Κινητές επικοινωνίες

Κεφάλαιο 4

Διάδοση ραδιοκυμάτων

Εξασθένηση μεγάλης κλίμακας (Large scale fading)

- Καθώς το κινητό απομακρύνεται από το B.S. (10m, 100m, 1000m) η τοπική μέση τιμή της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος θα μειώνεται βαθμιαία αφού τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εξασθενούν καθώς διαδίδονται στον χώρο
- Το φαινόμενο αυτό επηρεάζεται από το ανάγλυφο του εδάφους: λόφοι, βλάστηση, κτίρια κ.λπ.

P_t μεταδιδόμενη ισχύς

P_r τοπική μέση τιμή της λαμβανόμενης ισχύος σε απόσταση r

$$PL(r) = \frac{P_t}{P_r}$$ path loss (απώλεια διαδρομής)

$$PL(r) = 10\log\frac{P_t}{P_r}[dB]$$ path loss σε dB

- αντιμετωπίζεται με αύξηση της μεταδιδόμενης ισχύος

Διάδοση στον ελεύθερο χώρο

- Σε απόσταση r από τον ΣΒ, η ένταση του σήματος είναι (ισχύς ανά μονάδα επιφανείας):

$$P_A = \frac{P_{tot}}{4\pi r^2} Watt/m^2$$

- Στην παραπάνω σχέση, κάναμε την υπόθεση ότι σε απόσταση r, η επιφάνεια σφαίρας από την οποία θα διέλθει η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς είναι $4\pi r^2$. Στην πράξη δεν ισχύει αυτό: η επιφάνεια από την οποία θα διέλθει η ακτινοβολία καθορίζεται από την ενεργό επιφάνεια (effective apperture) της κεραίας. Η ενεργός επιφάνεια εξαρτάται από τις φυσικές διαστάσεις της κεραίας και το είδος της. Αν A_e είναι η ενεργός επιφάνεια της κεραίας στον δέκτη, τότε η ισχύς που απορροφάται από το κινητό είναι

$$P_r = A_e P_A = A_e \frac{P_{tot}}{4\pi r^2}$$

Διάδοση στον ελεύθερο χώρο (συνέχεια)

- Η ενεργός επιφάνεια ισότροπης κεραίας ισούται με

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} \qquad (1)$$

- Άρα

$$P_r = \frac{P_{tot}\lambda^2}{(4\pi r)^2}$$

- Όταν έχουμε κατευθυντικές κεραίες, και η εκπεμπόμενη και η λαμβανόμενη ισχύς θα πρέπει να πολλαπλασιαστούν με τους αντίστοιχους συντελεστές απολαβής G (που είναι αριθμοί χαρακτηριστικοί για κάθε κεραία). Ο συντελεστής απολαβής στην ουσία είναι ένα μέτρο αποτίμησης της κατευθυντικότητας της κεραίας.
- Άρα, τα παραπάνω ισχύουν για συντελεστές απολαβής ίσους με τη μονάδα!!
- Προσέξτε ότι η εξασθένιση του σήματος είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης (κάτι που το είχαμε ήδη αναφέρει στο Κεφάλαιο 2)

Απώλειες διαδρομής

$$\frac{P_r}{P_{tot}} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 = G_t G_r \left(\frac{c/f}{4\pi r} \right)^2$$

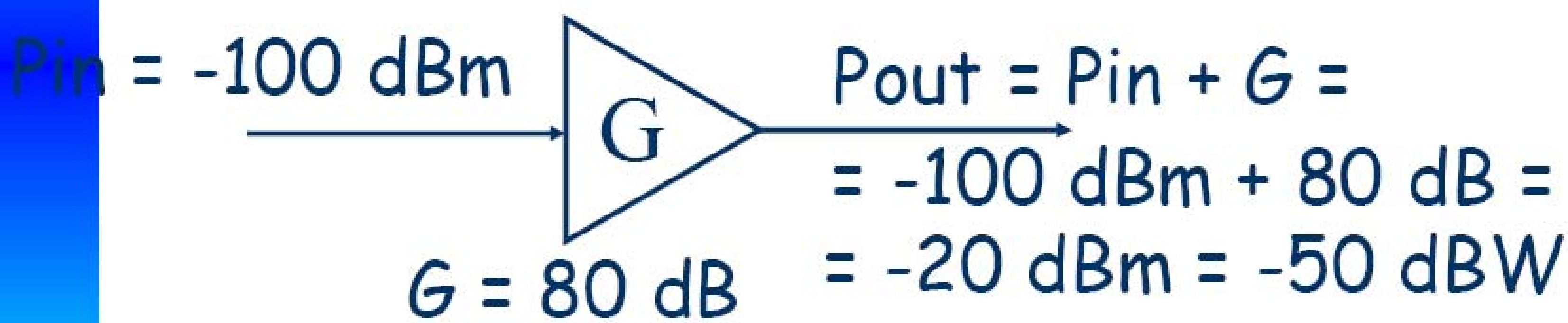
- G_t: απολαβή κεραίας Σταθμού Βάσης
- G_r: απολαβή κεραίας κινητού
- c: η ταχύτητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (3×10^8 m/sec)
- Άρα, η απώλεια διαδρομής (για G_t=G_r=1) είναι:

$$PL(r) = \frac{P_{tot}}{P_r} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{4\pi r}{c/f} \right)^2$$

- Σε dB: $PL(r)[dB] = 20\log\left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right) = 20\log\left(\frac{4\pi r}{c/f} \right)$

Συντελεστής απολαβής G

- Καθαρός αριθμός (δεν έχει μονάδα μέτρησης)
- Μπορεί να εκφραστεί σε dB (10logG)



Pout = GPin

10log(Pout)=10log(G)+10log(Pin)

Pout(dB)=G(dB) + Pin(dB) ή ισοδύναμα Pout(dBm)=G(dB) + Pin(dBm)

Σχέση ενεργού επιφάνειας με συντελεστή απολαβής

- Ισχύει $$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}$$

  (βλέπε σχέση (1) νωρίτερα, όπου απλά εκεί είχε θεωρηθεί G=1)

- Στην πράξη, υπολογίζεται (με βάση κάποια μαθηματικά μοντέλα που έχουν κατασκευαστεί για την αποτίμηση των απωλειών διαφόρων τύπων) και ένας συντελεστής απωλειών L, οπότε θα έχουμε για τη γενικότερη παρίπρωση:

$$P_r = \frac{P_{tot} G_t G_r \lambda^2}{(4\pi r)^2 L}$$

ΘΕΜΕΛΙΩΔΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΧΩΡΟΥ – ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΟΥ FRIIS

$$PL(r)[dB] = 10 \log\left(\frac{P_t}{P_r}\right) = -10 \log\left(\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi r)^2 L}\right)$$

Παράδειγμα

- Εάν ένας πομπός παράγει 45W ισχύ στα 900MHz, ποια θα είναι η ληφθείσα ισχύς σε dBm σε απόσταση 1Km? Θεωρήστε ότι οι συντελεστές απολαβής των κεραιών, όπως και ο συντελεστής απωλειών L, ισούνται με τη μονάδα.

$$P_r = \frac{P_{tot} G_t G_r \lambda^2}{(4\pi r)^2 L} \Rightarrow P_r = \frac{45 \cdot (3 \cdot 10^8 / 900 \cdot 10^6)^2}{(4\pi \cdot 1 \cdot 10^3)^2}$$

$$\approx 0{,}03 \mu Watt = 0{,}03 \cdot 10^{-3} mWatt$$

$$\Pr(dBm) = 10\log(0{,}03 \cdot 10^{-3}) = -30 + 10\log(0{,}03) = -45{,}22 dBm$$

Στάθμη ισχύος ως προς στάθμη αναφοράς

- Αν ξέρουμε την ισχύ P_1 σε απόσταση r1, μπορούμε να βρούμε άμεσα την ισχύ P_2 σε απόσταση r2=r1+x? (το x μπορεί να είναι και αρνητικός αριθμός)

$$10\log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = 10\log(P_1) - 10\log(P_2) = P_1(dBm) - P_2(dBm)$$

αν και οι δύο τιμές της ισχύος εκφραστούν σε mWatt. Άρα

$$P_2(dBm) = P_1(dBm) - 10\log\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

Αφού η ισχύς είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης, έχουμε τελικά:

$$P_2(dBm) = P_1(dBm) - 10\log\left(\frac{(r2)^2}{(r1)^2}\right) = P_1(dBm) - 20\log\left(\frac{r2}{r1}\right)$$

Συνέχεια του προηγούμενου παραδείγματος

- Ποια θα είναι η ληφθείσα ισχύς στα 1,5Km?

$$P_{1,5\,Km}(dBm) = P_{1\,Km}(dBm) - 20\log\left(\frac{1,5}{1}\right) = -45,22 - 3,52 = -48,74\,dBm$$

Ένα σχόλιο

- Τα παραπάνω είναι ακριβή όταν $r>d_f$, όπου d_f η απόσταση Fraunhofer:

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda}$$

όπου D η φυσική διάσταση της κεραίας.

Πολυδιόδευση

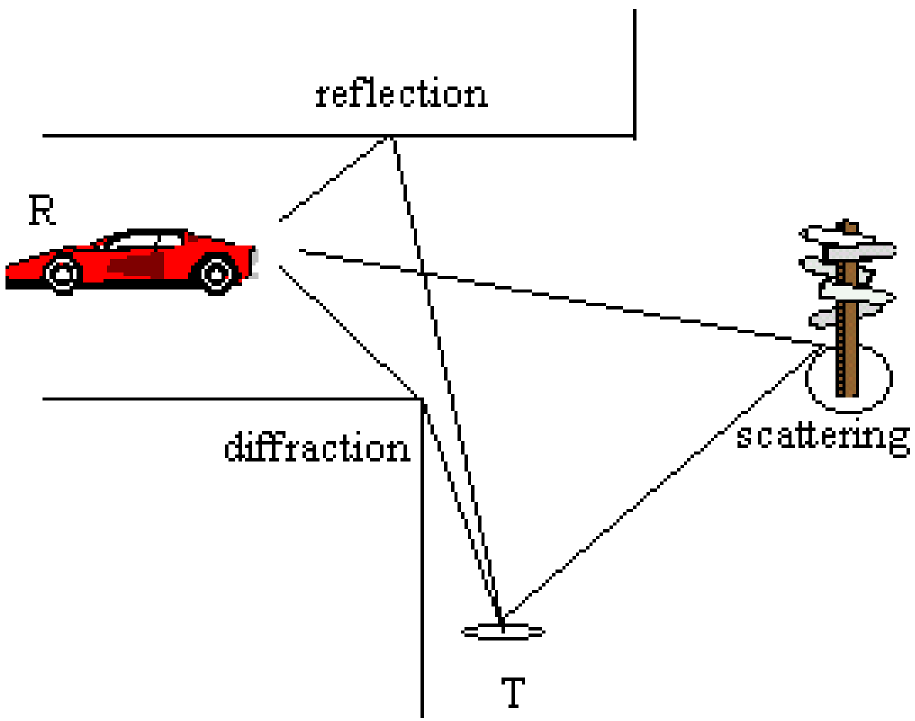
Γενικά

Οι μηχανισμοί που διέπουν τη διάδοση είναι πολύπλοκοι και ποικίλοι. Τα κυριότερα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα είναι:

- Ανάκλαση (reflection): διαστάσεις εμποδίων >> λ
- Περίθλαση (diffraction): παρεμβολή αδιαπέραστου σώματος στη διαδρομή διάδοσης
- Σκέδαση (scattering): διαστάσεις εμποδίων ≤λ

- Καθώς το κινητό κινείται, οι 3 παραπάνω παράγοντες επιδρούν (ο κάθε ένας με τον τρόπο του) στο λαμβανόμενο σήμα

Σχηματική αναπαράσταση μηχανισμών διάδοσης



Ανάκλαση

- Πρόσπτωση του κύματος σε αντικείμενα μεγάλα σε σχέση με το λ
- Μερική ανάκλαση σε επιφάνειες που διαχωρίζουν περιοχές με διαφορετική διηλεκτρική σταθερά
- Σε τέλειο αγωγό όλη η ποσότητα της προσπίπτουσας ενέργειας ανακλάται
- Στην πράξη: Απόσβεση και αλλαγή φάσης

Περίθλαση

- Πρόσπτωση του κύματος σε αντικείμενα με ακμές (της τάξης του λ) που βρίσκονται ανάμεσα στον πομπό και το δέκτη
- Σύμφωνα με την αρχή του Huygen, όλα τα σημεία του σφαιρικού μετώπου του κύματος μπορούν να θεωρηθούν ως δευτερεύουσες σημειακές πηγές
- Κάμψη του κύματος και διάδοσή του ακόμη και στις περιοχές «σκιάς» του αντικειμένου.
- Στις υψηλές συχνότητες υπάρχει εξάρτηση του φαινομένου από: γεωμετρία του αντικειμένου, πλάτος και φάση του προσπίπτοντος κύματος, είδος πόλωσης.

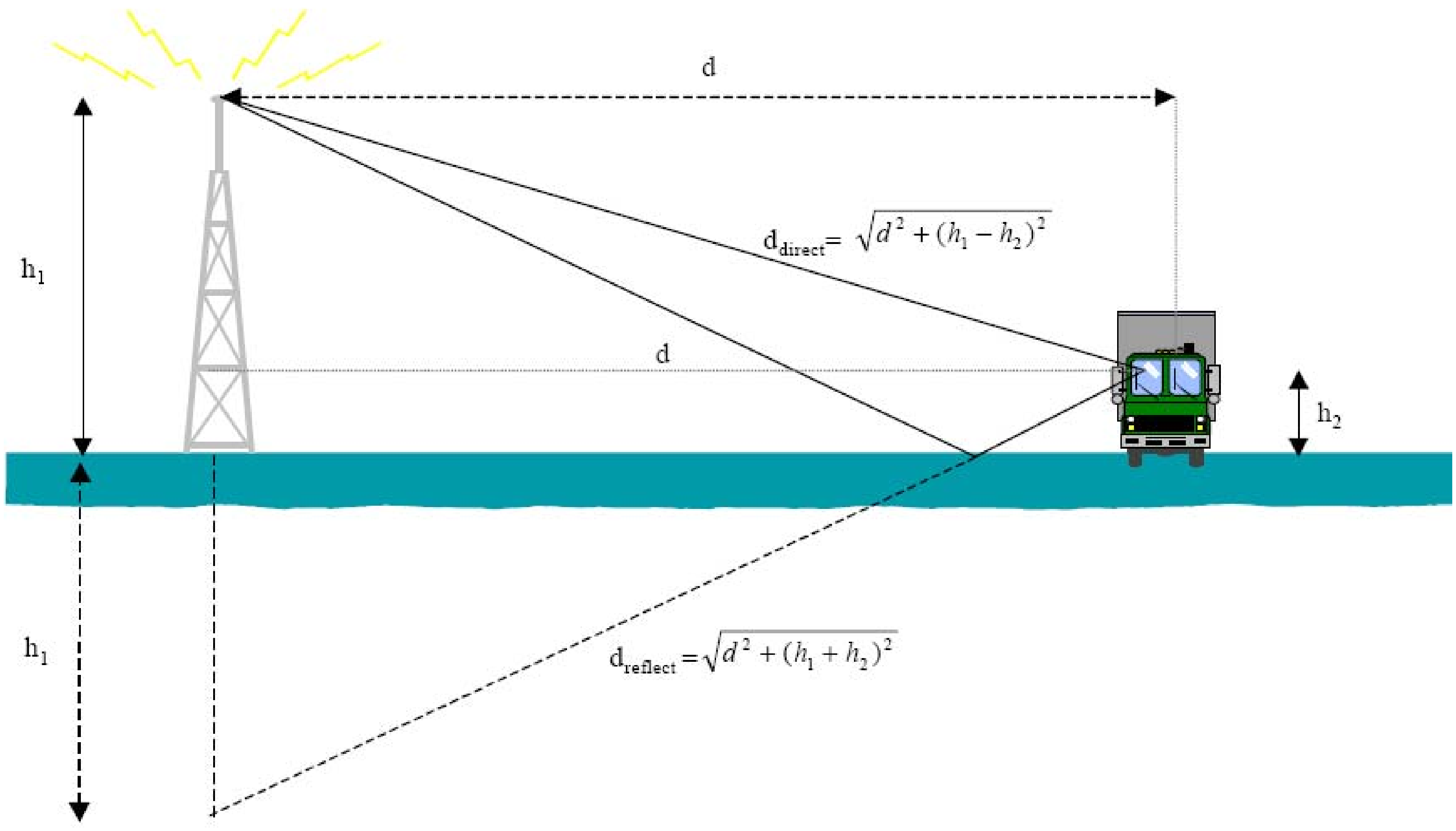
Σκέδαση

- Πρόσπτωση του κύματος σε αντικείμενα (ή επιφάνειες με προεξοχές) με διαστάσεις μικρότερες από το λ
- Ο αριθμός των αντικειμένων ή/και προεξοχών ανά μονάδα όγκου πρέπει να είναι αρκούντως μεγάλος.

Πώς δρουν όλα τα παραπάνω?

- Στα κυψελοειδή συστήματα, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα καταφτάνουν στην κεραία αφού πρώτα έχουν υποστεί διάφορες ανακλάσεις από το έδαφος ή άλλα εμπόδια (π.χ. κτίρια). Για αυτό και είτε το κινητό είτε ο ΣΒ λαμβάνουν σήματα, ακόμα και αν δεν έχουν οπτική επαφή
- Ένα σήμα φτάνει τελικά μέσω πολλών διαφορετικών δρόμων στο δέκτη, όπου εκεί όλα τα λαμβανόμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα συμβάλλουν. Αυτό ακριβώς είναι το φαινόμενο της **πολυδιόδευσης.**

Συμβολή από απευθείας μετάδοση και απλή ανάκλαση



Θεωρούμε ιδανική ανάκλαση, σε λεία επιφάνεια

Ανάλυση

- Ο ΣΒ έχει ύψος h_1, ενώ το κινητό βρίσκεται σε ύψος h_2 από το έδαφος.
- Η απόσταση του ΣΒ από το κινητό είναι d.
- Το κύμα που φτάνει απευθείας διανύει απόσταση d_{direct}, ενώ το κύμα από ανάκλαση απόσταση $d_{reflect}$.

Χρήση της γεωμετρίας του σχήματος

- Έχουμε $d_{direct} = \sqrt{d^2 + (h_1 - h_2)^2}$

- Λόγω του ότι d>>h_1,h_2, χρησιμοποιώντας γνωστές μαθηματικές ιδιότητες (ανάπτυγμα διωνύμου), προκύπτει ότι <u>κατά προσέγγιση</u> έχουμε:

$$d_{direct} \cong d\left(1 + \frac{1}{2}\left(\frac{h_1 - h_2}{d}\right)^2\right)$$

- Ανάλογα, έχουμε $d_{reflect} = \sqrt{d^2 + (h_1 + h_2)^2}$

$$d_{reflect} \cong d\left(1 + \frac{1}{2}\left(\frac{h_1 + h_2}{d}\right)^2\right)$$

Διαφορά φάσης

- Η διαφορά δρόμου των δύο κυμάτων είναι

$$\Delta d = d_{reflect} - d_{direct} = \frac{2h_1h_2}{d}$$

- Η διαφορά φάσης Δφ δίνεται από τη σχέση

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta d = \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda d}$$

Η συνολική λαμβανόμενη ισχύς είναι όπως υπολογίστηκε στις προηγούμενες διαφάνειες, αλλά θα πρέπει επιπρόσθετα να συνυπολογίσουμε και τη συμβολή των κυμάτων με διαφορά φάσης Δφ.

Λαμβανόμενη ισχύς

- Από την κυματική, ο συντελεστής που προσδιορίζει την επίδραση της συμβολής είναι $\left|1+\rho e^{i\Delta\varphi}\right|^2$, όπου ρ ο συντελεστής ανάκλασης (για λεία ανάκλαση, τέλειο έδαφος, ρ=-1). Άρα, για συντελεστές απολαβής ίσους με μονάδα, αλλά και μοναδιαίο συντελεστή απωλειών L, έχουμε

$$P_r = P_{tot}\left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \left|1-e^{i\Delta\phi}\right|^2$$

Λίγες πράξεις ακόμα…

- Ισχύει

$$\left|1 - e^{i\Delta\phi}\right|^2 = \left|1 - \cos\Delta\phi - i\sin\Delta\phi\right|^2 = (1 - \cos\Delta\phi)^2 + (\sin\Delta\phi)^2$$

- Στην πράξη ισχύει Δφ<<1 (για την ακρίβεια, Δφ<0,3 rad), οπότε κατά προσέγγιση έχουμε

$$\sin\Delta\phi \approx \Delta\phi, \quad \cos\Delta\phi = 1$$

- Άρα,

$$P_r = P_{tot}\left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 (\Delta\phi)^2 = P_{tot}\left(\frac{h_1 h_2}{r^2}\right)^2$$

ΕΞΙΣΩΣΗ
ΕΠΙΠΕΔΗΣ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Συμπεράσματα

- Στη γενικότερη περίπτωση, όπου οι κεραίες δεν είναι ισοτροπικές και επίσης υπάρχει συντελεστής απωλειών, προφανώς θα έχουμε

$$P_r = G_t G_r P_{tot} \frac{h_1^{\,2} h_2^{\,2}}{r^4 L}$$

- Η ισχύς είναι αντιστρόφως ανάλογη της τέταρτης δύναμης της απόστασης και όχι της δεύτερης δύναμης – άρα, <u>η λαμβανόμενη ισχύς εξασθενεί όταν έχουμε πολυδιόδευση μέσω ανάκλασης</u>, ακόμα και για τη θεωρητική περίπτωση όπου έχουμε ιδανική ανάκλαση
- Η απώλεια σε dB είναι

$$PL(r) = 10\log\left(\frac{P_t}{P_r}\right) = 40\log r - 20\log h_1 - 20\log h_2$$

Όταν η απόσταση διπλασιάζεται, οι απώλειες αυξάνονται κατά 12dB.

Ένα γενικό σχόλιο

- Οι απώλειες γενικά εξαρτώνται και από τη συχνότητα του κύματος. Στις παραπάνω σχέσεις δεν υπάρχει η συχνότητα. Αυτό οφείλεται στις παραδοχές που κάναμε προς χάριν της απλούστευσης (τέλειες ανακλάσεις, $h_1,h_2 \ll d$). Διαφορετικά, οι προηγούμενες σχέσεις θέλουν διόρθωση, όπου θα υπεισέρχεται και η συχνότητα.

Παράδειγμα

- Μια κινητή συσκευή βρίσκεται σε απόσταση r=1 km από ένα Σταθμό Βάσης και χρησιμοποιεί κεραία με απολαβή G_r=2,5 dB. Η συχνότητα φέροντος είναι f_c=900MHz. Η κεραία του πομπού (στο Σταθμό Βάσης) βρίσκεται σε ύψος h_t=40 m, και η κεραία του δέκτη σε ύψος h_r=1,8 m. Η ισχύς εκπομπής από το Σταθμό Βάσης είναι 45 Watt.
- Να υπολογιστούν η ενεργή επιφάνεια της κεραίας του κινητού, καθώς και η λαμβανόμενη ισχύς στο δέκτη, θεωρώντας το μοντέλο διάδοσης δύο κυμάτων που περιγράφηκε ανωτέρω. (Θεωρούμε G_t=L=1)

Λύση

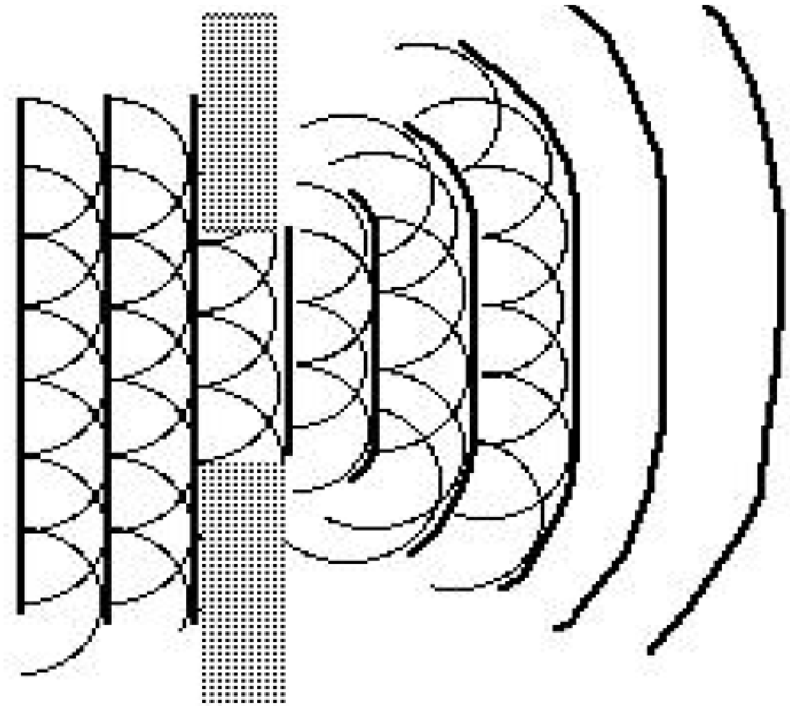
- Έχουμε 10logG_r=2,55, άρα G_r=1,778
- Άρα,

$$A_e = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} = \frac{1,778 \cdot (3 \cdot 10^8 / 900 \cdot 10^6)^2}{4\pi} = 0,0157\ m^2$$

$$P_r = G_r P_{tot} \left(\frac{h_1 h_2}{r^2} \right)^2 = 1,778 \cdot 45 \cdot \left(\frac{40 \cdot 1,8}{(1 \cdot 10^3)^2} \right)^2 = 0,41 \mu Watt = -63,82 dB$$

Περίθλαση

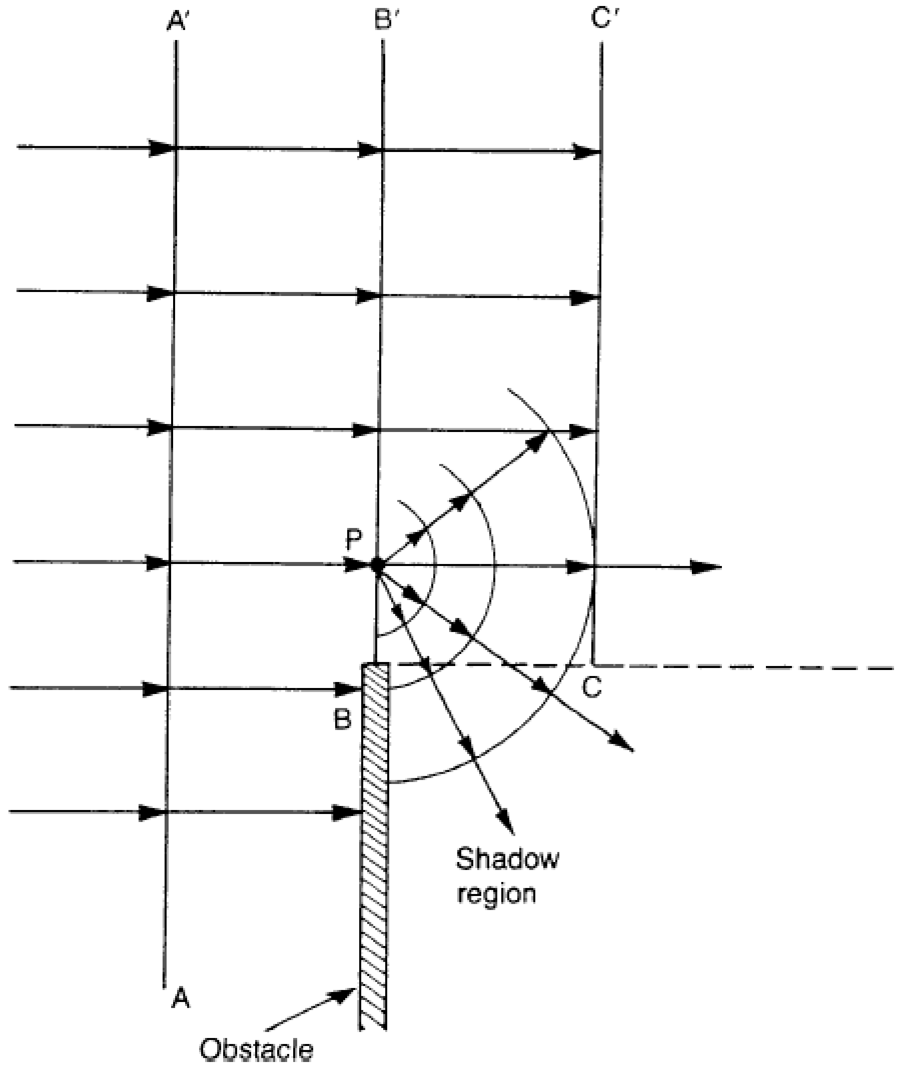
Διάδοση κύματος μέσα από οπή



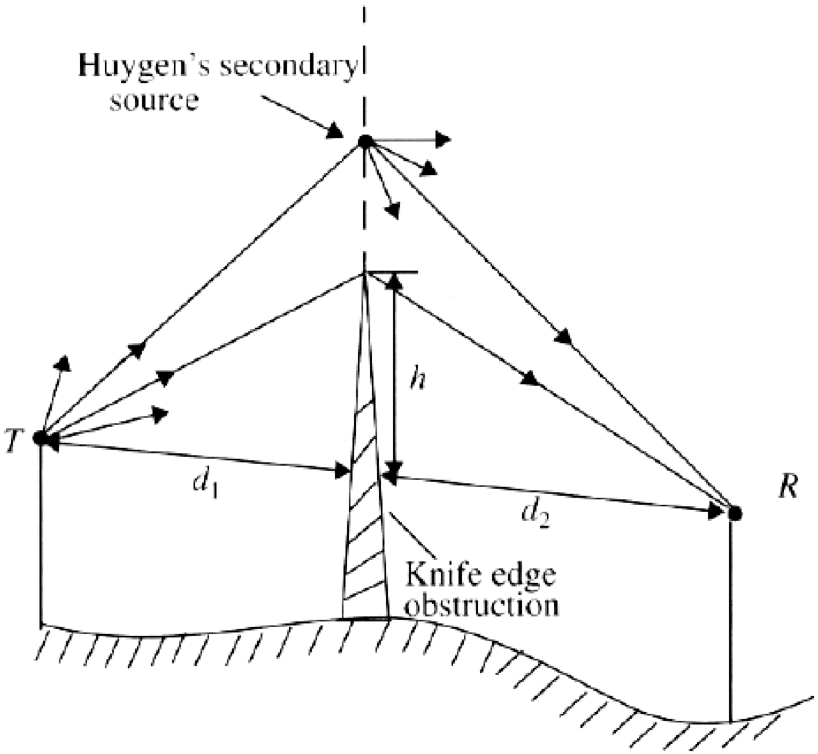
Αρχή του Huygen: Όλα τα σημεία του σφαιρικού μετώπου του κύματος μπορούν να θεωρηθούν ως δευτερεύουσες σημειακές πηγές.
Με τη σειρά τους, όλα τα δευτερεύοντα κύματα κατά μήκος του μετώπου συνθέτονται για τη δημιουργία πιο προχωρημένων μετώπων

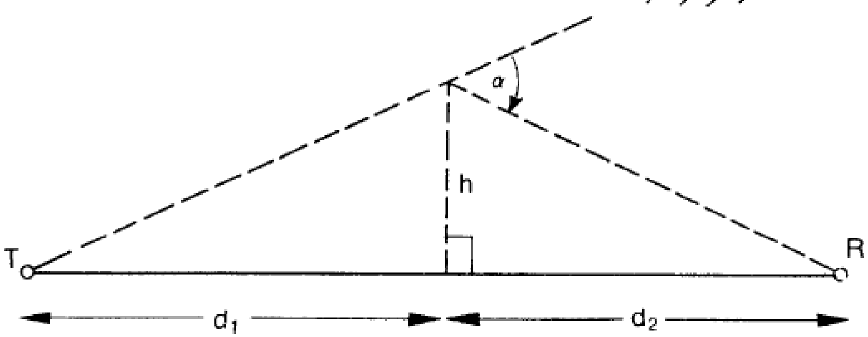
Περίθλαση στην άκρη του εμποδίου

- Λόγω της αρχής του Huygen, δευτερεύοντα κύματα δημιουργούνται από όλα τα σημεία της ευθείας BB'.
- Έτσι, αν για παράδειγμα δούμε το σημείο P, αυτό διαδίδει στη σκιασμένη περιοχή! (τα κύματα εκεί θα προέρχονται και από άλλα αντίστοιχα με το P σημεία, όπου και θα συμβάλλουν)
- Η καμπύλωση των κυμάτων γύρω από το άκρο ενός εμποδίου καλείται περίθλαση και έχει σημαντική επίδραση στη λαμβανόμενη ισχύ



Ανάλυση





- Κάθε κύμα που μεταδίδεται από τον T στον R διανύει απόσταση μεγαλύτερη από το μήκος της ευθείας TR.
- Αποδεικνύεται ότι η επιπρόσθετη διαδρομή που διανύει το κύμα είναι

$$\Delta \approx \frac{h^2}{2}\frac{d_1+d_2}{d_1 d_2}$$

υπό την υπόθεση $h \ll d_1, d_2$.

- Η αντίστοιχη διαφορά φάσης είναι

$$\phi = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda}\frac{h^2}{2}\frac{d_1+d_2}{d_1 d_2}$$

Συντελεστής Fresnel-Kirchoff

- Ορίζουμε το συντελεστή Fresnel-Kirchoff

$$v = h\sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}}$$

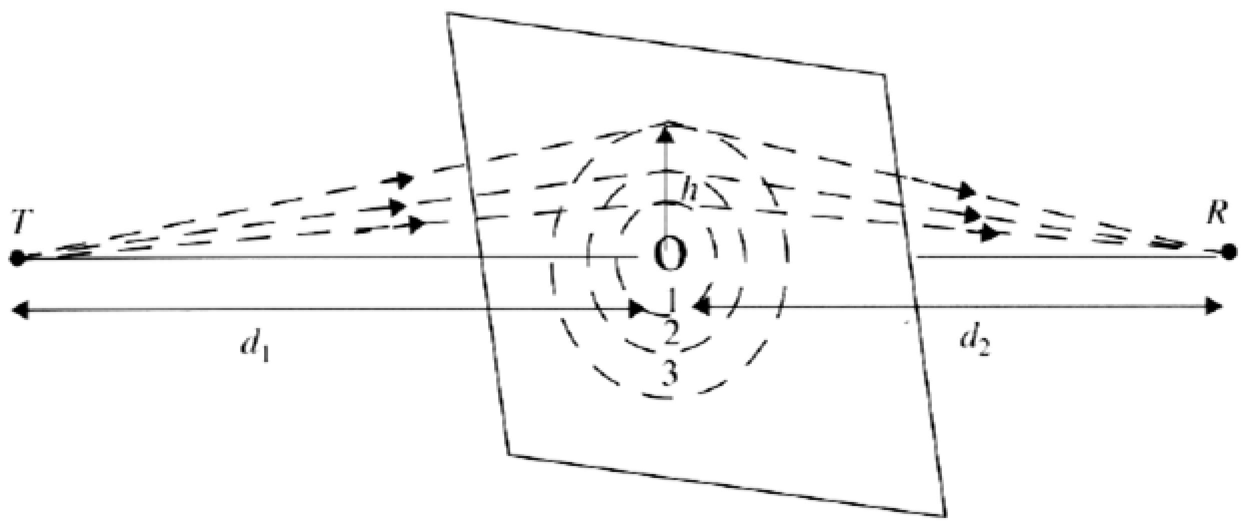
- Άρα, $\phi = \dfrac{\pi}{2} v^2$
- Ισοδύναμα, μπορούμε να γράψουμε

$$\phi = \frac{\pi a^2}{\lambda} \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2} \qquad v = a\sqrt{\frac{2 d_1 d_2}{\lambda (d_1 + d_2)}}$$

όπου α η γωνία στο προηγούμενο σχήμα

Ελλειψοειδείς Ζώνες Fresnel

- Στην ουσία, μπορούμε να φανταστούμε ομόκεντρους κύκλους γύρω από το σημείο Ο που βρίσκεται το εμπόδιο, όπου κάθε ένας δρα ως πηγή κύματος, έτσι ώστε η απόσταση που τελικά διανύει το κύμα από το Τ στο R να είναι κάθε φορά, από κάθε κύκλο, διαφορετική.



Με τη θεώρηση αυτή ορίζονται οι ελλειψοειδείς Ζώνες Fresnel, ακριβής ανάλυση των οποίων προσδιορίζει πλήρως το φαινόμενο της συμβολής κυμάτων στο R, ενώ επίσης θέτει απαιτήσεις για το ύψος της κεραίας – δεν θα μελετηθούν περαιτέρω

«Πλασματικό» ύψος εμποδίου

- Οι προηγούμενες σχέσεις ισχύουν για πομπό και δέκτη μηδενικού ύψους (στο έδαφος). Αν h_t, h_r είναι τα αντίστοιχα ύψη τους, τότε αν h_{obs} είναι το πραγματικό ύψος του εμποδίου, δεν υπεισέρχεται αυτό στις εξισώσεις αλλά το «πλασματικό» του ύψος

$$h = h_{obs} - h_t \frac{d_1}{d_1 + d_2} - h_r \frac{d_2}{d_1 + d_2}$$

Απώλειες περίθλασης (λόγω ενός εμποδίου)

$$G_d(dB) \approx \begin{cases} 0, & v \le -1 \\ 20\log(0.5 - 0.62v), & -1 \le v \le 0 \\ 20\log(0.5\exp(-0.95v)), & 0 \le v \le 1 \\ 20\log\left(0.4 - \sqrt{0.1184 - (0.38 - 0.1v)^2}\right), & 1 \le v \le 2.4 \\ 20\log\left(\dfrac{0.225}{v}\right), & v > 2.4 \end{cases}$$

- Απλοποιημένες παραστάσεις (Lee)

Παράδειγμα

Έστω h_t=50 m, h_t=25 m, d_1=10 km, d_2=2 km, f=900 MHz, h_{obs}=100 m. Να υπολογιστούν: 1) οι απώλειες λόγω περίθλασης, 2) το ύψος που απαιτείται να έχει ένα εμπόδιο για να προκαλέσει απώλειες λόγω περίθλασης της τάξης των G_d=6 dB.

Λύση:

$$\text{a)}\quad h = h_{\text{obs}} - h_t \frac{d_2}{d_1 + d_2} - h_r \frac{d_2}{d_1 + d_2} = 70.8333\ \text{m}$$

-25,5

$$v = h\sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} = 4.2521 \Rightarrow G_d = 25.5\ \text{dB}$$

$$\text{b)}\quad \text{G}_\text{d} = 6\ \text{dB} \Rightarrow v = 0 \Rightarrow h_{obs} = h_t \frac{d_2}{d_1 + d_2} + h_r \frac{d_2}{d_1 + d_2} = 29.1667\ \text{m}$$

Πηγές

- Για τη διαμόρφωση των διαφανειών αυτού του κεφαλαίου, χρησιμοποιήθηκε υλικό (εικόνες, διαγράμματα κτλ.) από διάφορες άλλες διαλέξεις του μαθήματος των Κινητών Επικοινωνιών που είναι διαθέσιμες στο Διαδίκτυο:
  - Σ. Τουμπής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Κύπρου (2007)
  - Ι. Μαρμόρκου, Τμήμα Τεχνολογίας Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, ΤΕΙ Λάρισας
  - Φ. Κωνσταντίνου, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Μοντέλα ραδιοκάλυψης)
  - Μ. Θεολόγου, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο