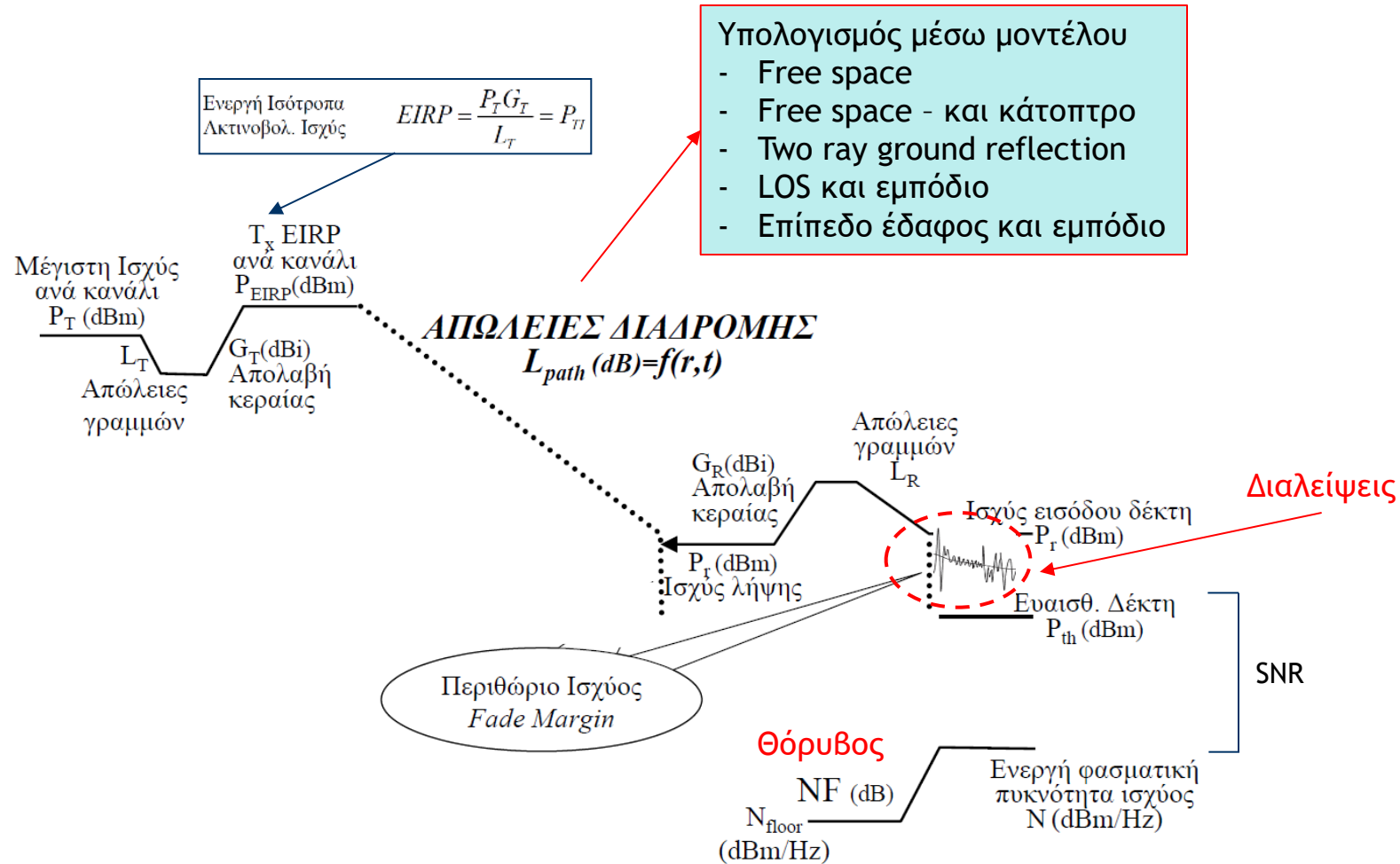


Ψηφιακές Επικοινωνίες

Κεφ 5: Ανάλυση Ζεύξης

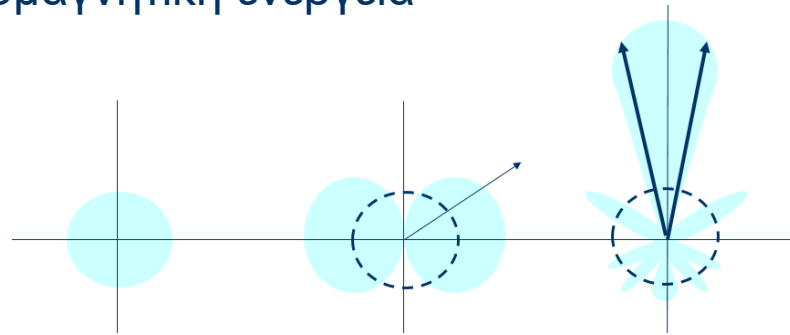
Ισοζύγιο Ζεύξης (Link budget)



Θόρυβος δέκτη: Noise floor (αναπόφευκτο) + Noise figure (κατασκευαστικό)

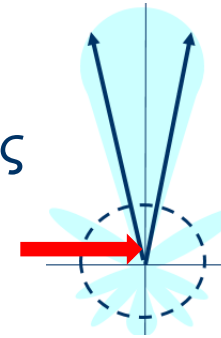
Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

- Κεραίες
 - Η κεραία είναι ένας ηλεκτρικός αγωγός (ή σύστημα αγωγών) που μετατρέπει ένα ηλεκτρικό σήμα σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα και αντίστροφα
- Μια κεραία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκπομπή και λήψη
 - εκπέμπει ή/και συλλέγει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια
- Κάθε κεραία χαρακτηρίζεται από:
 - το διάγραμμα ακτινοβολίας
 - την κατευθυντικότητα της
 - το κέρδος της (απολαβή με βάση της ενεργό περιοχής της)



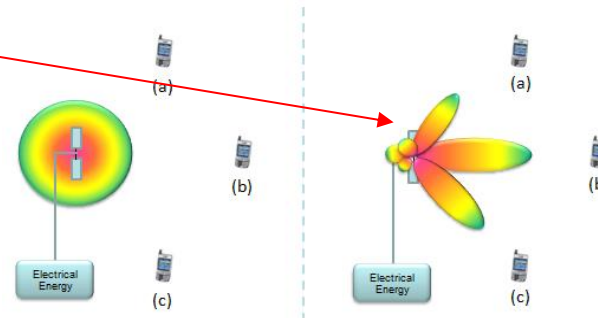
Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

- Ισοτροπική κεραία: εκπέμπει την ίδια ισχύ προς όλες τις κατευθύνσεις
 - διάγραμμα ακτινοβολίας: μοναδιαίος κύκλος
- Το συνηθέστερο μέτρο της κατευθυντικότητας μιας κεραίας είναι το εύρος δέσμης ημίσειας ισχύος
- Εύρος Δέσμης Ημίσειας ισχύος:
 - η γωνία μεταξύ δύο κατευθύνσεων στις οποίες η εκπεμπόμενη ισχύς είναι η μισή της μέγιστης ισχύος



Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

- Κάθε τύπος κεραίας έχει εφαρμογές σε διαφορετικούς τύπους δικτύων (?)
 - Κεραία κινητού τηλεφώνου, σταθμού βάσης?
 - Κεραία για point to point ζεύξη?
- Sectorization
- MIMO
- Beamforming(!)



Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

- **Κέρδος (ή απολαβή) κεραίας G :** Ο λόγος της ισχύος που μια κεραία παράγει/λαμβάνει ως προς την ισχύ που παράγει/λαμβάνει μια ισοτροπική κεραία αν η εισερχόμενη ισχύς είναι ίδια

$$G = \frac{P^{ant}}{P_{iso}^{ant}}$$

$$\text{Gain} = 4\pi \frac{\text{ένταση ακτινοβολίας}}{\text{ισχύς εισόδου}} = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{in}}$$

- **Ένταση ακτινοβολίας:** σε συγκεκριμένη κατεύθυνση ορίζεται ως «η ισχύς που ακτινοβολείται από μια κεραία ανά μονάδα στερεάς γωνίας» προς την κατεύθυνση αυτή.

Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

- **Κέρδος (ή απολαβή) κεραίας G :** Ο λόγος της ισχύος που μια κεραία παράγει/λαμβάνει ως προς την ισχύ που παράγει/λαμβάνει μια ισοτροπική κεραία αν η εισερχόμενη ισχύς είναι ίδια

$$G = \frac{P_{ant}}{P_{iso}} = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} = \frac{4\pi f^2 A_e}{c^2}$$

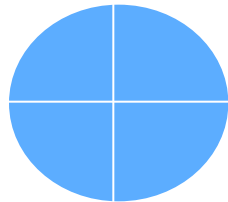
Ενεργός περιοχή ισότροπης $\lambda^2 / 4\pi$

$c = \lambda * f$ Εξίσωση κυματικής

- f : συχνότητα εκπεμπόμενου η/μ κύματος
- λ : μήκος εκπεμπόμενου η/μ κύματος
- c : ταχύτητα φωτός (3×10^8 m/s)
- A_e : ενεργός περιοχή κεραίας λήψης - ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος που λαμβάνει μια κεραία προς την πυκνότητα ισχύος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που προσπίπτει σε αυτή.

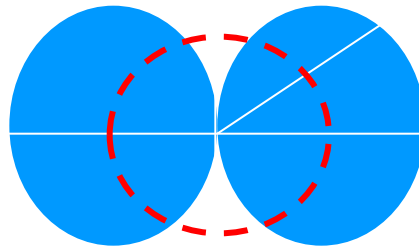
Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

Κέρδος κεραίας $G = \frac{P_{directional}}{P_{isotropic}}$



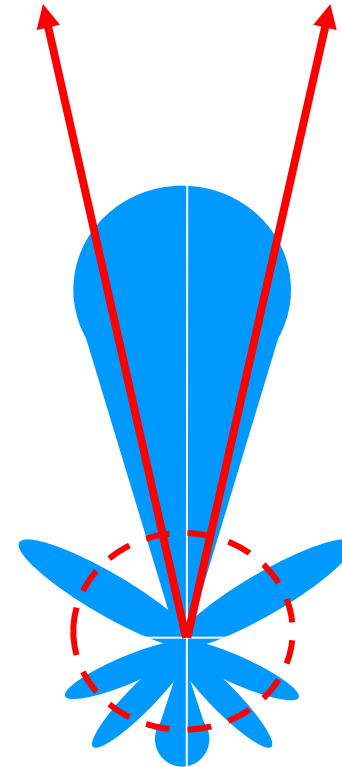
Isotropic
Ισοτροπική

0 dB_i



Dipole
Διπολική

2.2 dB_i



High gain Directional
Κατευθυντική υψηλού
κερδους

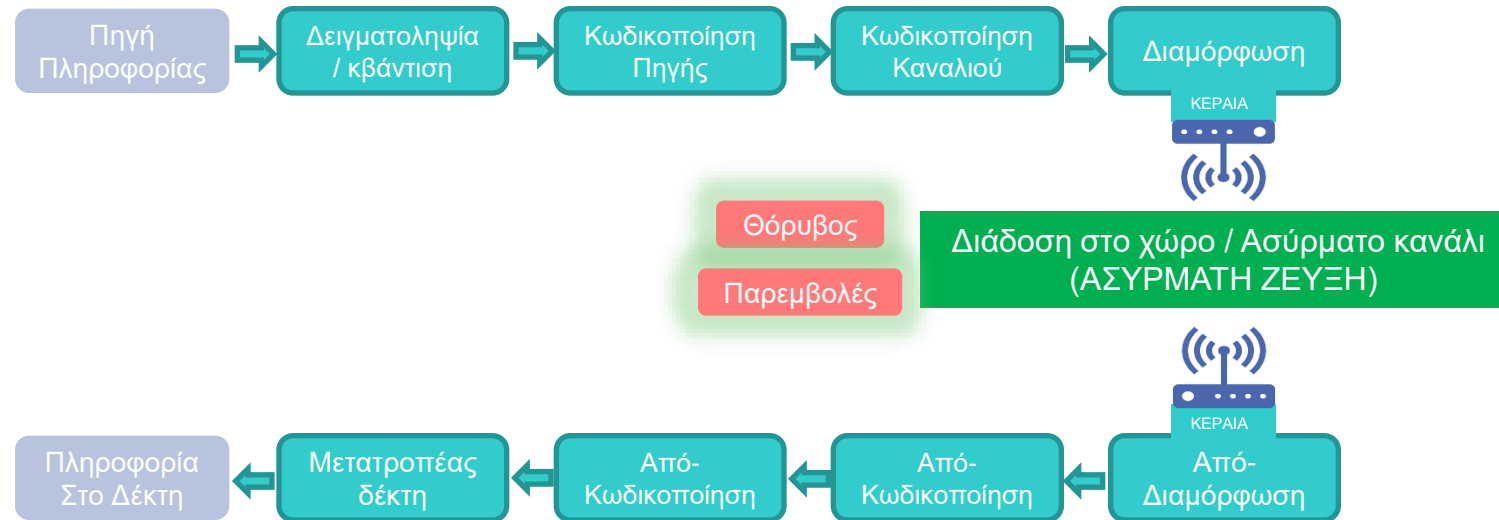
14 dB_i

Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

- Η ενεργός περιοχή (A_e) εξαρτάται από το είδος της κεραίας

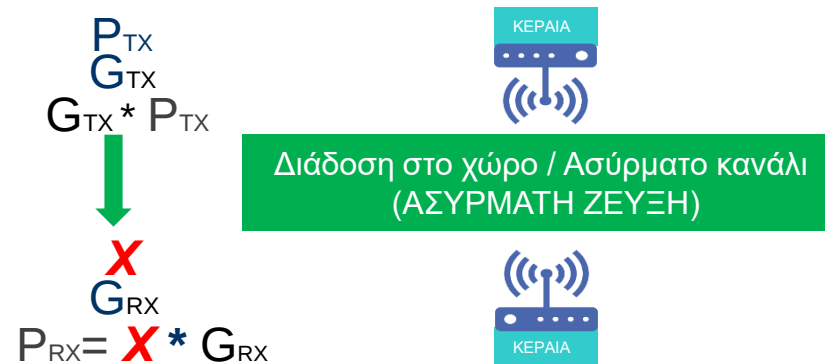
Type of Antenna	Effective Area A_e (m ²)	Power Gain (relative to isotropic)
Isotropic	$\lambda^2/4\pi$	1
Infinitesimal dipole or loop	$1.5 \lambda^2/4\pi$	1.5
Half-wave dipole	$1.64 \lambda^2/4\pi$	1.64
Horn, mouth area A	$0.81 A$	$10 A/\lambda^2$
Parabolic, face area A	$0.56 A$	$7 A/\lambda^2$
Turnstile (two crossed, perpendicular dipoles)	$1.15 \lambda^2/4\pi$	1.15

Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες



Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

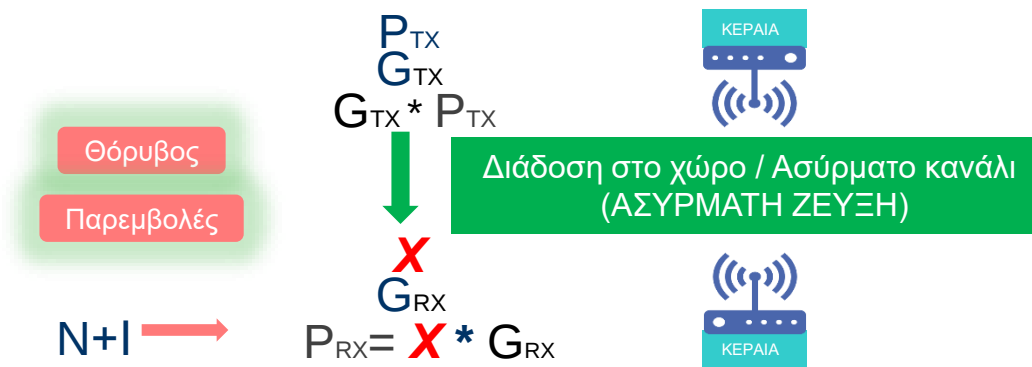
- Ο πομπός έχει σήμα ισχύος P_{TX}
- Η κεραία εκπομπής ενισχύει το σήμα με G_{TX} και εκπέμπει με $G_{TX} * P_{TX}$
- Η κεραία λήψης ενισχύει το λαμβανόμενο σήμα **X** κατά G_{RX}



- Ο Δέκτης λαμβάνει $P_{RX} = \mathbf{X} * G_{RX}$
- Κάθε Δέκτης έχει κατώφλι ισχύος P_{Th}
- **Εφικτή Ζεύξη:** $P_{RX} \geq P_{Th}$

Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

- Θόρυβος N και παρεμβολές I , φτάνουν επίσης στον δέκτη



Ποιότητα Ζεύξης: $SINR = P_{RX} / (N+I)$

Αν δεν έχουμε παρεμβολές $SNR = P_{RX} / N$

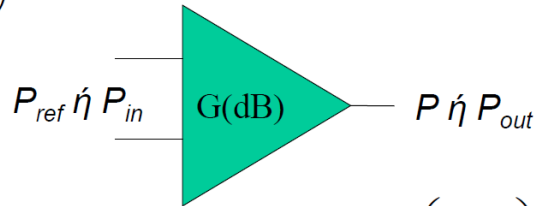
Εφικτή επικοινωνία: $SINR \geq SINR_{Threshold}$  **Ανάλογο της υπηρεσίας που θέλουμε**

Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

- Decibel (Db) χρήση για **αποφυγή πράξεων μεταξύ πολύ μεγάλων και πολύ μικρών αριθμών**
- Τι σημαίνει ότι μία κεραία κάνει ενίσχυση $G=3$ dB, και τι το ότι έχει κέρδος 9 dBi
- Ευκολία κλίμακας - πράξεις

$$G(dB) = 10 \cdot \log\left(\frac{X}{X_{ref}}\right)$$

Π.χ. Ενισχυτής ή Φίλτρο
Κεραία ή Γραμμή κ.ά.



Απολαβή ή Ενίσχυση Ισχύος:

$$G(dB) = 10 \cdot \log\left(\frac{P}{P_{ref}}\right)$$

P/P_{ref}

1

* 2

/ 2

* 10

* 100

/ 10

/ 100

$G(dB)$

0 dB

+ 3 dB

- 3 dB

+ 10 dB

+ 20 dB

- 10 dB

- 20 dB

Παράδειγμα

Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

→ Logarithm formulas

$$\log_a 1 = 0$$

$$\log_a a = 1$$

$$\log_a 0 = \begin{cases} -\infty & \text{if } a > 1 \\ +\infty & \text{if } a < 1 \end{cases}$$

$$\log_a \frac{x}{y} = \log_a x - \log_a y$$

$$\log_a (xy) = \log_a x + \log_a y$$

$$\log_a (x^n) = n \log_a x$$

$$\log_a \sqrt[n]{x} = \frac{1}{n} \log_a x$$

$$\log_a c = \frac{1}{\log_c a}$$

$$\log_a x = \frac{\log_c x}{\log_c a}$$

$$a^{\log_a x} = x$$

$$\log_e x = \ln x$$

Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

➤ Η μονάδα μέτρησης dB

Ισχύς (dB or dBW) = $10 * \log_{10}$ (Ισχύς σε Watts)

Ισχύς (dBm) = $10 * \log_{10}$ (Ισχύς σε milli (m)-Watts)

Ισχύς (dBμm) = $10 * \log_{10}$ (Ισχύς σε micro (μ)-Watts)

$P(\text{dBW}) = 10 \log(P_1 / 1 \text{ Watt})$

$P(\text{dBm}) = 10 \log(P_1 / 1 \text{ mWatt})$

$0 \text{ dBW} = 30 \text{ dBm} = 1 \text{ Watt}$

Παράδειγμα:

1 Watt



0 dBW

2 Watt



$0 + 3 \text{ dB} = 3 \text{ dBW}$

20 Watt



$10 + 3 \text{ dB} = 13 \text{ dBW}$

dB Algebra

$P_{\text{RX}} (\text{linear}) = P_{\text{TX}} (\text{linear}) * \text{Gain} (\text{linear}) / \text{Loss} (\text{linear})$

$P_{\text{RX}} (\text{dB}) = P_{\text{TX}} (\text{dB}) + \text{Gain} (\text{dB}) - \text{Loss} (\text{dB})$

$P_{\text{RX}} (\text{dBm}) = P_{\text{TX}} (\text{dBm}) + \text{Gain} (\text{dB}) - \text{Loss} (\text{dB})$

Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

Η ισχύς ενός σήματος είναι 10 mW και η ισχύς του θορύβου 1 μ W;
Ποια είναι η τιμή του SNR and SNR_{dB} ?

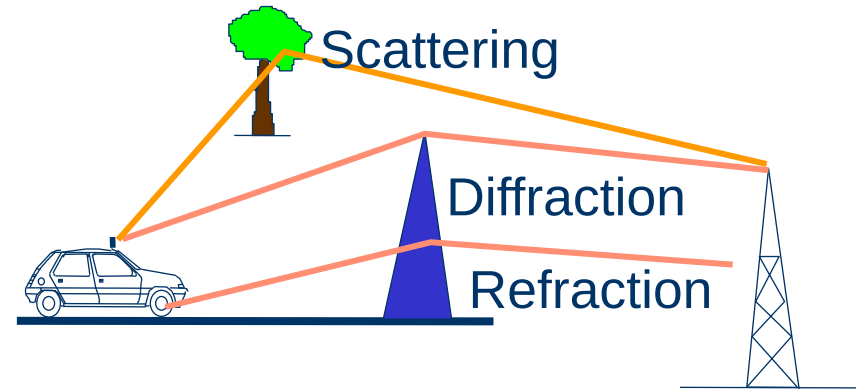
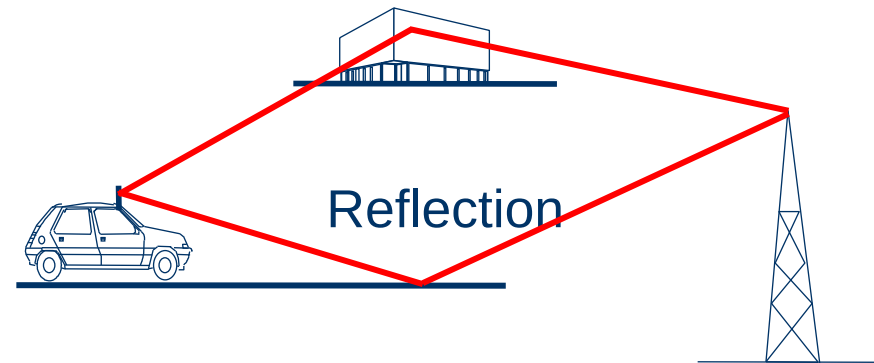
$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \text{SNR} = 10 \log_{10} 10000 = 40 \text{ dB}$$

- Συνήθεις τιμές του SNR :
 - Ήχος τηλεφωνικής ποιότητας: 26 dB (= 400 φορές)
 - Ήχος hi-fi: 60 dB (= 10⁶ φορές)
 - Τερματικό κινητής τηλεφωνίας: 14 - 18 dB (= 25 – 63 φορές)
- Σταθμός Βάσης κινητής τηλεφωνίας
 - εκπέμπει ραδιοκύματα με ισχύ $P_{\text{BS}} = 1 \text{ W}$
 - λαμβάνει με δέκτη που έχει ευαισθησία $P_{\text{thBS}} = -110 \text{ dBm}$
 - Οι κεραίες του έχουν απολαβή ισχύος $G_{\text{BS}} = 10 \text{ dBi}$.
- Οι κινητοί σταθμοί έχουν
 - ισχύ εκπομπής $P_{\text{MS}} = 0,2 \text{ W}$,
 - ευαισθησία $P_{\text{thMS}} = -104 \text{ dBm}$
 - απολαβή ισχύος $G_{\text{MS}} = 0 \text{ dBi}$.

Γενικές αρχές για τη διάδοση

Οι μηχανισμοί που διέπουν τη διάδοση είναι πολύπλοκοι και ποικίλοι – τέσσερις είναι οι βασικοί:

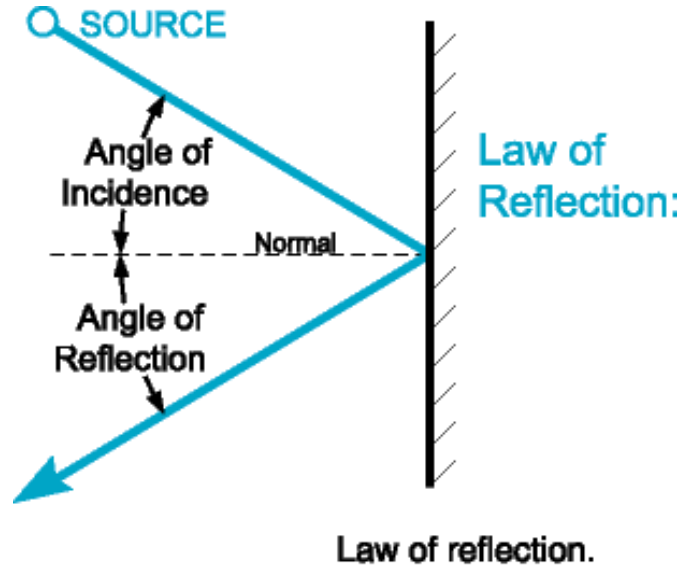
- **Ανάκλαση (reflection):** διαστάσεις εμποδίων $\gg \lambda$ – διάδοση προς μια κατεύθυνση.
- **Διάθλαση (refraction):** συμπαγή εμπόδια στην πορεία του σήματος $\gg \lambda$.
- **Σκέδαση (scattering):** διαστάσεις εμποδίων $\leq \lambda$ – διάδοση σε διαφορετικές κατευθύνσεις.
- **Περίθλαση (diffraction):** παρεμβολή σώματος στη διαδρομή διάδοσης (δευτερογενή κύματα – αρχή Huygens).



**** Μπορεί να δημιουργούν προβλήματα αλλά να δίνουν και λύσεις όταν δεν υπάρχει οπτική επαφή ****

Ανάκλαση

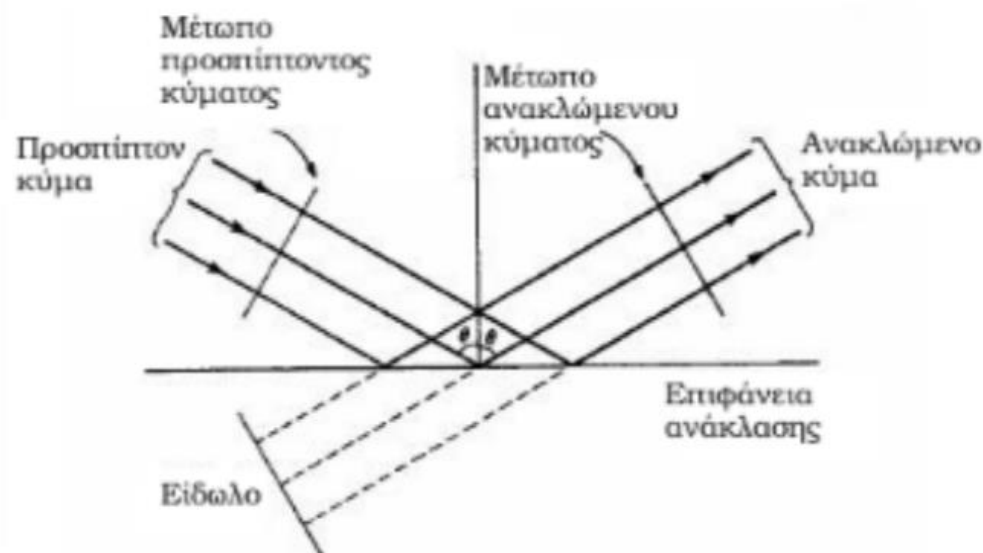
- Πρόσκρουση του σήματος σε λεία επιφάνεια
- **Νόμος Ανάκλασης:**
Γωνία πρόσπτωσης = γωνία ανάκλασης



Βλέπουμε επειδή το φως ανακλάται στο μάτι μας!

Ανάκλαση (Reflection) (1/2)

- Δεύτερος Νόμος της Ανάκλασης:
 - Η γωνία ανάκλασης είναι ίδια με την γωνία πρόσπτωσης
 - βασίζεται στη διατήρηση της ταχύτητας διάδοσης μέσα στο ίδιο μέσο
- Παράδειγμα με καθρέπτη



Ανάκλαση (Reflection) (2/2)

- Συντελεστής Ανάκλασης ρ
 - ο λόγος των εντάσεων ηλεκτρικού πεδίου ανακλώμενου προς προσπίπτοντος κύματος
 - Απορρόφηση ενέργειας λόγω μη τέλει αγωγιμης επιφάνειας
 - $\rho < 1$: Πρακτικά αγωγιμες επιφάνειες
 - $\rho = 1$: Τέλειος αγωγός
- Το υλικό και η υφή της επιφάνειας επηρεάζουν την ανάκλαση
 - καλοί ανακλαστές: λείες, μεταλλικές επιφάνειες
 - η επιφάνεια της γης
- Θα πρέπει το διάνυσμα E να έχει κάθετη συνιστώσα στην αγωγιμη επιφάνεια, αλλιώς δημιουργούνται επιφανειακά ρεύματα

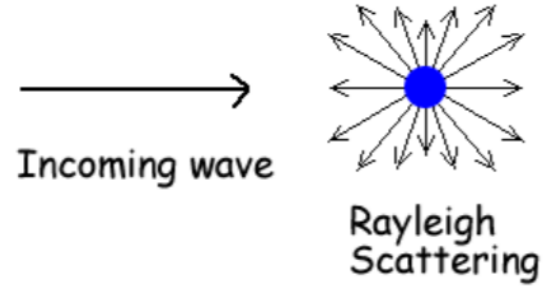
Σκέδαση

- Σκέδαση λόγω πρόσπτωσης κυμάτων σε ανομοιογενείς επιφάνειες
- Σκέδαση λόγω πρόσπτωσης των κυμάτων σε δομές μικρών διαστάσεων – RAYLEIGH
- Τα προσπίπτοντα κύματα αλλάζουν προσανατολισμό ακολουθώντας τυχαίες διευθύνσεις
- Ένα μικρό ποσοστό αυτών των κυμάτων σκεδάζεται προς τα πίσω (οπισθοσκέδαση - radar) στην πηγή της εκπομπής.
- Δύσκολο να προσεγγισθεί μαθηματικά.

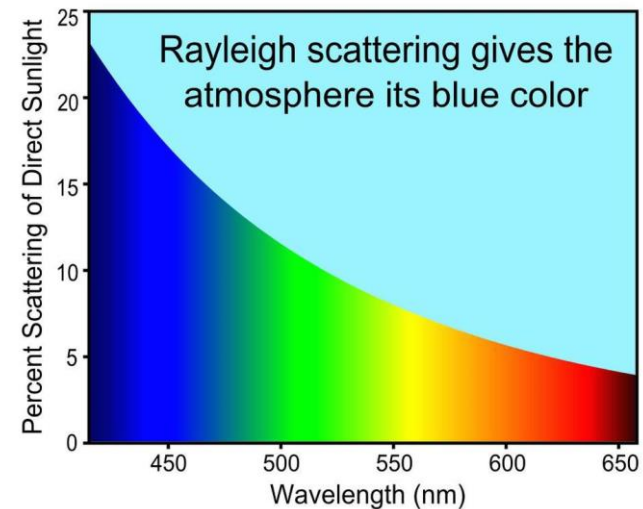
Σκέδαση (Scattering)

- Σκέδαση ή Διασκορπισμός:
 - το ΗΜ κύμα προσπίπτει σε αντικείμενα ή επιφάνειες με διαστάσεις ανάλογες του μήκους κύματος
 - παραδείγματα: λαμπτήρες, σήματα κυκλοφορίας, φυλλωσιές δέντρων, διαφημιστικές πινακίδες
- **Αποτέλεσμα:** Επανεκπομπή της ενέργειας του πομπού προς πολλές διαφορετικές κατευθύνσεις
- Παρέχει ενέργεια σε περιοχές που κανονικά δε θα είχαν κάλυψη
- Είναι δύσκολο να προβλεφθεί

Παραδείγματα σκέδασης

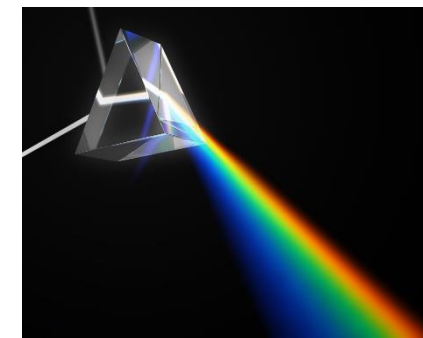


Πιο έντονο σε μικρά μήκη κύματος (μπλε ουρανός)



Διάθλαση

- Αλλαγή της κατεύθυνσης των κυμάτων καθώς περνούν από ένα μέσο σε άλλο
- Όσο μεγαλύτερη η διαφορά στην ταχύτητα του κύματος τόσο μεγαλύτερη η γωνία διάθλασης
- Τα ουράνια τόξα δημιουργούνται από του φωτός – τη διάθλαση κάθε διαφορετικής συχνότητας του ορατού φωτός
- Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούν διάθλαση μέσα στο γυάλινο καλώδιο



Διάθλαση (Refraction) (1/3)

- Υπενθύμιση:

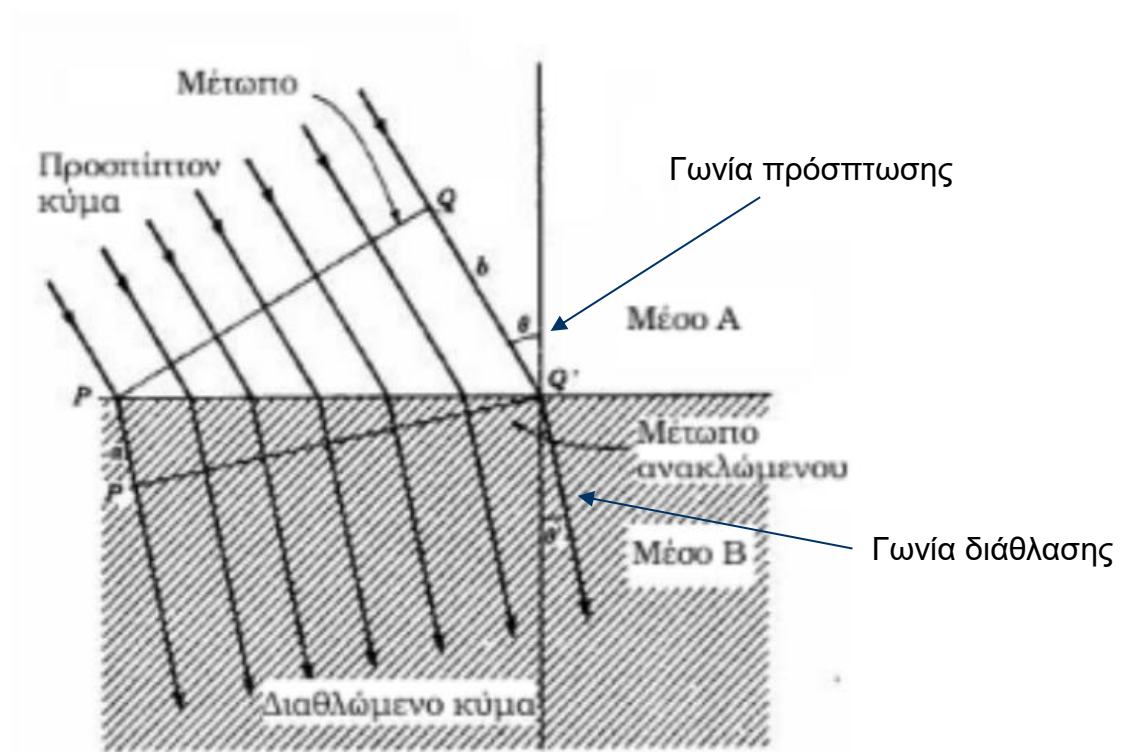
- η συχνότητα του κύματος είναι σταθερή
- η ταχύτητα και το μήκος κύματος εξαρτώνται από το μέσο

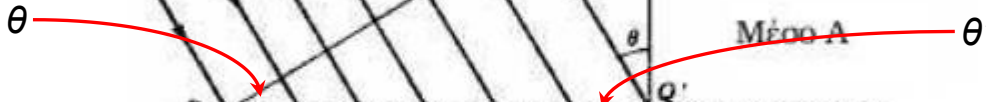
- Διάθλαση:

- όταν ένα κύμα περνά από ένα μέσο κάποιας πυκνότητας σε μέσο άλλης πυκνότητας
- αλλάζει η ταχύτητα μετάδοσης
- παράδειγμα από αντικείμενο σε υγρό

- Αποτέλεσμα: Το κύμα ακολουθεί μία άλλη κατεύθυνση στο δεύτερο μέσο και ταυτόχρονα η ταχύτητά του μεταβάλλεται

Διάθλαση (Refraction) (2/3)




$$QPQ'=\theta \text{ και } PQ'P'=\theta'$$
$$\frac{\sin \theta'}{\sin \theta} = \frac{PP' / PQ'}{QQ' / PQ'} = \frac{PP'}{QQ'} = \frac{v_B}{v_A}$$

$v_B =$ Ταχύτητα κύματος στο μέσο Β

Διάθλαση (Refraction) (3/3)

- Νόμος του Snell:

$$\frac{\sin(\theta')}{\sin(\theta)} = \frac{v_b}{v_a}$$

- v_a, v_b : ταχύτητα στα μέσα διάδοσης A και B
- πώς προέκυψε;

$$\frac{\sin(\theta')}{\sin(\theta)} = \sqrt{\frac{k}{k'}} = \frac{1}{\mu}$$

- k, k' : διηλεκτρικές σταθερές των μέσων A και B
- μ : συντελεστής διάθλασης

Περίθλαση

- Η κύρτωση των κυμάτων γύρω από ένα αντικείμενο
 - Ακούμε ήχους που παράγονται πίσω από ένα τοίχο
 - Φωτίζεται ένα δωμάτιο όταν ανάβουμε το φως στο διπλανό
 - Ακούμε ένα ραδιοφωνικό σταθμό πίσω από ένα βουνό
- Το ποσοστό της κύρτωσης εξαρτάται από το μέγεθος του αντικειμένου και το μήκος του κύματος
 - Μεγάλο αντικείμενο, μικρό μήκος κύματος = μικρή περίθλαση
 - Μικρό αντικείμενο, μεγάλο μήκος κύματος = μεγάλη περίθλαση

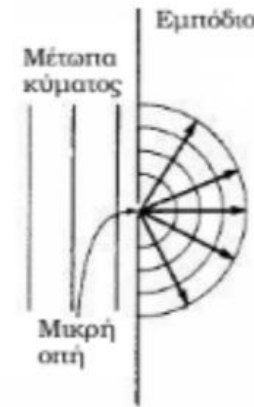
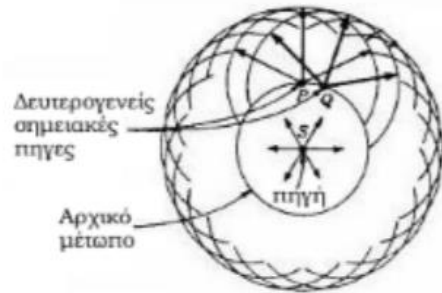
Περίθλαση (Diffraction) (1/3)

■ Περίθλαση:

- Οποιαδήποτε εκτροπή κυμάτων από την ευθύγραμμη διάδοση που δε μπορεί να ερμηνευτεί ως ανάκλαση, διάθλαση ή διάδοση

■ Αρχή του Huygens (C. Huygens, 1690):

- Κάθε σημείο του μετώπου ενός σφαιρικού κύματος μπορεί να θεωρηθεί ως μία δευτερογενής πηγή κυμάτων
- Το συνολικό πεδίο σε σημεία μακριά από την πηγή είναι ίσο με το διάνυσμα του αθροίσματος των δευτερευόντων αυτών κυμάτων



Christiaan Huygens (Χέγκενς)

Περίθλαση (Diffraction) (2/3)

- **Περίθλαση:**

- Οποιαδήποτε εκτροπή κυμάτων από την ευθύγραμμη διάδοση που δε μπορεί να ερμηνευτεί ως ανάκλαση, διάθλαση ή διάδοση

- **Αρχή του Huygens (C. Huygens, 1690):**

- Κάθε σημείο του μετώπου ενός σφαιρικού κύματος μπορεί να θεωρηθεί ως μία δευτερογενής πηγή κυμάτων

- Το φαινόμενο εμφανίζεται όταν η διαδρομή από τον πομπό στο δέκτη εμποδίζεται από επιφάνειες με τραχιές ακμές, γωνίες ή οπές

- Οι γωνίες μετατρέπονται σε δευτερογενείς πηγές του κύματος και επανεκπέμπουν το κύμα (με μικρότερη ισχύ)

Περίθλαση (Diffraction) (3/3)

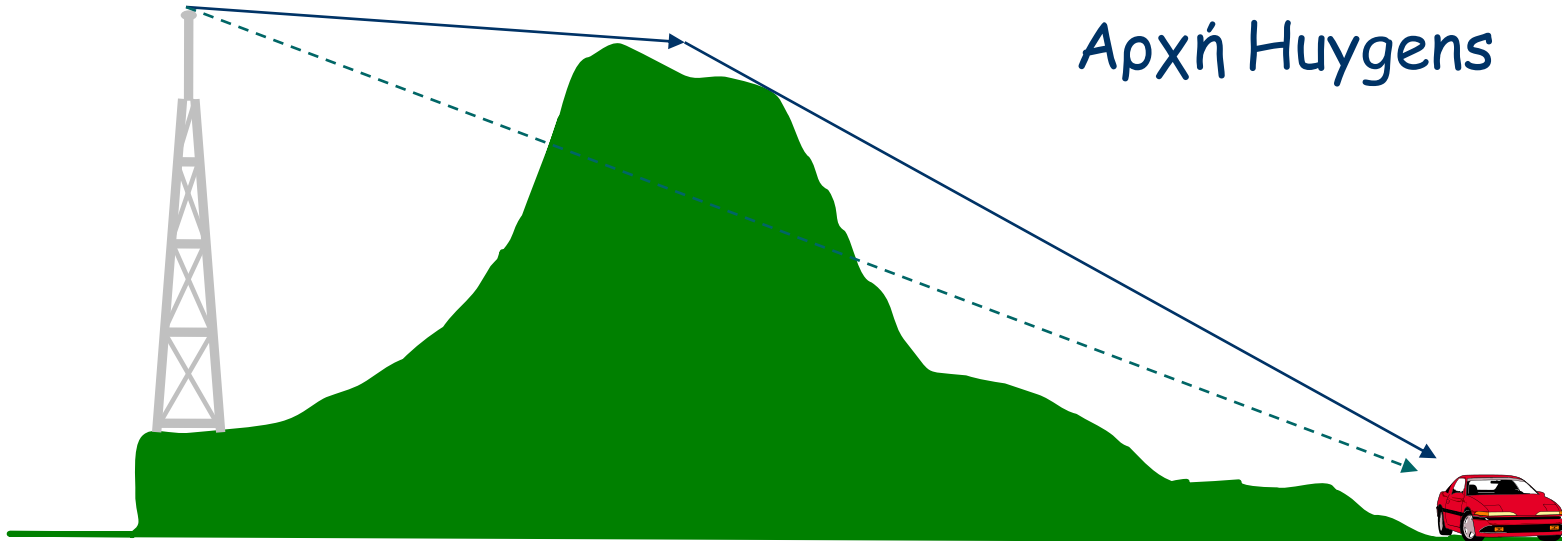
- Οι χαμηλές συχνότητες υφίστανται εντονότερη περίθλαση απ' ότι οι πιο υψηλές
 - παράδειγμα από ακουστικές συχνότητες
- Χωρίς την περίθλαση, τα κύματα δεν θα διαδίδονταν πίσω από εμπόδια



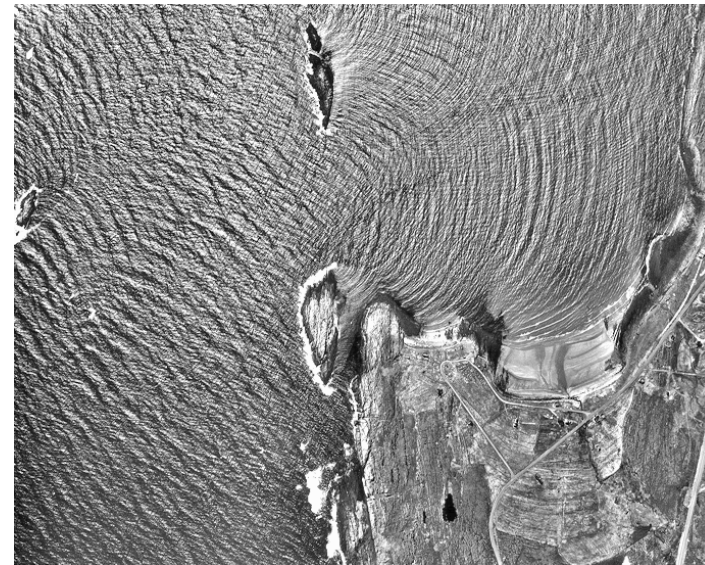
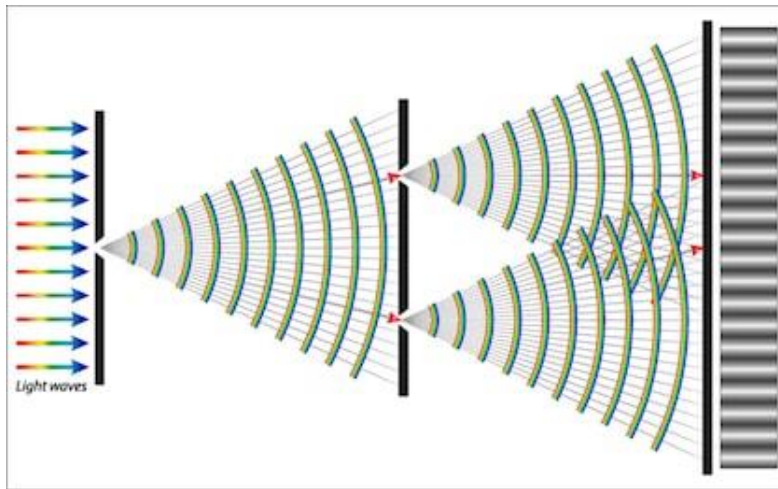
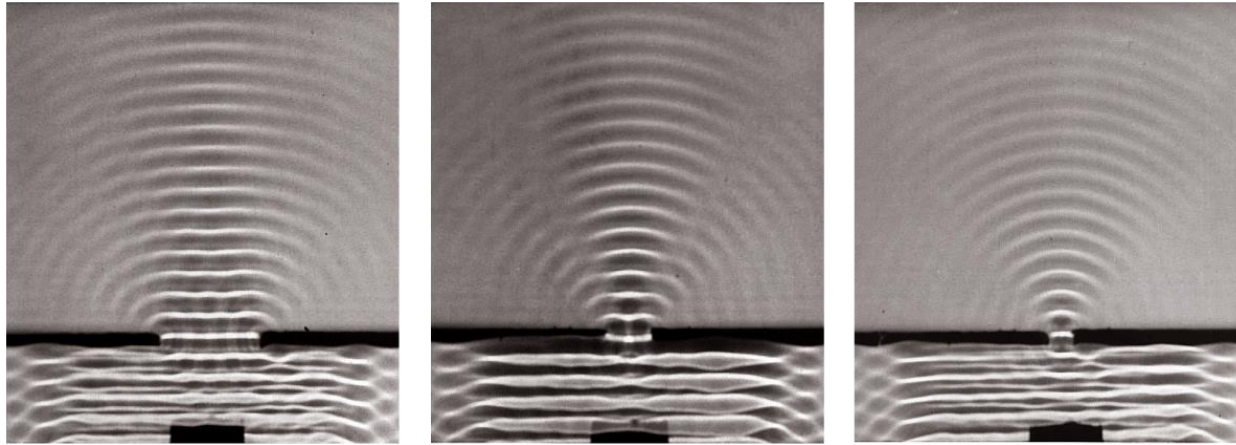
Διάδοση χωρίς οπτική επαφή Out-of-Sight

Απώλειες λόγω περίθλασης

Αρχή Huygens

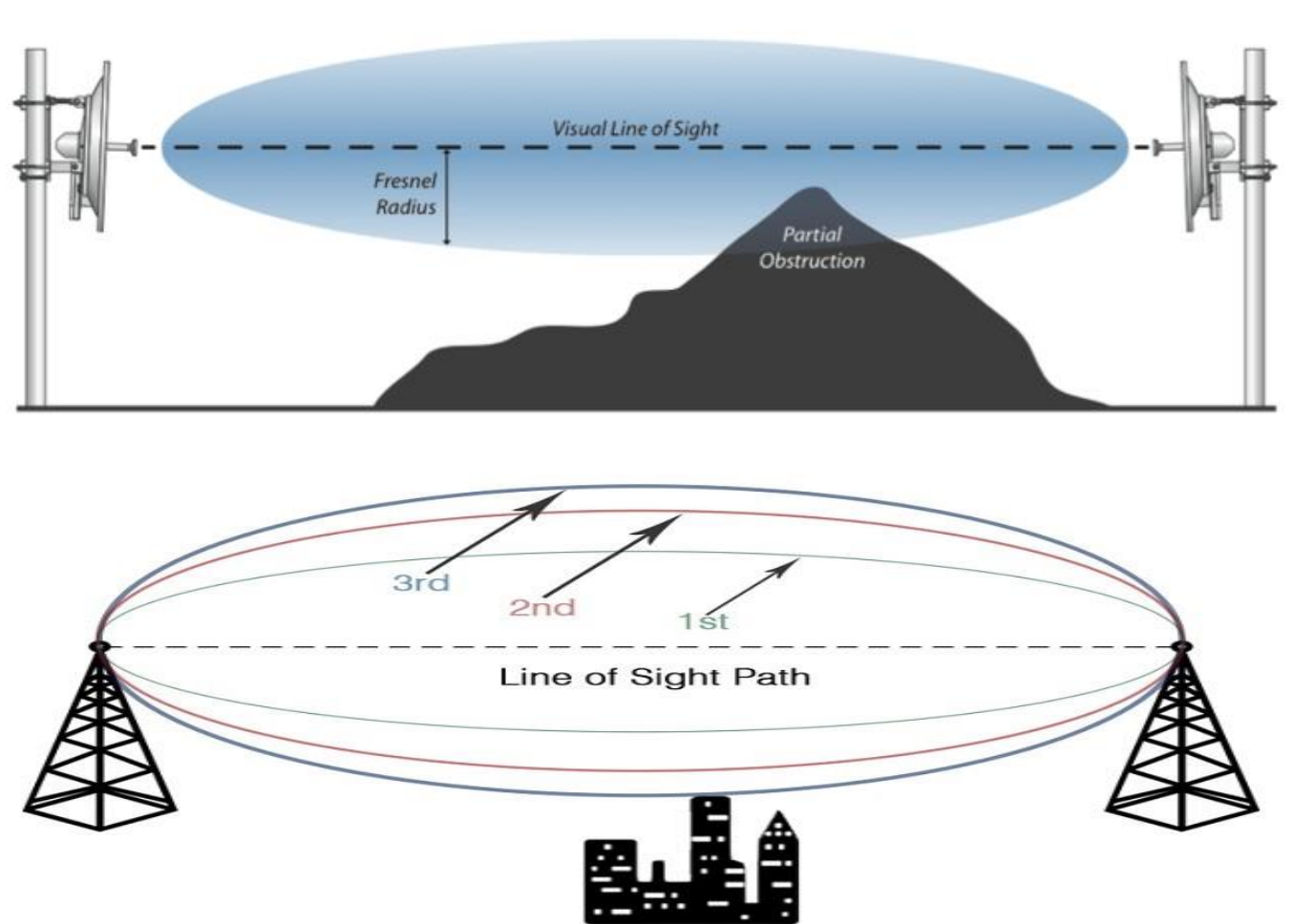


Παραδείγματα περίθλασης



Απευθείας Διάδοση Line-of-Sight

Πως κρίνουμε την απευθείας διάδοση (Fresnel Zone)



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)