική παρεμβολή (Common Channel Interference - CCI) στο ίδιο το ραδιοδίκτυο – το σήμα της παρεμβολής δρα ως θόρυβος
- Τα ίδια τα ηλεκτρικά κυκλώματα του πομπού και του δέκτη (ατέλειες υλικού και σχεδίασης, θερμικός θόρυβος)
- Καιρικά φαινόμενα (ηλεκτρικά φορτία και εκκενώσεις στην ατμόσφαιρα, ήλιος, ουράνια σώματα κλπ.)



Ηλεκτρομαγνητική Διάδοση

Βασικές Έννοιες

Το εκπεμπόμενο ηλεκτρομαγνητικό σήμα (ραδιοσήμα):

- Ανακλάται
- Περιθλάται και
- Αποσβέννυται

ανάλογα με το μέσο μετάδοσης και τα εμπόδια που συναντά.

Ανάκλαση: όταν το σήμα πέφτει πάνω σε μεγάλο αντικείμενο (μεγαλύτερο από το μήκος κύματος $\lambda = c/f$)

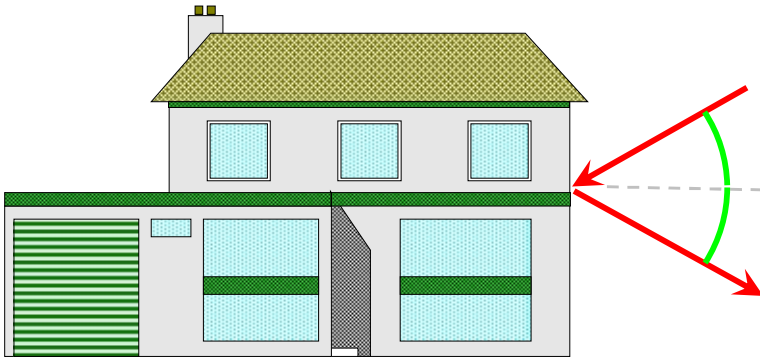
Περίθλαση: όταν το σήμα πέφτει σε αντικείμενο με διαστάσεις μικρότερες του λ και σε ακμές

Για τα συστήματα GSM/3G/4G, οι συχνότητες λειτουργίας αντιστοιχούν σε μήκη κύματος από 6cm ($f=5$ GHz) έως 40cm ($f=750$ MHz).

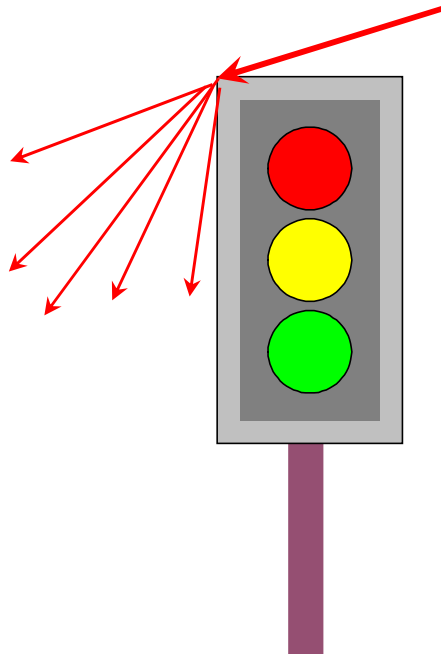


Ανάκλαση, Περίθλαση και Σκέδαση

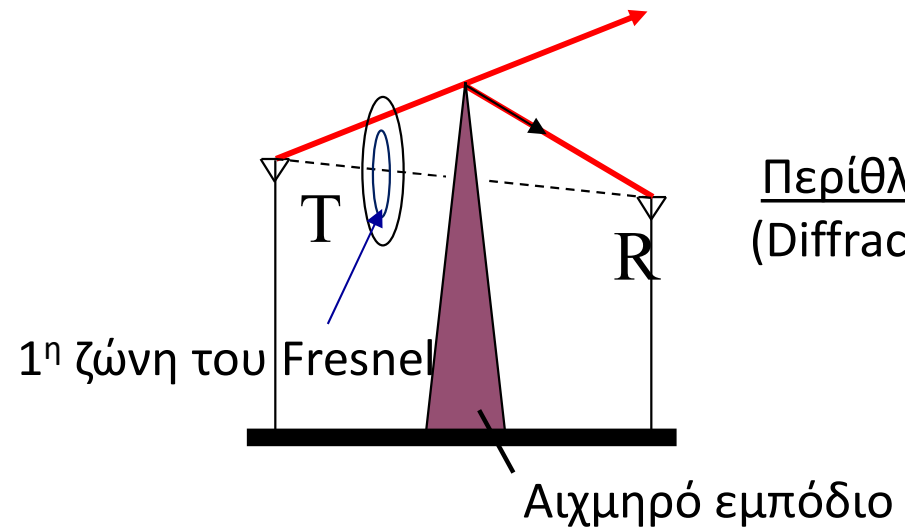
Ανάκλαση (Reflection)



Σκέδαση (Scattering)



Περίθλαση (Diffraction)



Ανάκλαση:

Στην επιφάνεια γης, κτιρίων και τοίχων

Περίθλαση:

Επιφάνειες που έχουν αιχμηρές άκρες (Γεωμετρία του αντικειμένου, πλάτος, φάση και πόλωση του προσπίπτοντος κύματος)

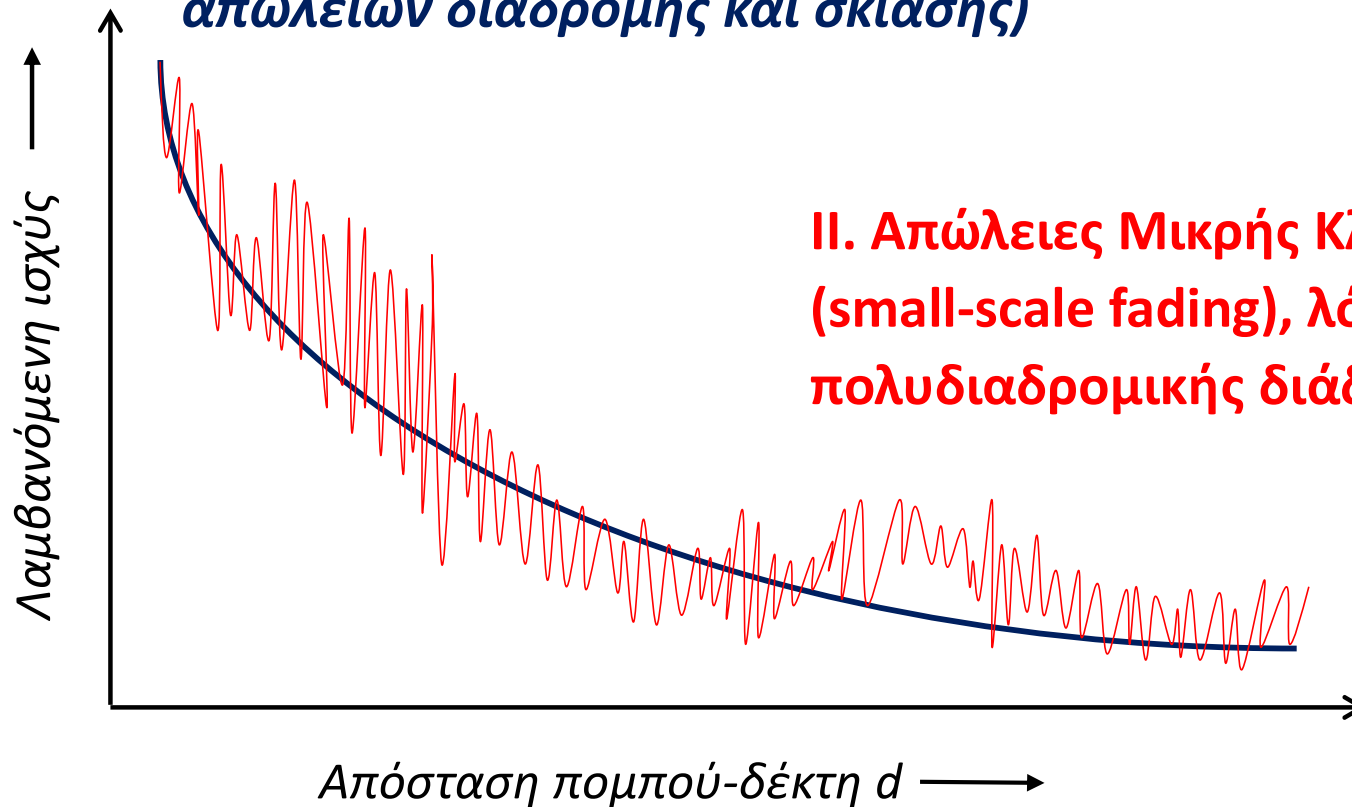
Σκέδαση: (αντικείμενα μικρότερα από το μήκος κύματος): π.χ. τραχιές επιφάνειες, μικροαντικείμενα φύλλωμα, πινακίδες, φανοστάτες, ανωμαλίες στο κανάλι



Κατηγορίες Απωλειών (Αποσβέσεων)

Το Η/Μ κύμα χάνει την ισχύ του καθώς μεταδίδεται από τον πομπό στο δέκτη

I. Απώλειες Μεγάλης Κλίμακας L_L (large-scale fading, λόγω απωλειών διαδρομής και σκίασης)



Οι απώλειες μετρώνται σε dB : $Losses_{dB} = 10 \log_{10} \frac{\text{Αρχική Ισχύς σήματος}}{\text{Τελική Ισχύς σήματος}}$



I. Απώλειες (διαλείψεις) μεγάλης κλίμακας

Αφορούν την αργή μεταβολή του μέσου όρου της ισχύος ανάλογα με τη θέση του δέκτη.

Αυτή η μεταβολή οφείλεται σε:

Iα. Απώλειες διαδρομής:

ελάττωση ισχύος σε σχέση με την απόσταση πομπού-δέκτη

Iβ. Απώλειες λόγω διέλευσης δια μέσου εμποδίου (σκίαση)

π.χ. βουνού, τοίχου, αυτοκινήτου κλπ.



Ια. Απώλειες διαδρομής (Path Loss – PL)

Οι απώλειες διαδρομής (**Path loss – PL**) σε απόσταση d από τον πομπό δίνονται σε σχέση με τις απώλειες σε απόσταση d_0 (απόσταση αναφοράς):

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \frac{d}{d_0} \text{ σε } dB$$

Όπου n είναι ο εκθέτης απωλειών διάδοσης που εξαρτάται από το περιβάλλον διάδοσης.

Τυπικές τιμές του εκθέτη απωλειών n :

- Ελεύθερος χώρος 2
- Αστική περιοχή 2.7 - 3.5
- Αστική περιοχή με εμπόδια 3-5
- Εντός κτιρίων 4-6

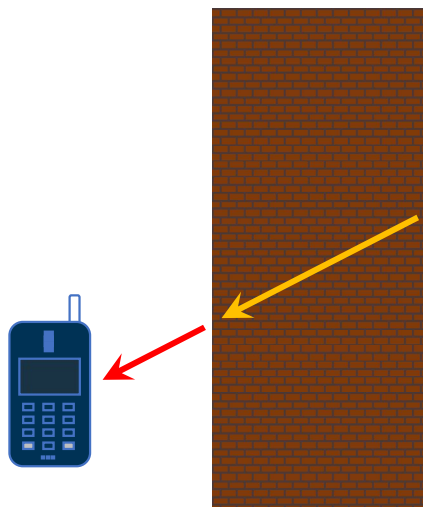


Ιβ. Απώλειες σκίασης

Είναι οι απώλειες που προκαλούνται από τη διέλευση του κύματος μέσα από ένα εμπόδιο.

Εξαρτώνται κυρίως από:

- Το μήκος κύματος
- Τη φύση του εμποδίου
- Το μήκος της διαδρομής του σήματος μέσα στο εμπόδιο

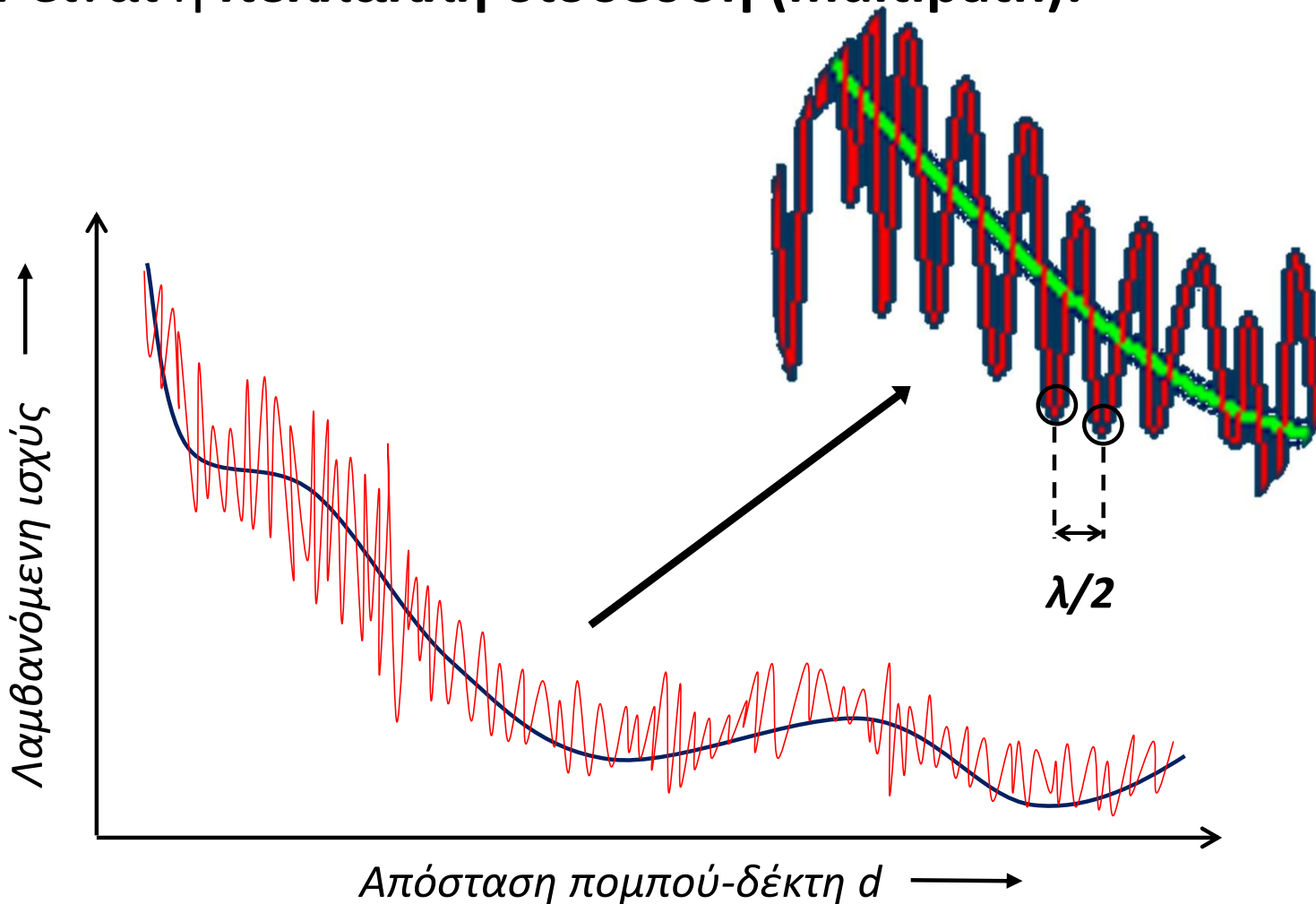


$$Loss_{dB} = 10 \log_{10} \frac{\text{Ισχύς σήματος πριν το εμπόδιο}}{\text{Ισχύς σήματος μετά το εμπόδιο}} \text{ σε } dB$$

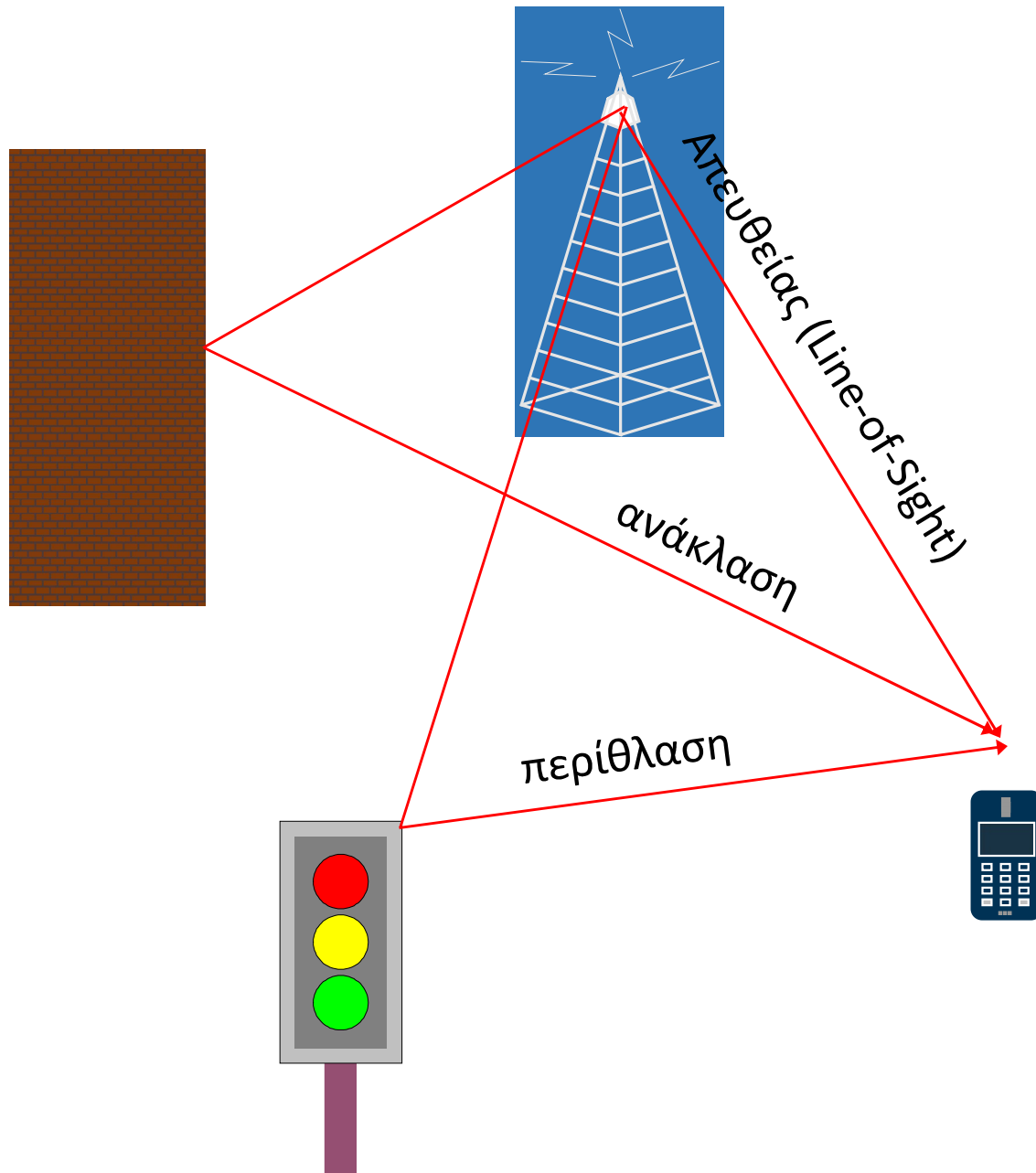
Π.χ. Σήμα GSM που διέρχεται από τοίχο μπετόν μέσου πάχους υφίσταται τυπική εξασθένηση 15 dB

II. Απώλειες (διαλείψεις) Μικρής Κλίμακας

Η απόσταση μεταξύ διαλείψεων (*fading incidents*) μικρής κλίμακας στο χώρο είναι της τάξης του $\lambda/2$. Το κύριο αίτιο των διαλείψεων αυτών είναι η **πολλαπλή διόδευση (multipath)**.



Πολλαπλή διόδευση (Multipath propagation)



Λόγω των προηγούμενων μηχανισμών διάδοσης στον δέκτη φτάνουν πολλαπλά κύματα από την ίδια πηγή.

Η **LOS (Line-of-Sight)** απευθείας συνιστώσα δεν είναι πάντα απαραίτητο ότι περιλαμβάνεται σε αυτά, δηλαδή με άλλα λόγια δεν είναι απαραίτητο ότι ο δέκτης έχει οπτική επαφή με τον πομπό.

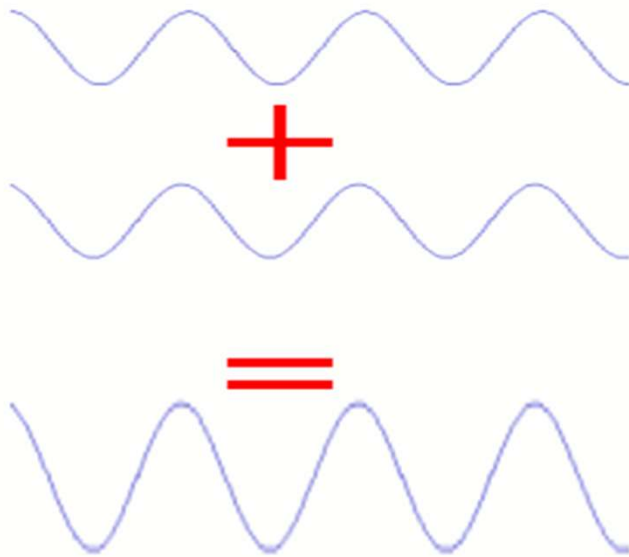
Πολλαπλή διόδευση (Multipath propagation)

- Οι διακυμάνσεις της λαμβανόμενης ισχύος του σήματος που παρατηρούνται σε σύντομα χρονικά διαστήματα ή σε μικρές αποστάσεις ονομάζονται διαλείψεις πολλαπλής διόδευσης (multipath fading).
- Οι διαλείψεις αυτές οφείλονται σε αλληλεπιδράσεις μεταξύ **αντιγράφων του ίδιου σήματος** που φθάνουν στον δεκτή από διαφορετικές διόδευσεις.
- Κάθε αντίγραφο του σήματος έχει διανύσει και διαφορετική απόσταση και γι' αυτό η φάση του είναι διαφορετική. Έτσι, τα διάφορα αντίγραφα του σήματος αθροίζονται άλλοτε προσθετικά και άλλοτε αφαιρετικά.

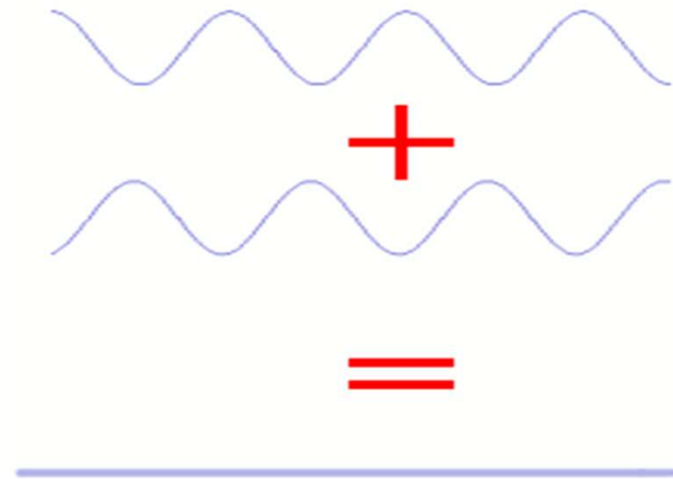


Πολλαπλή διόδευση (Multipath propagation)

- Προσθετική συμβολή
δύο συμφασικών
αντιγράφων του ίδιου
σήματος (το τελικό
σήμα ενισχύεται)

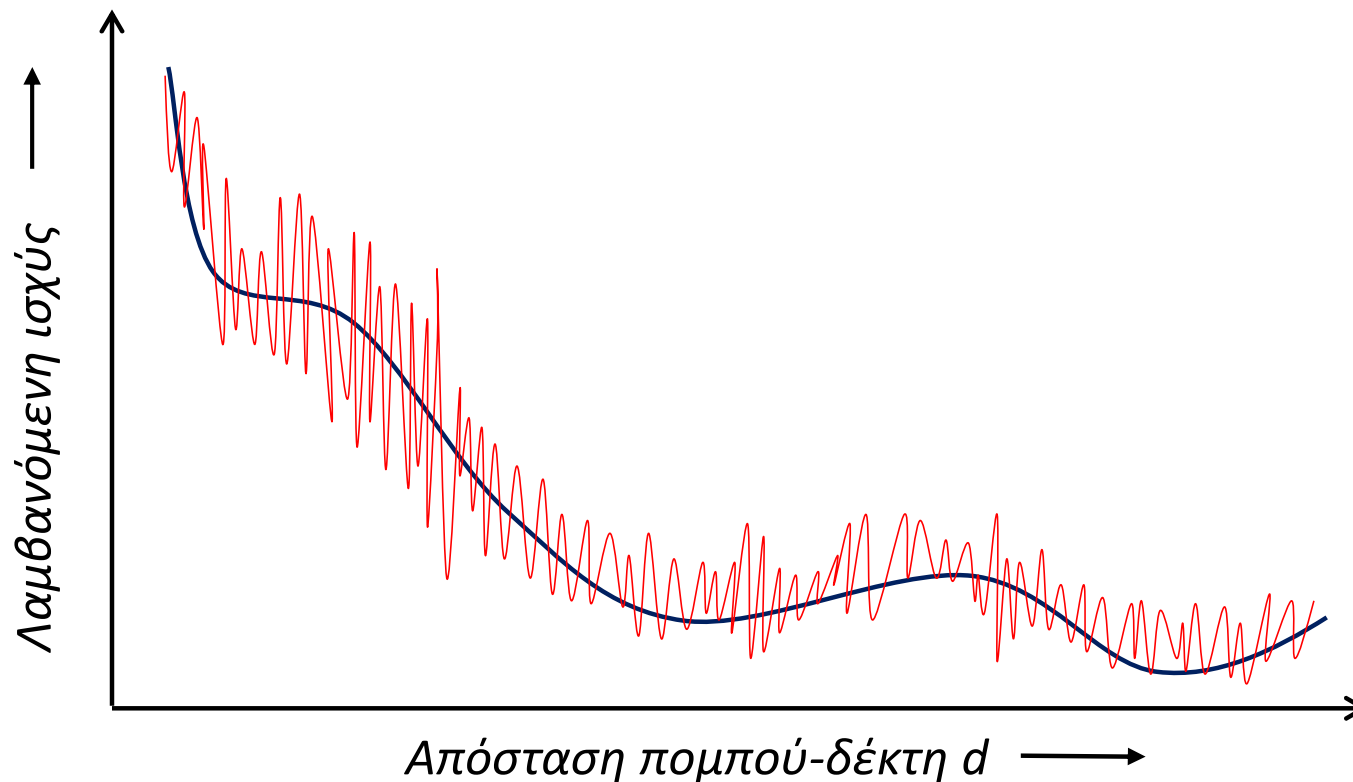


- Αφαιρετική συμβολή
δύο αντιφασικών
αντιγράφων του ίδιου
σήματος (το τελικό
σήμα εξασθενεί)



Πολλαπλή διόδευση (Multipath propagation)

Το αποτέλεσμα είναι να έχουμε πολύ απότομες μεταβολές της λαμβανόμενης ισχύος (ακόμη και 20 dB) σε πολύ μικρή απόσταση (της τάξης του μήκους κύματος π.χ. 30 εκ. στο GSM)



Σύνοψη: Κατηγορίες Απωλειών

Απώλειες μεγάλης κλίμακας

- Είναι οι απώλειες τις οποίες προσπαθούν να υπολογίσουν τα μοντέλα διάδοσης
- Εξαρτώνται κυρίως από την απόσταση πομπού – δέκτη

Απώλειες μικρής κλίμακας

- Μπορεί να έχουμε διάφορες απωλειών 20-30 db σε αποστάσεις μικρότερες του μήκους κύματος
- Προκαλούνται από την πρόσθεση ή την αλληλοακύρωση σημάτων από πολλαπλές διοδεύσεις

Η τελική απώλεια ισχύος σε dB είναι το άθροισμα των απωλειών σε dB λόγω:

- Διαδρομής (path loss)
- Σκίασης (shadowing)
- Πολυδιαδρομικής μετάδοσης (multipath)

$$L_{Total}(dB) = L_{Path}(dB) + L_{Shadowing}(dB) + L_{Multipath}(dB) = 10 \log_{10} \frac{\text{Αρχική Ισχύς σήματος}}{\text{Τελική Ισχύς σήματος}} \text{ σε } dB$$



ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ (PROPAGATION MODELS)



Συστάσεις της ITU-R Study Group 3 (ITU-R SG3)

Διεύθυνση ιστοσελίδας:

www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=study-groups&link=rsg3&lang=en

Σκοπός της ITU-R Study Group 3:

Μελέτη της διάδοσης ραδιοκυμάτων σε ιονισμένα και μη ιονισμένα μέσα και των χαρακτηριστικών του ραδιοφωνικού θορύβου, με σκοπό τη βελτίωση των συστημάτων ραδιοεπικοινωνίας.

Οι παρακάτω τέσσερις Ομάδες Εργασίας (Working Parties - WPs) πραγματοποιούν μελέτες σχετικά με τις ερωτήσεις που ανατίθενται στην SG 3:

WP 3J	Propagation fundamentals
WP 3K	Point-to-area propagation
WP 3L	Ionospheric propagation and radio noise
WP 3M	Point-to-point and Earth-space propagation



Συστάσεις της ITU-R Study Group 3 (ITU-R SG3)

Ο κύριος στόχος των ομάδων εργασίας είναι να συντάξουν συστάσεις στη σειρά Ρ ITU-R για μεταγενέστερη έγκριση από την SG3 και έγκριση από τα κράτη μέλη.

Οι ομάδες εργασίας αναπτύσσουν επίσης εγχειρίδια που παρέχουν περιγραφικό και εκπαιδευτικό υλικό, Ένα περαιτέρω καθήκον των ομάδων εργασίας είναι να παρέχουν, μέσω της SG3, πληροφορίες διάδοσης και συμβουλές σε άλλες ITU-R ομάδες μελέτης στην προετοιμασία των τεχνικών βάσεων για Συνέδρια Ραδιοεπικοινωνιών.

Τέτοιες πληροφορίες αφορούν συνήθως τον προσδιορισμό των σχετικών επιδράσεων και μηχανισμών διάδοσης και την παροχή μεθόδων πρόβλεψης διάδοσης.

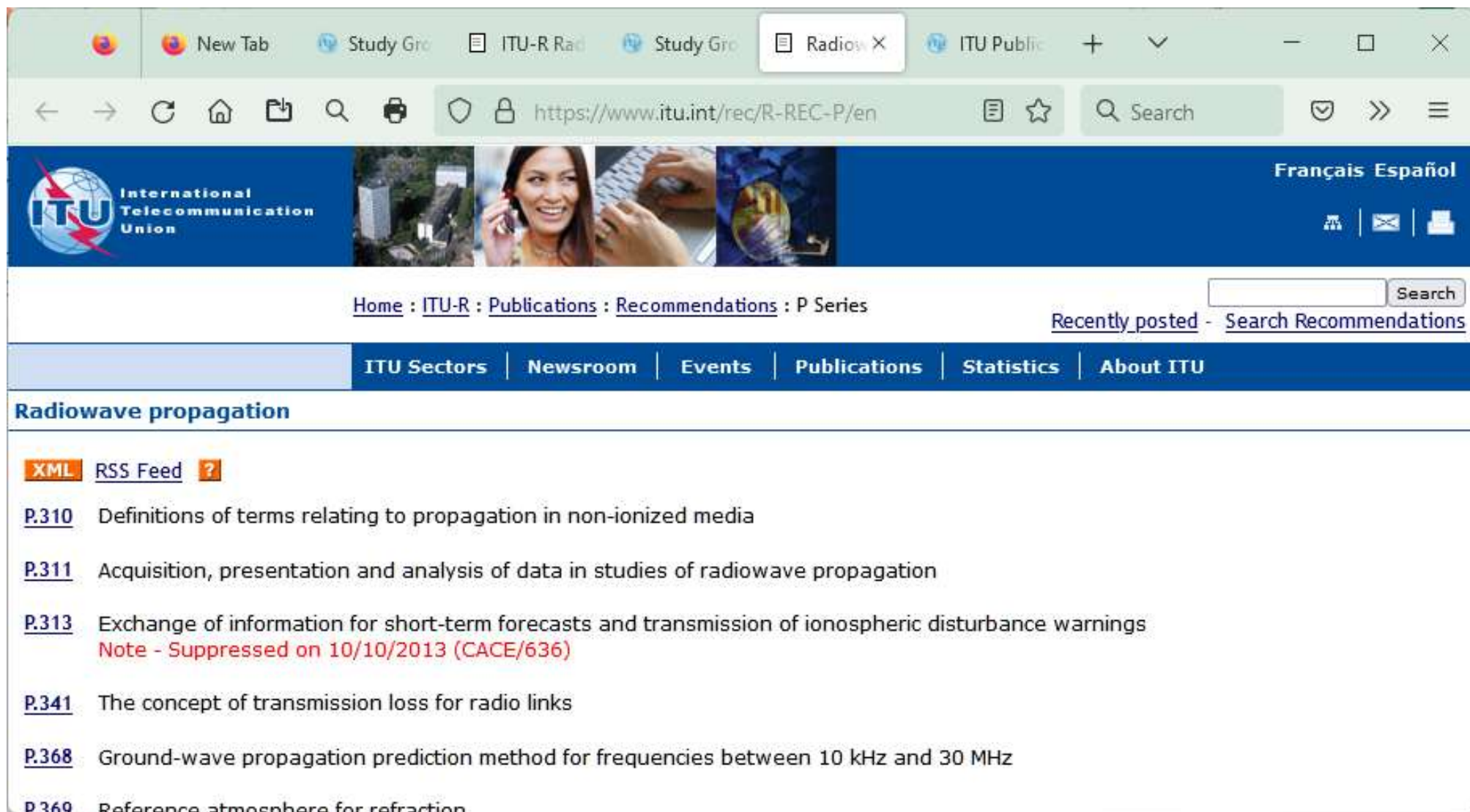
Οι προβλέψεις απαιτούνται για το σχεδιασμό και τη λειτουργία συστημάτων και υπηρεσιών ραδιοεπικοινωνιών και επίσης για την αξιολόγηση της κατανομής συχνοτήτων μεταξύ τους.



Συστάσεις της ITU-R Study Group 3 (ITU-R SG3)

Ιστοσελίδα για τις συστάσεις (Recommendations):

<http://www.itu.int/rec/R-REC-P/en>



The screenshot shows a web browser window displaying the ITU-R Study Group 3 Recommendations page. The browser's address bar shows the URL <https://www.itu.int/rec/R-REC-P/en>. The page header features the ITU logo and the text "International Telecommunication Union". Below the header, there is a navigation menu with links to "Home", "ITU-R", "Publications", "Recommendations", and "P Series". A search bar is also present. The main content area is titled "Radiowave propagation" and lists several recommendations:

- [P.310](#) Definitions of terms relating to propagation in non-ionized media
- [P.311](#) Acquisition, presentation and analysis of data in studies of radiowave propagation
- [P.313](#) Exchange of information for short-term forecasts and transmission of ionospheric disturbance warnings
Note - Suppressed on 10/10/2013 (CACE/636)
- [P.341](#) The concept of transmission loss for radio links
- [P.368](#) Ground-wave propagation prediction method for frequencies between 10 kHz and 30 MHz
- [P.369](#) Reference atmosphere for refraction



Συστάσεις της ITU-R Study Group 3 (ITU-R SG3)

Browser tabs: New Tab, Study Gro, ITU-R Rad, Study Gro, P.310: X, ITU Public

Address bar: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.310/en>

ITU International Telecommunication Union

Home : [ITU-R](#) : [Publications](#) : [Recommendations](#) : [P Series](#) : P.310

Recently posted - [Search Recommendations](#)

ITU Sectors | Newsroom | Events | Publications | Statistics | About ITU

P.310 : Definitions of terms relating to propagation in non-ionized media

Recommendation P.310

Approved in 2019-08

Managed by [R00-SG03](#)

Main			
Number	Title	Status	Questions
P.310-10 (08/2019)	Definitions of terms relating to propagation in non-ionized media	In force (Main)	N/A

Previous versions			
Number	Title	Status	Questions
P.310-9 (08/94)	Definitions of terms relating to propagation in non-ionized media	Superseded	N/A



Μοντέλα διάδοσης (Propagation Models)

Μας ενδιαφέρουν τα χαρακτηριστικά διάδοσης και τα μοντέλα για ραδιοκύματα με συχνότητα στην περιοχή: από λίγα MHz έως λίγα GHz

Η μοντελοποίηση ραδιοκαναλιού είναι σημαντική για:

- Προσδιορισμό της περιοχής κάλυψης ενός πομπού
- Προσδιορισμό της απαίτησης ισχύος του πομπού
- Προσδιορισμό τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας
- Εύρεση σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης για τη βελτίωση της ποιότητας του καναλιού και καθορισμό της μέγιστης χωρητικότητας καναλιού

Η διαδρομή μετάδοσης μεταξύ πομπού και δέκτη μπορεί να είναι:

- Μέσω οπτικής επαφής (LOS)
- Ή να εμποδίζεται από κτίρια, βουνά, φύλλωμα κλπ.

Ακόμη και η ταχύτητα κίνησης διαφόρων αντικειμένων στην πορεία του ραδιοσήματος επηρεάζει τα χαρακτηριστικά διαλείψεων των καναλιών



Μοντέλα διάδοσης (Propagation Models)

Τα μοντέλα διάδοσης συνήθως χρησιμοποιούνται για να προβλέψουν την μέση ισχύς σήματος για μια δεδομένη απόσταση από τον πομπό.

Διακρίνονται σε:

- Propagation models που προβλέπουν τη μέση ισχύς σήματος για αυθαίρετη απόσταση διαχωρισμού μεταξύ πομπού και δέκτη και είναι χρήσιμα για την εκτίμηση της περιοχής κάλυψης ραδιοσήματος. Αυτά ονομάζονται **μεγάλης κλίμακας (Large Scale) ή απώλειας διαδρομής (Path Loss)** Propagation models (αρκετές εκατοντάδες ή χιλιάδες μέτρα)
- Propagation models που χαρακτηρίζουν τις απότομες διακυμάνσεις στην λαμβανόμενη ένταση σήματος για μικρές αποστάσεις (της τάξης των λίγων μηκών κύματος) ή για μικρή διάρκεια (μερικά seconds) ονομάζονται **μικρής κλίμακας (Small Scale) ή Fading μοντέλα.**



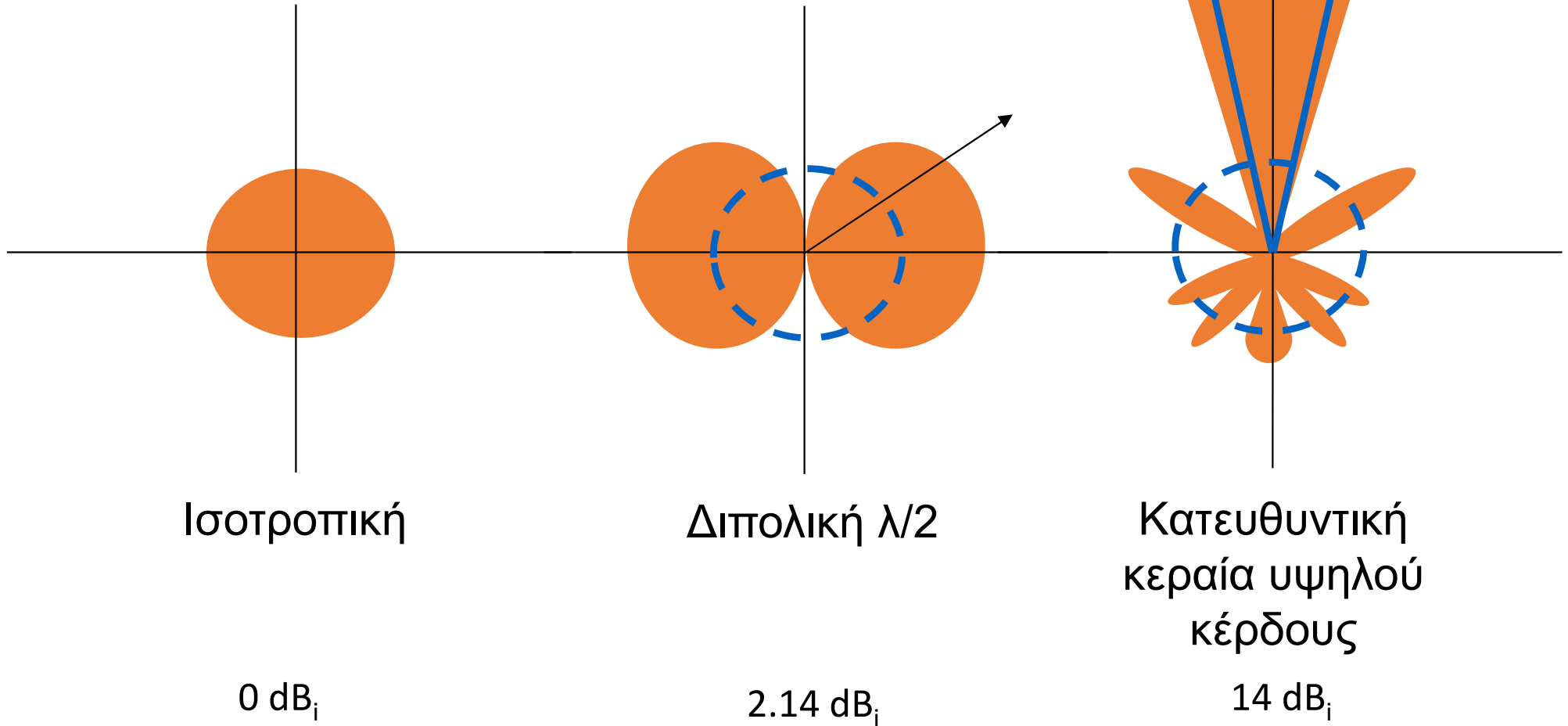
Μοντέλα διάδοσης (Propagation Models)

- Κέρδος κεραίας = $G = 4\pi \cdot A_e / \lambda^2$
- Όπου A_e είναι το ενεργό (effective) άνοιγμα της κεραίας που σχετίζεται με φυσικό μέγεθος της κεραίας
- Ιδανική κεραία: μια ιστροπική κεραία η οποία ακτινοβολεί ισχύ με μοναδιαίο κέρδος ($G = 1$) ομοιόμορφα σε όλες τις κατευθύνσεις
- **EIRP** (Effective Isotropic Radiated Power) = $P_t G_t = \frac{|E|^2}{n}$
 - Όπου G_t είναι η μέγιστη ενίσχυση (max gain) της κεραίας.
 - EIRP: Είναι η μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς στην κατεύθυνση του μέγιστου κέρδους
 - Στην πράξη αντί της EIRP , χρησιμοποιείται η **ERP**. Η **ERP** υποδηλώνει μέγιστη μεταδιδόμενη ισχύ σε σύγκριση με το δίπολο μισού μήκους κύματος
- Το $\lambda/2$ δίπολο έχει κέρδος 1.64 (2.15 dB μεγαλύτερο από το κέρδος της ιστροπικής κεραίας).
- Έτσι: **ERP= EIRP-2.15**
- Τα κέρδη των κεραιών δίνονται σε μονάδες dBi (κέρδος σε dB ως προς την ιστροπική κεραία) ή σε dBd (κέρδος σε dB ως προς την διπολική κεραία $\lambda/2$). Μοναδιαίο κέρδος σημαίνει $G = 1$ ή 0dBi



Κεραίες

$$G = \frac{P_{\text{directional}}}{P_{\text{isotropic}}}$$



Decibel (dB)

Το decibel (dB) είναι μια λογαριθμική μονάδα που χρησιμοποιείται για να περιγράψει έναν λόγο. Αν υποθέσουμε ότι έχουμε δύο τιμές P_1 και P_2 , ο λόγος μεταξύ τους μπορεί να εκφραστεί σε **dB** και υπολογίζεται ως εξής:

$$\left(\frac{P_1}{P_2} \right)_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

Παράδειγμα: ισχύς μετάδοσης $P_1 = 1000W$, ισχύς λήψης $P_2 = 10 W$
Ο λόγος των ισχύων σε dB θα είναι:

$$\left(\frac{P_1}{P_2} \right)_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{1000W}{10W} \right) = 10 \log_{10} (100) = 10 \log_{10} (10^2) = 20dB$$

Η μονάδα dB μπορεί να περιγράψει πολύ μεγάλους λόγους με αριθμούς μικρού ή μέτριου μεγέθους.



dBm και dBW

Για διαφορές ισχύος, το **dBm** χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει ένα επίπεδο ισχύος σε σχέση με το **1 mW** ως επίπεδο ισχύος αναφοράς. Αν π.χ. υποθέσουμε ότι η ισχύς εκπομπής P_t ενός συστήματος είναι 1kW. Η ισχύς αυτή σε **dBm** είναι:

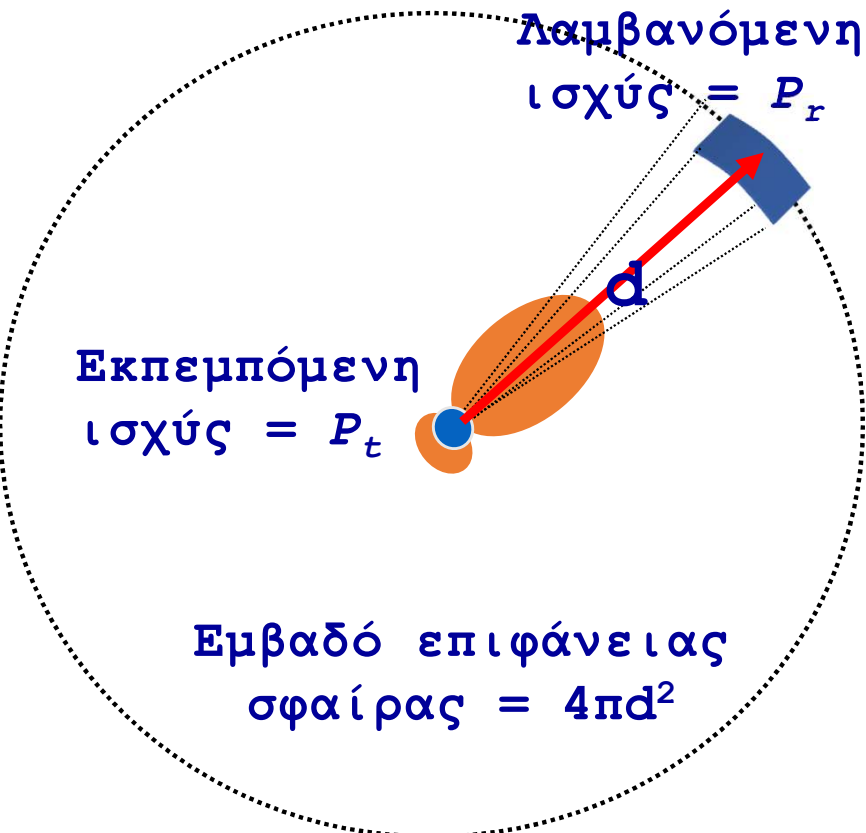
$$P_t (dBm) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_t}{1mW} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{1kW}{1mW} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{10^3}{10^{-3}} \right) = 10 \log_{10} (10^6) = 60dBm$$

Για διαφορές ισχύος, το **dBW** χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει ένα επίπεδο ισχύος σε σχέση με το **1 W** ως επίπεδο ισχύος αναφοράς. Αν π.χ. υποθέσουμε ότι η ισχύς εκπομπής P_t ενός συστήματος είναι 1kW. Η ισχύς αυτή σε **dBW** είναι:

$$P_t (dBW) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_t}{1W} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{1kW}{1W} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{10^3}{1} \right) = 10 \log_{10} (10^3) = 30dBW$$



Διάδοση στον ελεύθερο χώρο (Free Space Propagation Model)



Πρόγνωση έντασης λαμβανόμενου σήματος όταν ο πομπός και ο δέκτης έχουν μια σαφή γραμμή οπτικής διαδρομής μεταξύ τους (Line of sight - LOS) και ισχύουν συνθήκες μακρινού πεδίου

$$P_{di} = \frac{P_t}{4\pi d^2} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$
 Ισοτροπική πυκνότητα ισχύος σε απόσταση d

$$P_d = \frac{P_t}{4\pi d^2} G_t$$
 Πυκνότητα ισχύος στη διεύθυνση της μέγιστης εκπομπής

$$P_r = P_d A_{eff}$$
 Ισχύς που λαμβάνεται από την κεραία

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} A_{r,eff} \quad A_{r,eff} = G_r \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

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

Εξίσωση για ελεύθερο χώρο γνωστή και ως εξίσωση **Friis**

Διάδοση στον ελεύθερο χώρο (Free Space Propagation Model)

Γενικότερα στην στον ελεύθερο χώρο που υπάρχουν πρόσθετες απώλειες L , η λαμβανόμενη ισχύς P_r σε απόσταση d από την πηγή δίνεται από τον τύπο:

$$P_r(d) = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \cdot \frac{1}{L}$$

όπου:

P_t η ισχύς εκπομπής,

G_t το κέρδος της κεραίας στον πομπό,

G_r το κέρδος της κεραίας στον δέκτη,

$\lambda = c/f_o$ το μήκος κύματος του φέροντος,

c η ταχύτητα του φωτός ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

f_o η συχνότητα του φέροντος

L συντελεστής απωλειών (συστήματα πομπού ή δέκτη)



Διάδοση στον ελεύθερο χώρο (Free Space Propagation Model)

Παρατηρήσεις:

$$P_r(d) = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \cdot \frac{1}{L}$$

1. Είναι: $P_r(d)$ ανάλογη του d^{-2} και του f^2
2. Διαιρώντας κατά μέλη με P_t , αντιστρέφοντας και παίρνοντας τους δεκαδικούς λογάριθμους, λαμβάνουμε τις απώλειες διαδρομής:

$$Path Loss = PL(d) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_t}{P_r(d)} \right) = -10 \log_{10} \left[G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \cdot \frac{1}{L} \right]$$

Αυτές οι σχέσεις ισχύουν για το μακρινό πεδίο (Fraunhofer region) δηλαδή για την περιοχή που το μέτωπο του κύματος μπορεί να θεωρείται επίπεδο.

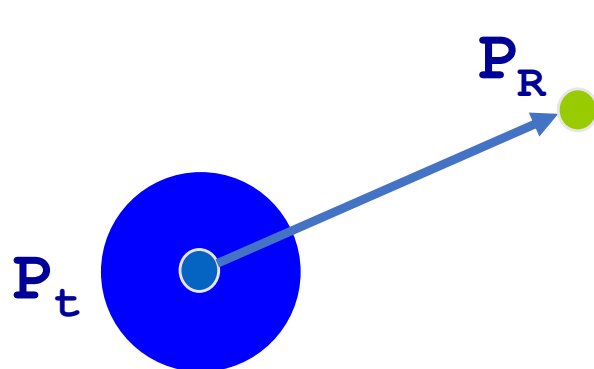
Το μακρινό πεδίο μιας κεραίας είναι η περιοχή πέρα από την απόσταση:

$$d_f > 2D^2 / \lambda \quad \text{όπου } D \text{ είναι}$$

η μεγαλύτερη γραμμική διάσταση της κεραίας και $df \gg D, df \gg \lambda$



Απώλειες διαδρομής (Path Loss)



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

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \frac{0.57 * 10^{-3}}{(df)^2} \quad \begin{array}{l} f \text{ σε MHz} \\ d \text{ σε Km} \end{array}$$

$$\left(\frac{P_r}{P_t} \right)_{dB} = (G_t)_{dBi} + (G_r)_{dBi} - (32.44 + 20 \log_{10} d_{Km} + 20 \log_{10} f_{MHz})$$

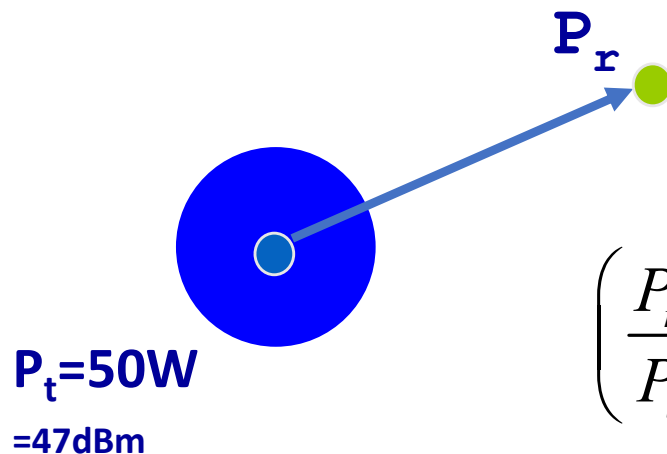
Path Loss αντιπροσωπεύει εξασθένηση σήματος (μετράται σε dB) ανάμεσα στην ισχύ εκπομπής και την ισχύ λήψης (εκτός από απολαβές κεραιών)

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



Απώλειες διαδρομής (Path Loss): Παράδειγμα

Υποθέστε ισοτροπικές κεραίες και υπολογίστε την λαμβανόμενη ισχύ σε dBm για απόσταση 100m από μια κεραία στην συχνότητα $f=900\text{MHz}$. Ποια είναι η P_R στα 10Km?



$$\left(\frac{P_r}{P_t} \right)_{dB} = (G_t)_{dB} + (G_r)_{dB} - (32.5 + 20 \log_{10} d + 20 \log_{10} f)$$

$$\left(\frac{P_r}{P_t} \right)_{dB} = 0 + 0 - (32.5 + 20 \log_{10} 0.1 + 20 \log_{10} 900) \rightarrow 59$$

-20 (για $d = 0.1$)

20 (για $d = 10$)

$$\left(\frac{P_r}{P_t} \right)_{dB} = -71.5\text{dB}$$

$$\left(\frac{P_r}{P_t} \right)_{dB} = -111.5\text{dB}$$

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

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



Απώλειες διαδρομής (Path Loss): Παράδειγμα

Δύο όμοια δίπολα το καθένα με κέρδος **2**, βρίσκονται σε απόσταση **100m** στον ελεύθερο χώρο. Η ισχύς εκπομπής του ενός διπόλου είναι **10mW** στη συχνότητα των **2.4GHz**. Ποια είναι η ισχύς λήψης από το άλλο?

Απάντηση:

$$PL(dB) = 32.4 + 20 \log_{10} 2400 + 20 \log_{10} 0.1 = 80dB$$

$$\left(\frac{P_r}{P_t} \right)_{dB} = (G_t)_{dB} + (G_r)_{dB} - PL(dB) \Rightarrow 10 \log_{10}(P_r) - 10 \log_{10}(P_t) = (G_t)_{dB} + (G_r)_{dB} - PL(dB) \Rightarrow$$
$$\Rightarrow P_r(dBW) = 10 \log_{10} \left(\frac{10^{-2}W}{1W} \right) + 10 \log_{10}(2) + 10 \log_{10}(2) - 80.0 = -94.0dBW$$

Αυτή η ισχύς αντιστοιχεί σε περίπου:

$$P_r(dBW) = -94 = 10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{1W} \right) \Rightarrow \frac{-94}{10} = \log_{10} \left(\frac{P_r}{1W} \right) \Rightarrow 10^{\frac{-94}{10}} = \frac{P_r}{1W} \Rightarrow P_r = 10^{-9.4}W \approx 4nW$$



Διάδοση στον ελεύθερο χώρο: Παρατηρήσεις

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

Παρατηρούμε πως αν γνωρίζουμε την λαμβανόμενη ισχύ σε απόσταση d_0 , τότε μπορούμε να υπολογίσουμε την λαμβανόμενη ισχύ σε απόσταση d από τη σχέση:

$$\frac{P_r(d)}{P_r(d_0)} = \frac{\frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L}}{\frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d_0^2 L}} = \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \Rightarrow P_r(d) = P_r(d_0) \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^2$$

Στη γενική περίπτωση ισχύει:
$$P_r(d) = P_r(d_0) \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^n$$

Όπου n είναι ο εκθέτης απωλειών που εξαρτάται από το είδος του περιβάλλοντος.



Διάδοση στον ελεύθερο χώρο: Παρατηρήσεις

Στην πραγματικότητα, LOS συνθήκες μπορεί να μην υπάρχουν σε αστικές περιοχές. Επομένως, το μοντέλο απώλειας διαδρομής ελεύθερου χώρου γενικεύεται

$$P_r(d) = P_r(d_0) \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^n \quad \text{ή σε dBm:}$$

$$P_r(d)_{dBm} = 10 \log_{10} \left[\frac{P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d}\right)^n}{1mW} \right] = 10 \log_{10} \left(\frac{P_r(d_0)}{1mW} \right) + 10n \log_{10} \left(\frac{d_0}{d} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_r(d)_{dBm} = P_r(d_0)_{dBm} + 10n \log \left(\frac{d_0}{d} \right)$$



Διάδοση στον ελεύθερο χώρο: Παρατηρήσεις

Το n ονομάζεται εκθέτης απωλειών και υποδεικνύει τον ρυθμό με τον οποίο αυξάνεται η απώλεια διαδρομής με την απόσταση d , τα εμπόδια στη διαδρομή, το περιβάλλον κλπ. Όσο χειρότερο είναι το περιβάλλον τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του n

Εκθέτης απωλειών για διαφορετικά περιβάλλοντα

Environment	Path Loss Exponent, n
Free space	2
Urban area cellular radio	2.7 to 3.5
Shadowed urban cellular radio	3 to 5
In building line-of-sight	1.6 to 1.8
Obstructed in building	4 to 6
Obstructed in factories	2 to 3



Διάδοση στον ελεύθερο χώρο: Παρατηρήσεις

Αν είναι γνωστές σε **dB** οι απώλειες διαδρομής **$PL(d_0)$** σε μια απόσταση **d_0** (στις απώλειες **PL** συμπεριλαμβάνονται όλες οι πιθανές κατά μέσο όρο απώλειες διαδρομής), τότε οι απώλειες διαδρομής σε **dB** σε μια απόσταση **d** δίνονται από τη σχέση:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

Απόδειξη:

$$\begin{aligned} PL(d) &= 10 \log_{10} \left(\frac{P_t}{P_r(d)} \right) = -10 \log_{10} \left[G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^n \cdot \frac{I}{L} \right] = \\ &= -10 \log_{10} \left[G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \cdot \frac{d_0}{d_0} \right)^n \cdot \frac{I}{L} \right] = -10 \log_{10} \left[G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0} \cdot \frac{d_0}{d} \right)^n \cdot \frac{I}{L} \right] = \\ &= -10 \log_{10} \left[G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0} \right)^n \cdot \frac{I}{L} \right] - 10 \log_{10} \left(\frac{d_0}{d} \right)^n = PL(d_0) - 10 \log_{10} \left(\frac{d_0}{d} \right)^n \Rightarrow \\ &\Rightarrow PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \end{aligned}$$



Απώλειες διαδρομής (Path Loss): Παράδειγμα

Υποθέστε ότι ένας πομπός έχει ισχύ εκπομπής $P_t=100W$.

- a) Να βρεθεί η ισχύς σε ***dBm***
- b) Να βρεθεί η ισχύς σε ***dBW***
- c) Εάν σε απόσταση $d_o = 500m$ η λαμβανόμενη ισχύς είναι $P_r(d_o)=0.0012mW$, να βρεθεί η λαμβανόμενη ισχύς σε απόσταση $d=10Km$ για διάδοση ελευθέρου χώρου ($n=2$).
- d) Ποιες είναι οι απώλειες διαδρομής στις αποστάσεις d_o και d ?

Απάντηση:

$$a) \quad P_t (dBm) = 10 \log_{10} \frac{P_t}{1mW} = 10 \log_{10} \frac{100W}{1mW} = 10 \log_{10} 10^5 = 50dBm$$

$$b) \quad P_t (dBW) = 10 \log_{10} \frac{P_t}{1W} = 10 \log_{10} \frac{100W}{1W} = 10 \log_{10} 10^2 = 20dBW$$

$$\text{Παρατηρούμε ότι:} \quad P_{dBm} = P_{dBW} + 30dB$$



Απώλειες διαδρομής (Path Loss): Παράδειγμα

$$c) \quad P_r(d) = P_r(d_0) \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^n = 0.0012mW \cdot \left(\frac{0.5Km}{10Km}\right)^2 = 0.0012mW \cdot 0.0025 = 3nW$$

$$d) \quad PL(d_0)_{dB} = 10 \log_{10} \frac{\text{Αρχική Ισχύς σήματος}}{\text{Τελική Ισχύς σήματος στην απόσταση } d_0} = 10 \log_{10} \frac{100W}{0.0012mW} \approx 79.21dB$$

$$PL(d)_{dB} = 10 \log_{10} \frac{\text{Αρχική Ισχύς σήματος}}{\text{Τελική Ισχύς σήματος στην απόσταση } d} = 10 \log_{10} \frac{100W}{3nW} \approx 105.23dB$$

Διαφορετικά οι απώλειες διαδρομής στην απόσταση **d** μπορούν να υπολογιστούν και από τη σχέση:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) = 79.21dB + 10 \cdot 2 \cdot \log_{10}\left(\frac{10000m}{500m}\right) \Rightarrow$$

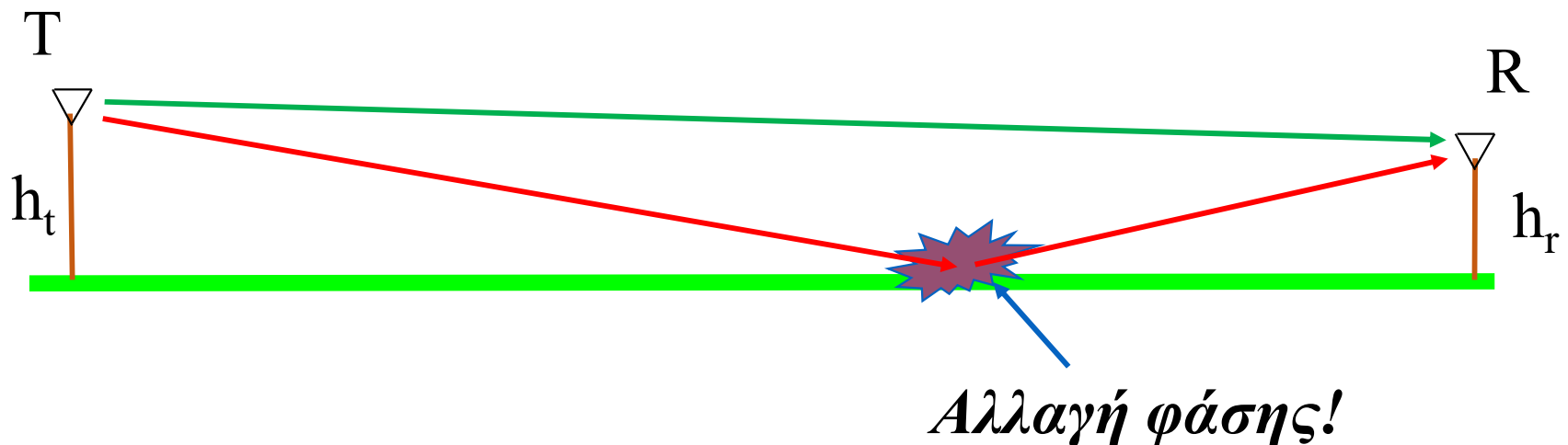
$$\Rightarrow PL(d) \approx 79.21dB + 26.02dB \approx 105.23dB$$



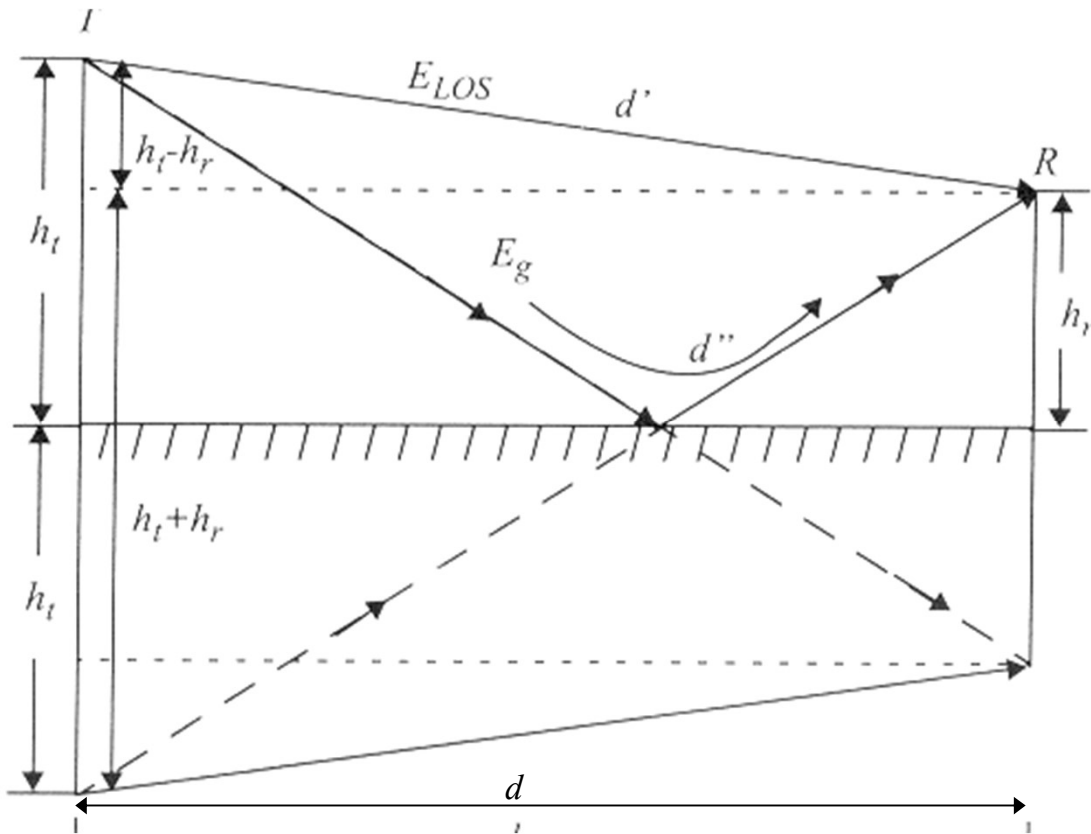
Μοντέλο Δύο ακτίνων (2-ray Ground Reflection Model)

Το μοντέλο διάδοσης ελευθέρου χώρου δεν λαμβάνει υπ' όψιν τις ανακλάσεις του σήματος. Το σήμα που εκπέμπεται από μια επίγεια κεραία λαμβάνεται από μια άλλη επίγεια κεραία παρουσία **ισχυρών ανακλάσεων** από το έδαφος.

Το μοντέλο αυτό είναι αρκετά ακριβές για την πρόβλεψη της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος από υψηλές κεραίες μετά από διαδρομή αρκετών χιλιομέτρων.



Μοντέλο Δύο ακτίνων



Το κυριότερο πραγματικό πρόβλημα που εισάγεται στο μοντέλο των δύο ακτίνων είναι η *διαφορά φάσης των δύο ακτίνων*. Για να γίνει αυτό πρέπει να μελετηθεί το η/μ πεδίο ως προς την ένταση και όχι προς την ισχύ του.

Αυτό γιατί η ένταση του καθορίζει τάση κατά μέτρο και φάση στην κεραία λήψης.

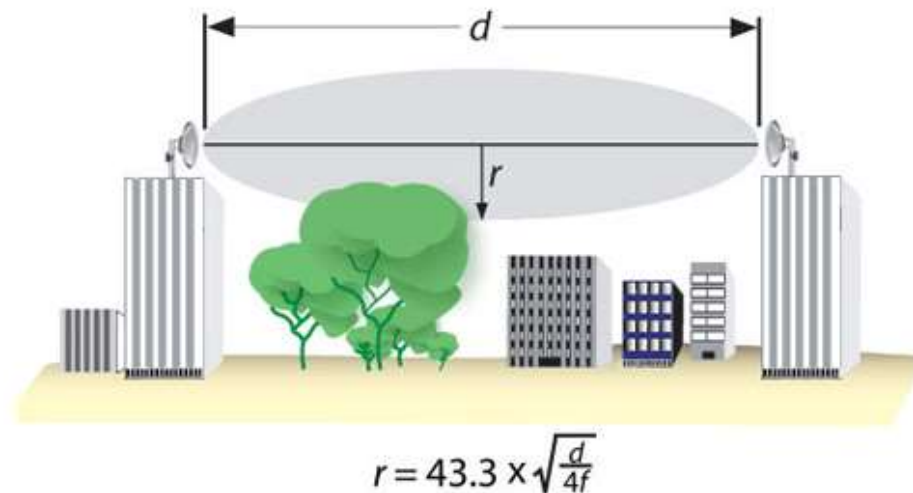
Αποδεικνύεται ότι:
$$P_r(d) = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4}$$

Μοντέλο Δύο ακτίνων: Συμπεράσματα - Προεκτάσεις

Αυτό σημαίνει ότι με το μοντέλο δυο ακτίνων η ισχύς λήψης φθίνει με το d^{-4} αντί με το d^{-2} (που είχαμε στον ελεύθερο χώρο).

Η λαμβανόμενη ισχύς φθίνει με ρυθμό **40dB** για κάθε δεκαπλασιασμό της απόστασης

Και άλλοι παράγοντες επηρεάζουν την ισχύ λήψης εκτός από τις ανακλάσεις (π.χ. Fresnel Zones)



Μέσης τιμές μεγάλης κλίμακας μοντέλα διάδοσης (Average Large Scale Path Loss Models)

Στην πράξη, συχνά βρίσκουμε ότι η έκφραση για τις απώλειες δίνει απλά μια μέση τιμή και σε πολλές περιπτώσεις οι απώλειες διάδοσης παρουσιάζουν διακυμάνσεις. Έτσι προκύπτουν τα Μέσης τιμές μεγάλης κλίμακας μοντέλα διάδοσης (Average Large Scale Path Loss Models) που προβλέπουν την μέση τιμή απωλειών διάδοσης $\overline{PL}(d)$

$$\overline{PL}(d) = \frac{P_t(d)}{P_r(d)} \propto \left(\frac{d}{d_0} \right)^n$$

$$\overline{PL}(dB) = \overline{PL}(d_0) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right)$$

Η $\overline{PL}(d_0)$ υπολογίζεται συνήθως υποθέτοντας free space propagation model ανάμεσα στον πομπό για απόσταση d_0 (ή από μετρήσεις).



Log Normal Shadowing (Σκίαση)

Οι μετρήσεις έχουν δείξει ότι για οποιαδήποτε τιμή του d , οι απώλειες διαδρομής $PL(d)$ σε dB σε μια θέση είναι τυχαίες και έχουν κανονική κατανομή (log normal distribution = normal distribution of $\log_{10}(\bullet)$).

Έτσι ένα πιο ακριβές μοντέλο για τις απώλειες διάδοσης είναι:

$$PL(d)_{dB} = \overline{PL}(d) + X_{\sigma} = \overline{PL}(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{\sigma}$$

όπου, η γραμμή πάνω από σύμβολο σημαίνει μέση τιμή και η X_{σ} είναι μια τυχαία μεταβλητή με κανονική κατανομή (Gaussian) σε dB και σ είναι η **τυπική απόκλιση του X** (standard deviation of X).



Log Normal Shadowing (Σκίαση)

- Ένα κοινό μοντέλο για την X_σ είναι μια **Gaussian μεταβλητή** με μέση τιμή 0 και μεταβλητότητα σ (επίσης σε dB).
- Όταν ο λογάριθμος είναι Gaussian, η κατανομή πιθανότητας αναφέρεται ως **log-normal**.
- Η απώλεια διάδοσης που παριστάνεται με αυτό το μοντέλο αναφέρεται ως **απώλεια λόγω σκίασης** (shadowing).
- Η απώλεια σκίασης που ακολουθεί το μοντέλο log-normal ονομάζεται log-normal shadowing.
- Η απώλεια σκίασης σημαίνει ότι για δεδομένη απόσταση πομπού-δέκτη, η ένταση του σήματος, σε **dB**, έχει κατανομή Gauss γύρω από μια μέση τιμή που εξαρτάται από την απόσταση.
- Η μέση απώλεια διάδοσης και η μεταβλητότητα σ^2 μπορούν να εκτιμηθούν από τις μετρήσεις.



Μοντέλο Okumura

- Χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ισχύος του σήματος σε **αστικές περιοχές και ημιαστικές περιοχές**, όπου οι αλλαγές του εδάφους είναι αργές.
- Είναι εξ ολοκλήρου βασισμένο σε δεδομένα μετρήσεων και δεν παρέχει καμία αναλυτική εξήγηση.
- Αναπτύχθηκε από εκτεταμένες μετρήσεις χρησιμοποιώντας κάθετες πανκατευθυντικές κεραίες στον σταθμό βάσης και στους κινητούς δέκτες.
- Είναι από τα απλούστερα και καλύτερα για την ακρίβεια απώλειας διαδρομής σε περιβάλλον κινητής τηλεφωνίας.
- Το μοντέλο συνίσταται από ένα σύνολο καμπυλών με τις οποίες είναι δυνατή η εκτίμηση της ενδιάμεσης (L_{50} , 50% ή median) απόσβεσης σε σχέση με τον ελεύθερο χώρο.



Μοντέλο Okumura

- Οι βασικές καμπύλες του μοντέλου δίδονται για το:
 - Ύψος κεραίας εκπομπής
 - Ύψος κεραίας λήψης
- Οι καμπύλες δίνουν την ενδιάμεση (median) απόσβεση σαν συνάρτηση της συχνότητας.
- Το βασικό μοντέλο εφαρμόζεται σε συχνότητες από **150MHz ως 1920MHz**, και επεκτείνεται (υπό συνθήκες) ως τα **3000MHz**
- Οι αποστάσεις είναι μεταξύ **1km και 100km** και τα ύψη των κεραιών εκπομπής είναι από **30m έως 1000m**
- Οι αποκλίσεις μεταξύ προβλεπόμενης και μετρούμενης απόσβεσης είναι **10 έως 14 dB**



Μοντέλο Okumura

Η median (L_{50}) απόσβεση διάδοσης μπορεί να βρεθεί από την ακόλουθη έκφραση, όπου όλες οι ποσότητες είναι σε **dB**:

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

Όπου:

Οι απώλειες ελευθέρου χώρου L_f είναι: $L_f = 10 \log \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}$
 $A(f, d)$ η μέση εξασθένηση σε σχέση με τον ελεύθερο χώρο
 f η συχνότητα του φέροντος σε MHz,
 d η απόσταση σε km, και

$G(h_t) = 20 \log(h_t / 200)$ Κέρδος κεραίας εκπομπής, για $30\text{m} < h_t < 1000\text{m}$

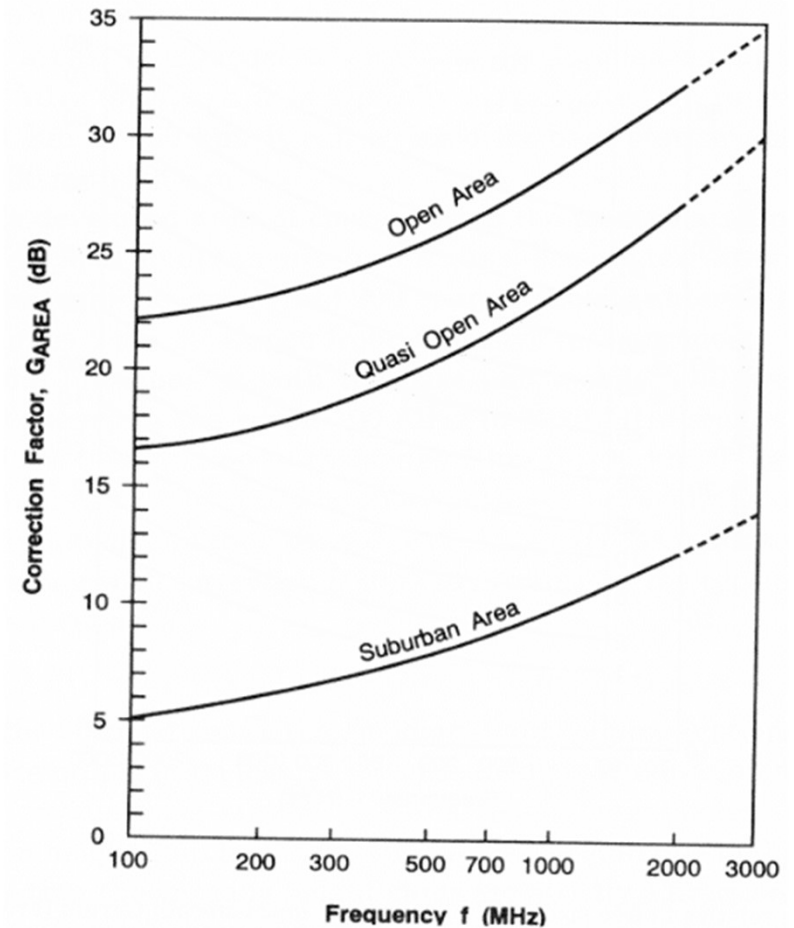
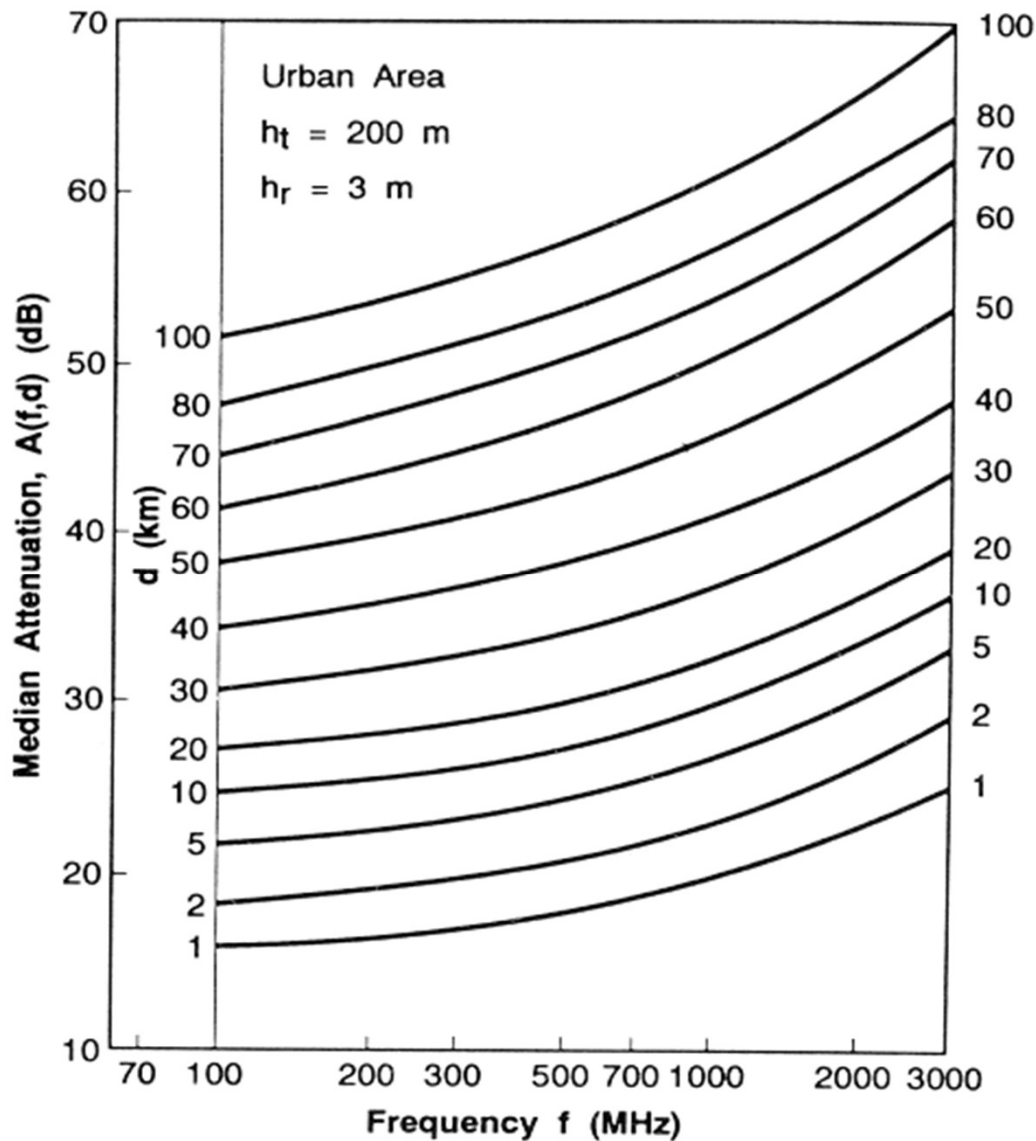
$G(h_r) = 10 \log(h_r / 3)$ Κέρδος κεραίας λήψης, για $h_r \leq 3\text{m}$

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

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



Μοντέλο Okumura



Median εξασθένιση: $A(f,d)$

Συντελεστής διόρθωσης G_{area}



Μοντέλο Hata

- Το μοντέλο Hata είναι η **εμπειρική αλγεβρική έκφραση** της απώλειας διαδρομής η οποία παρέχεται γραφικά από το μοντέλο Okamura.
- 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 :
 - Η συχνότητα σε MHz
 - Το ύψος της κεραίας σε m
 - Η απόσταση πομπού-δέκτη σε km



Μοντέλο Hata

Η έκφραση για την μέση (median, L_{50}) απόσβεση σε ***dB*** σε ένα αστικό περιβάλλον για απόσταση ***d*** δίδεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$L_{50}(dB) = \begin{cases} A + B \log_{10}(d) & \text{για αστική περιοχή (urban area)} \\ A + B \log_{10}(d) - C & \text{για ημιαστική περιοχή (suburban area)} \\ A + B \log_{10}(d) - D & \text{για ανοιχτή περιοχή (rural area)} \end{cases}$$

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

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

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

$$D = 40.94 + 4.78[\log_{10}(f_c)]^2 - 19.33 \log_{10}(f_c)$$

όπου: h_b το ύψος της κεραίας στο BS,

h_m το ύψος της κεραίας στο MS



Μοντέλο Hata

Όπου: h_b το ύψος της κεραίας στο BS,

h_m το ύψος της κεραίας στο MS

και

$$a(h_m)_{dB} = \begin{cases} (1.1 \log_{10}(f_c) - 0.7)h_m - (1.56 \log_{10}(f_c) - 0.8) \\ \quad \text{Για μέτρια ή μικρή πόλη} \\ \left\{ \begin{array}{ll} 8.28(\log_{10}(1.54h_m))^2 - 1.1 & \text{για } f_c \leq 300\text{MHz} \\ 3.2(\log_{10}(11.75h_m))^2 - 4.97 & \text{για } f_c > 300\text{MHz} \end{array} \right. \\ \quad \text{Για μεγάλη πόλη} \end{cases}$$

$a(h_m)$ Είναι ο συντελεστής διόρθωσης για το ενεργό ύψος του κινητού δέκτη το οποίο είναι συνάρτηση της περιοχής ραδιοκάλυψης



ΑΣΚΗΣΕΙΣ



ΑΣΚΗΣΗ 1

Σε ένα τερματικό κινητής τηλεφωνίας η ισχύς του ωφέλιμου σήματος που λαμβάνεται είναι **$15nW$** και η ισχύς του θορύβου στο ίδιο εύρος ζώνης είναι **$1nW$** . Θεωρούμε ότι το όριο καλής λειτουργίας του τερματικού (SNR threshold) για να αποκωδικοποιηθεί σωστά το σήμα φωνής είναι **9 dB** .

- i) Να βρεθεί ο σηματοθορυβικός λόγος σε dB. Μπορεί το τερματικό να λειτουργήσει και να λάβει σωστά το σήμα;
- ii) Λόγω της αλλαγής της θέσης του συνδρομητή, το ωφέλιμο σήμα εξασθενεί κατά **$5dB$** . Αν θεωρηθεί ότι η ισχύς του θορύβου παραμένει σταθερή, πώς διαμορφώνεται ο σηματοθορυβικός λόγος στην καινούργια θέση;



Απάντηση (1)

i) Ο σηματοθορυβικός λόγος (SNR) στο δέκτη είναι:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{S}{N} = 10 \log_{10} \frac{15nW}{1nW} = 10 \log_{10} 15 = 10 * 1.17 = 11.7dB$$

Επειδή το SNR είναι υψηλότερο από το όριο λειτουργίας (9dB), το τερματικό μπορεί να αποκωδικοποιήσει σωστά το σήμα φωνής.

ii) Έστω $P_i = 15nW$ η ισχύς του ωφέλιμου σήματος πριν από την εξασθένηση και P_{ii} η ζητούμενη ισχύς μετά την εξασθένηση.

Η εξασθένηση εκφράζεται ως:

$$A_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_i}{P_{ii}} \Rightarrow 5 = 10 \log_{10} \frac{15nW}{P_{ii}} \Rightarrow P_{ii} = 4.74nW$$

οπότε το SNR στη νέα θέση είναι:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{S}{N} = 10 \log_{10} \frac{4.74nW}{1nW} = 10 \log_{10} 4.74 = 10 * 0.67 = 6.7dB$$

Επειδή το SNR είναι χαμηλότερο από το όριο λειτουργίας (9dB), το τερματικό δεν μπορεί να αποκωδικοποιήσει σωστά το σήμα



ΑΣΚΗΣΗ 2

Ένας σταθμός βάσης κινητής τηλεφωνίας έχει ισχύ εκπομπής **$1W$** . Ένα κινητό τερματικό βρίσκεται σε κλειστό χώρο. Οι απώλειες διαδρομής είναι **$80dB$** , οι απώλειες σκίασης λόγω της διέλευσης του σήματος μέσα από τον τοίχο είναι **$15dB$** και η απώλειες διαλείψεων λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης είναι **$5 dB$** .

Στο κινητό τερματικό, η ισχύς του θορύβου στο εύρος ζώνης του σήματος είναι **$8pW$** . Το κατώφλι καλής λειτουργίας του τερματικού είναι **$9dB$** .

Να βρεθεί αν το τερματικό μπορεί να λάβει σωστά το σήμα.
(Αγνοήστε τα κέρδη (gain) των κεραιών)



Απάντηση (2)

Η συνολική απώλεια του σήματος από το σταθμό βάσης μέχρι το τερματικό είναι: $PL = 80\text{dB} + 15\text{dB} + 5\text{dB} = 100\text{dB}$

Αν P_T η ισχύς εκπομπής και P_R η ισχύς που λαμβάνεται στο κινητό τερματικό, η λαμβανόμενη από το τερματικό ισχύς θα βρεθεί από την:

$$\begin{aligned} PL_{dB} &= 10\log_{10} \frac{P_T}{P_R} \Leftrightarrow 100\text{dB} = 10\log_{10} \frac{1W}{P_R} \Leftrightarrow \frac{100}{10} = \log_{10} \frac{1W}{P_R} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow 10^{10} = \frac{1W}{P_R} \Leftrightarrow P_R = \frac{1W}{10^{10}} \Leftrightarrow P_R = 10^{-10}W = 100\text{pW} \end{aligned}$$

Συνεπώς, ο σηματοθορυβικός λόγος στο τερματικό θα είναι:

$$SNR_{dB} = 10\log_{10} \frac{S}{N} = 10\log_{10} \frac{P_R}{P_N} = 10\log_{10} \frac{100\text{pW}}{8\text{pW}} = 10.9\text{dB}$$

που είναι υψηλότερος από το κατώφλι καλής λειτουργίας, άρα το τερματικό μπορεί υπό αυτές τις συνθήκες να αποκωδικοποιήσει σωστά το σήμα.



ΑΣΚΗΣΗ 3

Ένας χρήστης κινητού τηλεφώνου βρίσκεται μέσα σε ένα κτίριο. Έξω από το κτίριο και σε απόσταση **2000m** βρίσκεται ο σταθμός βάσης. Η ισχύς εκπομπής του σταθμού βάσης είναι **5W**.

- i) Αν οι απώλειες διαδρομής σε απόσταση **20m** από το σταθμό βάσης είναι **40dB** και ο εκθέτης απωλειών είναι ίσος με **$n=3$** , να υπολογιστούν οι απώλειες διαδρομής του σήματος σε **dB** από το σταθμό βάσης μέχρι έξω από το κτίριο.
- ii) Αν οι τοίχοι του κτιρίου προκαλούν επιπλέον εξασθένηση **15dB**, να βρεθεί η ισχύς του σήματος στο δέκτη.

Αγνοήστε τα κέρδη (gain) των κεραιών.



Απάντηση (3)

- i) Οι συνολικές απώλειες διαδρομής υπολογίζονται με βάση τις απώλειες στην απόσταση αναφοράς από τη σχέση:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

Επομένως θα είναι:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) = 40dB + 10 * 3 * \log_{10}\left(\frac{2000m}{20m}\right) = 40dB + 60dB = 100dB$$

- ii) Δεδομένου ότι οι τοίχοι του κτιρίου προκαλούν επιπλέον εξασθένηση 15 dB, η συνολική εξασθένηση του σήματος από το σταθμό βάσης μέχρι το κινητό τερματικό είναι $PL = 100dB + 15dB = 115dB$. Γνωρίζοντας τη συνολική εξασθένηση, υπολογίζουμε την ισχύ του σήματος P_R στο τερματικό (όπου P_T η εκπεμπόμενη ισχύς από το σταθμό βάσης):

$$L_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_T}{P_R} \Leftrightarrow 115dB = 10 \log_{10} \frac{5W}{P_R} \Leftrightarrow \frac{115}{10} = \log_{10} \frac{5W}{P_R} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow 10^{11.5} = \frac{5W}{P_R} \Leftrightarrow P_R = \frac{5W}{10^{11.5}} \Leftrightarrow P_R = 10^{-11.5} * 5W = 10^{-9} * 10^{-2.5} * 5W = 15.8pW$$



ΑΣΚΗΣΗ 4

Ένας σταθμός βάσης εκπέμπει με ισχύ **$1W$** . Θεωρούμε απώλειες διαδρομής με εκθέτη απωλειών **$n=3$** . Δίνεται ότι σε απόσταση **$30m$** από το σταθμό βάσης, οι απώλειες διαδρομής είναι **$50dB$** .

Στο κινητό τερματικό η ισχύς θορύβου στο εύρος ζώνης του σήματος είναι **$P_N=10pW$** και το κατώφλι σηματοθορυβικού λόγου για την καλή λειτουργία και τη σωστή αποκωδικοποίηση του σήματος είναι **$9dB$** .

Ποια είναι η μέγιστη απόσταση **D_{max}** του κινητού τερματικού από το σταθμό βάσης ώστε το σήμα να λαμβάνεται σωστά;
(Αγνοήστε τα κέρδη (gain) των κεραιών)



Απάντηση (4)

Στο κινητό τερματικό η ισχύς θορύβου θεωρείται σταθερή, οπότε με την απομάκρυνση από το σταθμό βάσης η ισχύς του λαμβανομένου σήματος ελαττώνεται και άρα ελαττώνεται και ο σηματοθορυβικός λόγος.

Στη ζητούμενη μέγιστη απόσταση (D_{max}) ο σηματοθορυβικός λόγος θα είναι 9dB, ίσος με το κατώφλι και το κινητό τερματικό θα λειτουργεί οριακά.

Στην απόσταση αυτή, η ισχύς του λαμβανομένου σήματος υπολογίζεται ως εξής:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{S}{N} = 10 \log_{10} \frac{P_{D_{max}}}{P_N} \Leftrightarrow 9dB = 10 \log_{10} \frac{P_{D_{max}}}{P_N}$$
$$\Leftrightarrow 10^{\frac{9}{10}} = \frac{P_{D_{max}}}{P_N} \Leftrightarrow 10^{0.9} * P_N = P_{D_{max}} \Leftrightarrow P_{D_{max}} = 7.94 * 10 pW = 79.4 pW$$

Συνεπώς, στη μέγιστη απόσταση, η λαμβανόμενη ισχύς θα είναι **79,4pW**



Απάντηση (4)

Οι απώλειες διαδρομής θα είναι:

$$L_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_T}{P_R} = 10 \log_{10} \frac{1W}{P_{D_{\max}}} = 10 \log_{10} \frac{1W}{79.4 pW} = 10 \log_{10} \frac{10^{12} pW}{79.4 pW} \Leftrightarrow$$
$$\Leftrightarrow L_{dB} = 10 \log_{10} (10^{10} * \frac{100}{79.4}) = 10 \log_{10} (10^{10}) + 10 \log_{10} (1.26) = 101 dB$$

Χρησιμοποιούμε την τιμή αυτή στον τύπο που υπολογίζει τις απώλειες διαδρομής. Χρησιμοποιούμε την απόσταση αναφοράς **$d_0=30m$** και **$n=3$** . Είναι:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{D_{\max}}{d_0} \right) \Leftrightarrow$$
$$\Leftrightarrow 101 dB = 50 dB + 10 * 3 * \log_{10} \left(\frac{D_{\max}}{30m} \right) \Leftrightarrow 10^{\frac{51}{30}} = \left(\frac{D_{\max}}{30m} \right) \Leftrightarrow D_{\max} = 30 * 50.12m = 1503.6m$$





ΕΛΜΕΠΑ – ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΚΕΡΑΙΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ**

Διδάσκων: Στρατάκης Δημήτριος



ΕΛΜΕΠΑ – ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΚΕΡΑΙΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ**

Διδάσκων: Στρατάκης Δημήτριος



ΕΛΜΕΠΑ – ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΚΕΡΑΙΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ**

Διδάσκων: Στρατάκης Δημήτριος