

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

Διάδοση

Δημοσθένης Βουγιούκας

Αναπληρωτής Καθηγητής Παν. Αιγαίου

dnougiou@aegean.gr

ΕΚΠΑ

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

Ασύρματο κανάλι

2

- Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια εκπέμπεται στο μέσο με κεραία
- Για αποδοτική ακτινοβολία απαιτείται κεραία μακρύτερη από το $1/10$ του μήκους κύματος
- Τύποι διάδοσης (propagation)
 1. Διάδοση κύματος εδάφους (ground wave propagation)
 - στις VLF η γη δρα ως κυματοδηγός
 - τα σήματα διαδίδονται γύρω από την γη
 - το διαθέσιμο εύρος φάσματος μικρό
 - εκπομπή με χρήση AM ή FM μέχρι 100 μίλια
 2. Διάδοση κύματος χώρου (sky wave) με ανάκλαση από την ιονόσφαιρα
 - Απορρόφηση συχνοτήτων κάτω των 2 MHz
 - Τη νύχτα τα σήματα AM μπορούν να ταξιδέψουν μεγάλες αποστάσεις διότι η πυκνότητα των ηλεκτρονίων πέφτει
 - Πάνω από τα 30 MHz διαπερνά την ιονόσφαιρα

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

Ασύρματο κανάλι

3

3. Οπτικής Επαφής (LOS: *Line Of Sight*)

- Άνω των 30 MHz – Δορυφορικές επικοινωνίες / TV κλπ
- Περιορισμοί από την καμπυλότητα της γης
- Στα 2.4 GHz συντονίζεται το μόριο του νερού
- Πάνω από τα 10GHz οι ατμοσφαιρικές συνθήκες ασκούν επιρροές

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

Ασύρματη Διάδοση

4

□ Βασικά Προβλήματα Ασύρματης Διάδοσης

- Θόρυβος
- Παρεμβολές (ομοδιαυλικές και γειτονικών διαύλων)
- Παρεμπόδιση και εξασθένηση από ανθρώπινες και φυσικές κατασκευές
- Πολυδιαδρομική Διάδοση (multipaths)

□ Τα παραπάνω θέτουν όρια

- Στην έκταση της κάλυψης
- Το ρυθμό μετάδοσης
- Αξιοπιστία και ποιότητα επικοινωνίας

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

Ασύρματη Διάδοση

5

- Η ατμόσφαιρα είναι το μέσο μετάδοσης
- Διάδοση Η/Μ κυμάτων και μεταφορά σήματος πληροφορίας
- Στα ασύρματα συστήματα χρησιμοποιούνται κυρίως οι ζώνες VHF (30MHz-300MHz), UHF(300MHz-3GHz) και SHF (3GHz-30GHz)
- Υπάρχουν διάφοροι τύποι ραδιοκυμάτων ανάλογα με τους μηχανισμούς που συμμετέχουν στη ραδιοδιάδοση
- Στα ασύρματα συστήματα κυρίως χρησιμοποιούνται τα κύματα χώρου (space waves)

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

Ασύρματη Διάδοση

6

- Γιατί VHF και UHF???
- Αμελητέα ιονοσφαιρική διάδοση λόγω υψηλής συχνότητας
- Μικρό μέγεθος κεραιών και τοποθέτησή τους αρκετά μήκη κύματος πάνω από το έδαφος σε ιστούς
- Δεν απαιτείται κατ' ανάγκη οπτική επαφή
- Μικρό κόστος εξοπλισμού
- Επιθυμητές οι απώλειες διάδοσης για λειτουργία κυψελωτών συστημάτων

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

Ασύρματη Διάδοση

7

- **Πολυδιαδρομική διάδοση (multipaths)** : η ενέργεια καταφθάνει στο δέκτη από **διαφορετικά μονοπάτια**, δηλαδή άφιξη πολλαπλών εκδόσεων του εκπεμπόμενου σήματος στο δέκτη
- Κάθε αφικνούμενο ραδιοκύμα καταφθάνει
 - ▣ Από διαφορετική κατεύθυνση
 - ▣ Με διαφορετική χρονική καθυστέρηση
 - ▣ Διαφορετικό πλάτος
- Διανυσματική άθροιση στην κεραία του δέκτη και άρα αθροιστική ή αφαιρετική συμβολή ανάλογα με τις φάσεις των επιμέρους κυμάτων

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

Μηχανισμοί Διάδοσης

8

- **Απευθείας συνιστώσα**
- **Ανάκλαση (Reflection)**
 - ▣ Η/Μ κύματα προσκρούουν σε λείες επιφάνειες με πολύ μεγάλες διαστάσεις ως προς το μήκος κύματος του RF σήματος
- **Περίθλαση (Diffraction)**
 - ▣ Καμπύλωση ραδιοκυμάτων γύρω από φυσικά ή τεχνητά εμπόδια, λόγω εμφάνισης δευτερευόντων κυμάτων σύμφωνα με την αρχή του Huygens. Πολλές φορές καλείται και σκίαση
- **Σκέδαση (Scattering)**
 - ▣ Πρόσκρουση Η/Μ κυμάτων σε μεγάλη τραχιά επιφάνεια ή σε επιφάνεια με διαστάσεις συγκρίσιμες του μήκους κύματος και διασκορπισμός της ενέργειας σε όλες τις κατευθύνσεις

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

Μηχανισμοί Διάδοσης

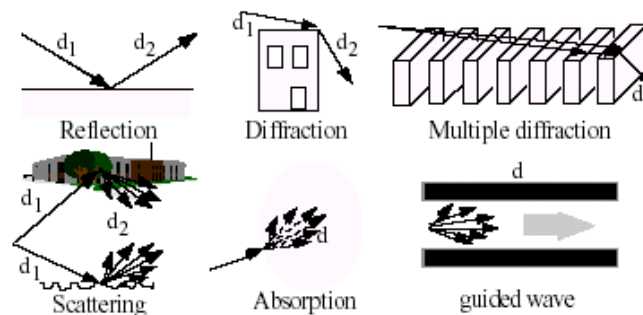
9

- **Απορρόφηση (Absorption)**
 - ▣ Μείωση του πλάτους (έντασης πεδίου) ενός ραδιοκύματος λόγω αμετάκλητης μεταφοράς μέρους της ενέργειας του κύματος στο μέσο διάδοσης
- **Διάθλαση (Refraction)**
 - ▣ Αλλαγή στην κατεύθυνση διάδοσης ενός ραδιοκύματος, λόγω της χωρικής μεταβολής του δείκτη διάθλασης του μέσου διάδοσης

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Μηχανισμοί Διάδοσης

10



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Φαινόμενα Διάδοσης για το Ραδιοδίαυλο

11

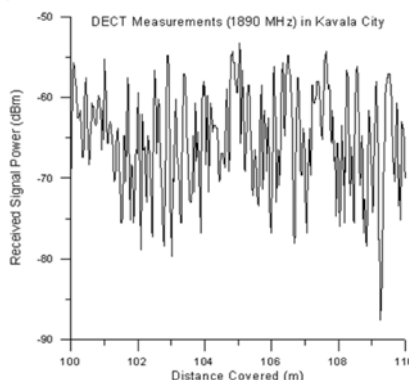
- **Εξασθένηση πλάτους του σήματος (path loss)**
 - ▣ Χαρακτηρίζει την εξάρτηση της μείωσης της μέσης λαμβανόμενης ισχύος από την απόσταση πομπού-δέκτη.
- **Σκίαση (shadowing)**
 - ▣ Χαρακτηρίζει την στατιστική κατανομή της μέσης τιμής της λαμβανόμενης ισχύος, δηλαδή τη συμπεριφορά συναρτήσεως του περιβάλλοντος.
- **Πολυδιαδρομική διάδοση (multipath)**
 - ▣ Χαρακτηρίζει τις διαλείψεις του σήματος λόγω αθροιστικής και αφαιρετικής συμβολής.
- **Παρεμβολές (interference)**
 - ▣ Ομοδιαυλικές και γειτονικών διαύλων.
- **Διασπορά Συχνότητας (Frequency Dispersion)**
 - ▣ Αλλαγή στη συχνότητα και τη φάση των συνιστωσών που απαρτίζουν ένα σήμα ευρείας ζώνης λόγω διασκορπιστικού μέσου (εξάρτηση των συντακτικών παραμέτρων από τη συχνότητα)

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

Φαινόμενα Διάδοσης για το Ραδιοδίαυλο

12

- **Διαλείψεις (fading)** : η μεταβολή του πλάτους ή της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος.



Οι Διαλείψεις διαχωρίζονται σε:

- **επίπεδες (flat fading)**: τυχαίες μεταβολές στο πλάτος
- **επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα (frequency selective fading)**: διασυμβολική παρεμβολή (ISI)

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

Μοντελοποίηση Ραδιοδιαύλου

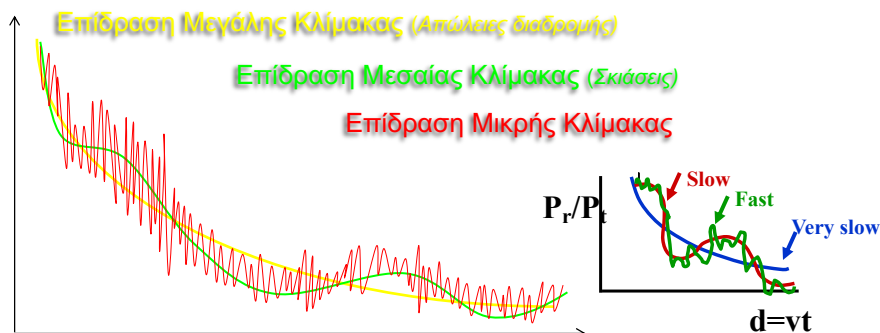
13

- Ο διάυλος είναι γενικά ένα Φίλτρο
- Θεωρούμε ότι είναι Γραμμικό Φίλτρο
- Είναι Χρονικά Μεταβαλλόμενο, τόσο λόγω της κίνησης ενός δέκτη σε περιβάλλον σκεδαστών, αλλά και λόγω της μεταβολής των χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος (π.χ. κίνηση τοπικών σκεδαστών)
- Είναι **τυχαία χρονικά μεταβαλλόμενο γραμμικό φίλτρο**, γεγονός που επιβαρύνει τη ραδιοδιάδοση
- Υπάρχουν συναρτήσεις μεταφοράς και κρουστικές αποκρίσεις που το περιγράφουν ικανοποιητικά

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Είδη Διαλείψεων

14



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Είδη Διαλείψεων

15

- **Διαλείψεις Μεγάλης Κλίμακας (Large Scale/Long Term Fading)** : Εμπεριέχουν τις απώλειες διάδοσης και τη σκίαση.
 - Εκφράζουν τη μέση εξασθένηση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος λόγω μεγάλων μετατοπίσεων (πολλές εκατοντάδες ή και χιλιάδες μήκη κύματος)
 - Αφορά όλα εκείνα τα φαινόμενα που εμφανίζονται κατά μέσο όρο σε έναν δακτύλιο γύρω από ένα σταθμό βάσης (base station).
 - Με βάση αυτή την εξασθένηση καθορίζονται το μέγεθος της περιοχής κάλυψης και άρα το μέγεθος των κυψελών (cells), καθώς και το SNR του λαμβανόμενου σήματος στην περιοχή αυτή.
 - Για τη μελέτη της εξασθένησης μεγάλης κλίμακας έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα (π.χ. ελευθέρου χώρου, αντιστροφής n-οστής δύναμης, κλπ.)

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

Είδη Διαλείψεων

16

- **Διαλείψεις Μικρής Κλίμακας (Small Scale/Short Term Fading)** : Εμπεριέχουν τις απώλειες διάδοσης.
 - Περιγράφουν τη μεταβολή πλάτους και φάσης για μετατοπίσεις της τάξης του $\lambda/2$.
 - Εξετάζεται η διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε μικρότερη κλίμακα όπου εμφανίζονται σημαντικές αποκλίσεις στην ισχύ του, σε περιοχές συγκρίσιμες με κλάσματα του μήκους κύματός του.
 - Έχουμε μεταβολή των χαρακτηριστικών του σήματος σε πλάτος και φάση λόγω μετατόπισης του κινητού σταθμού, που μπορούν να φθάσουν και τα 20-30dB.
 - Οι διαλείψεις οφείλονται στη χρονική διασπορά του σήματος πολυδιαδρομικής διάδοσης και στη χρονική μεταβολή του διαύλου λόγω μετατόπισης του δέκτη, αλλά και των σκεδαστών που συμμετέχουν στη διάδοση.

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

Είδη Διαλείψεων

17

- Διαλείψεις Μικρής Κλίμακας (Small Scale/Short Term Fading) :
 - Συνήθως επειδή χρησιμοποιούμε ένα περιθώριο ισχύος (margin) στο link budget της τάξης των 10-20dB, όταν η διάλειψη το υπερβεί, αναφερόμαστε σε ισχυρή διάλειψη.
 - Αποτέλεσμα είναι η δραματική επιδείνωση του BER κατά τη διάρκεια ισχυρών διαλείψεων.
 - Έχουμε ριπές σφαλμάτων (διαδοχικά bits εσφαλμένα).
 - Αντιμετώπιση : κωδικοποίηση-διεμπλοκή, διαφορική λήψη, προσαρμοστικές τεχνικές διαμόρφωσης.

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

Χρονική Διασπορά και ISI

18

- Θεωρούμε 2 μόνο συνιστώσες στο δέκτη

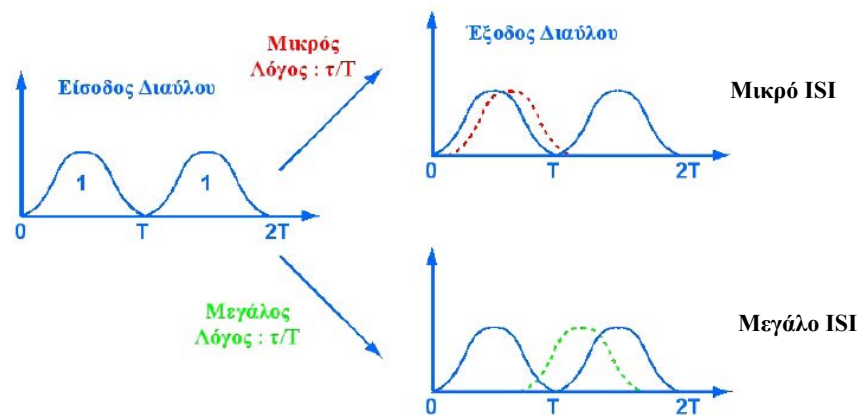
$$h(t) = A_0\delta(t - \tau_0) + A_1\delta(t - \tau_1)$$

- Σημαντική παράμετρος είναι η διαφορά των καθυστερήσεων $T = \tau_1 - \tau_0$, που καθορίζει το μέγεθος της χρονικής διασποράς (delay spread)
- Αυξανόμενης της διαφοράς αυξάνεται η διασυμβολική παρεμβολή (ISI)

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

Χρονική Διασπορά και ISI

19

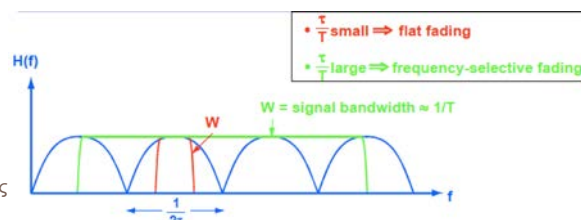


Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Χρονική Διασπορά και ISI

20

- **Επίπεδες Διαλείψεις** : ολίσθηση του BW του σήματος ως προς τη συνάρτηση μεταφοράς και άρα η εξασθένηση θα μεταβάλλεται
- **Διαλείψεις Επιλεκτικές ως προς τη Συχνότητα** : Για μεγάλο BW, δύο συχνότητες που απέχουν αρκετά στο εύρος ζώνης, θα υφίστανται διαφορετική εξασθένηση
- Σημαντική η σχέση εύρους ζώνης και χρονικής διασποράς
- Ακόμη και μεγάλο τ , αν το S είναι μικρό, τότε δεν υπάρχει σημαντικό πρόβλημα διαλείψεων



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

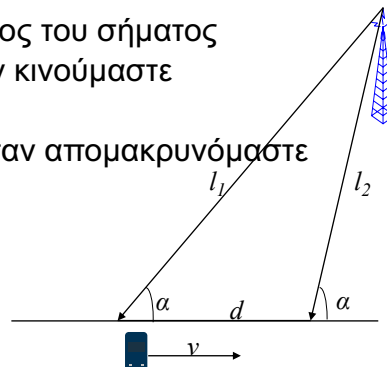
Ολίσθηση Doppler

21

- Η ολίσθηση Doppler είναι η ολίσθηση της συχνότητας που παρατηρείται στο λαμβανόμενο σήμα, όταν υπάρχει σχετική κίνηση του δέκτη ως προς τον πομπό.

Αποτέλεσμα:

- Αύξηση του εύρους φάσματος του σήματος
- Η συχνότητα αυξάνεται όταν κινούμαστε προς τον πομπό
- Η συχνότητα ελαττώνεται όταν απομακρυνόμαστε από τον πομπό.



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Ολίσθηση Doppler

22

- Κινητό με ταχύτητα v διανύει απόσταση d
- Διαφορά διαδρομής Δl σε χρόνο Δt

$$\Delta l = d \cos \alpha = u \Delta t \cos \alpha$$

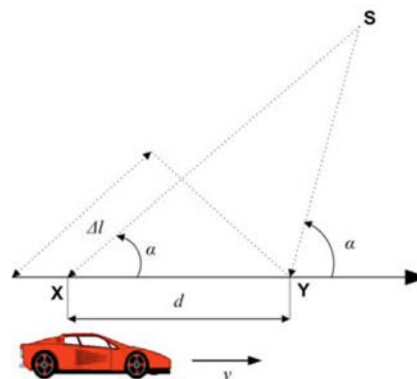
$$\Delta \varphi = \frac{2\pi \Delta l}{\lambda} = \frac{2\pi u \Delta t}{\lambda} \cos \alpha$$

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = \frac{u}{\lambda} \cos \alpha$$

- Ενδεικτικά: για $f_c = 1850$ MHz είναι $\lambda = 0.162$ m. Έστω $\alpha = 0^\circ$ $v = 90$ Km/h

$$f_d = \frac{90 \times 10^3 \text{ m} / 3600 \text{ s}}{0.162 \text{ m}} = 154.32 \text{ Hz}$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής



Απώλειες Διάδοσης

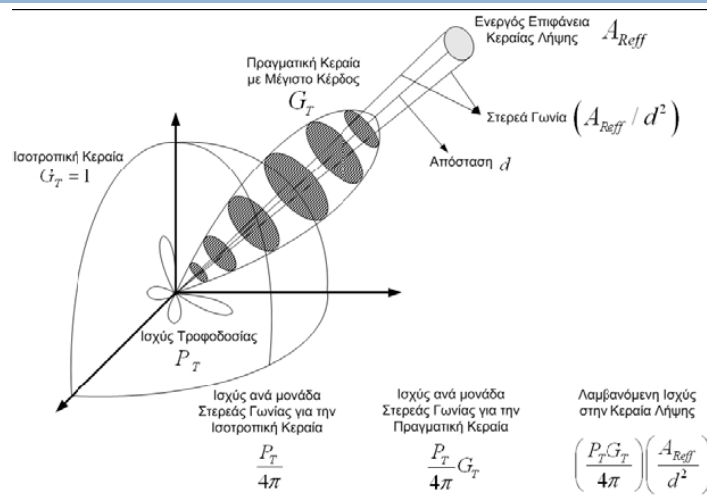
23

- **Απώλειες Διάδοσης (Path Loss)** : Ο λόγος της εκπεμπόμενης προς τη λαμβανόμενη ισχύ, για δεδομένο περιβάλλον διάδοσης.
- Είναι συνάρτηση κυρίως της απόστασης.
- Υπάρχουν πολλά μοντέλα υπολογισμού των μέσων απωλειών, ανάλογα με το περιβάλλον διάδοσης και την εφαρμογή.
- Υπάρχουν 3 βασικές κατηγορίες μοντέλων και οι αντίστοιχες υβριδικές υλοποιήσεις.
 - **Εμπειρικά** (προσαρμογές σε δεδομένα μετρήσεων)
 - **Αναλυτικά** (χρήση γνωστών μεθόδων H/M διάδοσης, π.χ. GTD, PO, UTD, κλπ.)
 - **Στατιστικά-φυσικά** (κατανομές και αναλυτικές μέθοδοι)

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομπής

Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

24



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομπής

Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

25

$$P_r(d) = \left(\frac{P_t G_t}{4\pi} \right) \left(\frac{A_{\text{Reff}}}{d^2} \right) \text{ Watts}$$

Πυκνότητα Ροής Ισχύος: $\Phi(d) = |\bar{P}_{\text{av}}(d)| = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} (\text{Watt} / \text{m}^2)$

Εξίσωση Η. Friis:
$$P_r(d) = \Phi(d) A_{\text{Reff}} = \left(\frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \right) \left(\frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \right)$$
$$= P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

26

- Η λαμβανόμενη ισχύς στο δέκτη είναι

$$\text{Received Power} = \frac{\text{Transmitted Power} \cdot \text{Transmitter Antenna Gain} \cdot \text{Receiver Gain}}{\text{Path Losses}} (\text{Watt})$$

- Ή σε λογαριθμικές μονάδες

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_{FS} = \text{EIRP} + G_r - L_{FS} (\text{dBW})$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

27

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

$$\begin{aligned} PL(dB) &= 10 \log \left(\frac{P_t}{P_r(d)} \right) = 10 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \\ &= -10 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 = -20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) \\ &= -20 \log(\lambda) + 20 \log(4\pi) + 20 \log(d) \\ &= 22 - 20 \log(\lambda) + 20 \log(d) \end{aligned}$$

Κανόνας : 20 dB/decade

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

28

- Για κάθε δεκαπλασιασμό της απόστασης οι απώλειες αυξάνονται κατά 20dB, δηλαδή ο κανόνας που προκύπτει είναι απώλειες **20dB/decade**
- Για κάθε διπλασιασμό της απόστασης οι απώλειες διάδοσης αυξάνονται κατά περίπου 6dB. Επίσης για κάθε διπλασιασμό της συχνότητας έχουμε αύξηση των απωλειών διάδοσης κατά 6dB

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

29

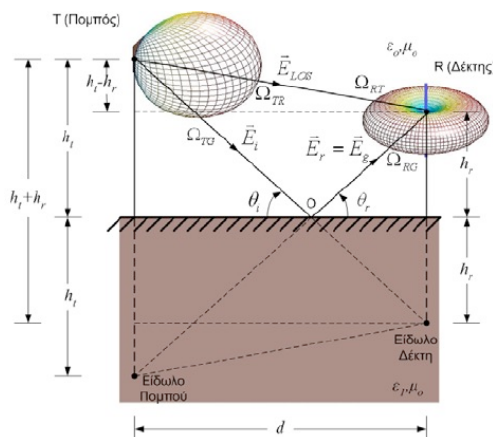
$$\begin{aligned}
 PL(dB) &= 22 - 20 \log(\lambda) + 20 \log(d) \\
 &= 22 - 20 \log\left(\frac{300}{f_{MHz}}\right) + 20 \log(d_{km} \cdot 1000) \\
 &= 20 \log(f_{MHz}) + 20 \log(d_{km}) + 32.45
 \end{aligned}$$

Στη βιβλιογραφία θα βρείτε και άλλες εκφράσεις ανάλογα με τις μονάδες των μεγεθών συχνότητας και απόστασης.

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Μοντέλο Επίπεδης Γης

30



- Το κυριότερο πραγματικό πρόβλημα που εισάγεται στο μοντέλο των δύο ακτινών είναι η διαφορά φάσης των δύο ακτινών.
- Για να γίνει αυτό πρέπει να μελετηθεί το H/M 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.

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Μοντέλο Επίπεδης Γης

31

$$P_r(d) = P_t \cdot G_t(\theta_t, \varphi_t) \cdot G_r(\theta_r, \varphi_r) \frac{(h_t h_r)^2}{d^4}$$

προσεγγιστική
σχέση

$$PL(dB) = 40 \log(d) - 10 \log G_t(\theta_t, \varphi_t) - 10 \log G_r(\theta_r, \varphi_r) - 20 \log h_t - 20 \log h_r$$

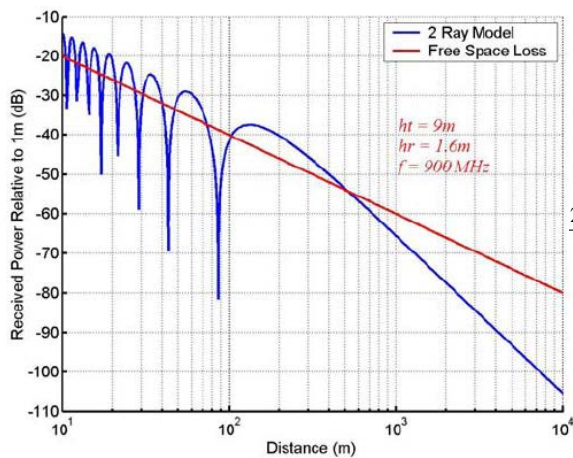
$$P_r(d) = P_t \cdot G_t(\theta_t, \varphi_t) \cdot G_r(\theta_r, \varphi_r) \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \cdot 4 \sin^2 \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right)$$

χωρίς
προσέγγιση

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Μοντέλο Επίπεδης Γης

32



Breakpoint

$$d = \frac{4h_t h_r}{\lambda} \leftrightarrow k\Delta = \pi$$

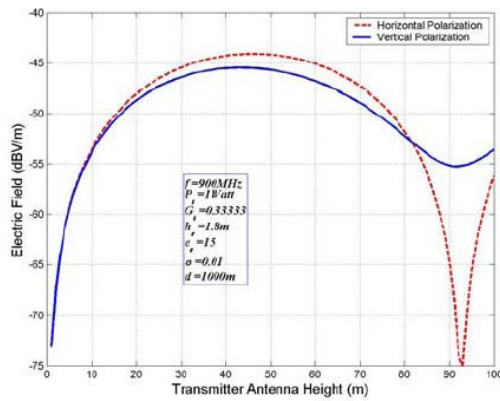
$$\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} = \frac{k\pi}{2} = \begin{cases} k = 2\nu + 1, \nu = 1, 2, 3, \dots, \max \\ k = 2\nu, \nu = 1, 2, 3, \dots, \min \end{cases}$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Μοντέλο Επίπεδης Γης

33

□ Κέρδος Ύψους Κεραίας

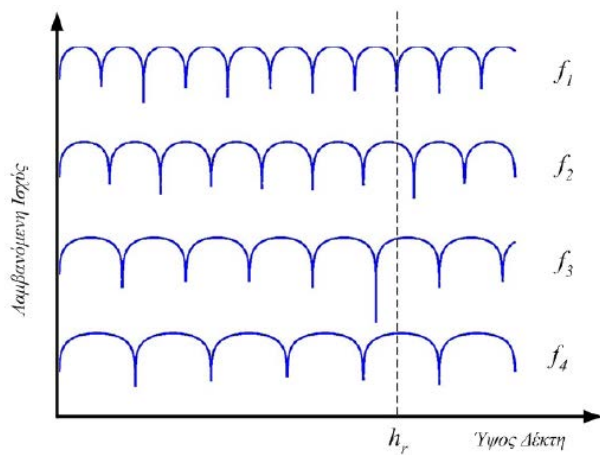


Κέρδος περίπου 6dB για κάθε διπλασιασμό του ύψους της κεραίας πομπού ή δέκτη

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Μοντέλο Επίπεδης Γης

34



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Απώλειες Διάδοσης

35

- Συνήθως εκφράζουμε τη λαμβανόμενη ισχύ ή τις απώλειες διάδοσης σε απόσταση d , συναρτήσει των αντίστοιχων μεγεθών σε μια απόσταση αναφοράς d_o .
- Η ισχύς στην απόσταση αυτή μπορεί να προκύψει είτε από μετρήσεις είτε από την εξίσωση του Friis.
- Πρέπει η απόσταση αυτή να είναι στο μακρινό πεδίο, αλλά ταυτόχρονα αρκετά μικρή σε σχέση με πιθανές αποστάσεις λειτουργίας του συστήματος και υπολογισμού των απωλειών.
- Το μακρινό πεδίο μιας κεραίας, δηλαδή για την περιοχή που το μέτωπο του κύματος μπορεί να θεωρείται επίπεδο, είναι η περιοχή πέρα από την απόσταση:

$$d > \frac{2D^2}{\lambda}$$

όπου D είναι η μέγιστη γραμμική διάσταση της κεραίας.

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Απώλειες Διάδοσης

36

- Παρατηρούμε πως αν γνωρίζουμε (μόνο) την ισχύ σε απόσταση d_o , τότε μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύ σε απόσταση d απλά:

$$\begin{aligned} P_r(d) &= P_r(d_o) \cdot \left(\frac{d_o}{d}\right)^2 \\ P_r(d)(dBm) &= P_r(d_o)(dBm) + 10 \log\left(\frac{d_o}{d}\right)^2 = \\ &= P_r(d_o)(dBm) - 10 \log\left(\frac{d}{d_o}\right)^2 \end{aligned}$$

$$PL(d)(dB) = PL(d_o)(dB) + 10 \log\left(\frac{d}{d_o}\right)^2$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Μοντέλο Απλής Κλίσης

37

- Σε πραγματικές συνθήκες το μοντέλο ελεύθερου χώρου δεν είναι ικανοποιητικό.
- Ένα απλό εμπειρικό μοντέλο για τη λαμβανόμενη ισχύ και τις απώλειες διάδοσης είναι το εξής

$$P_r(d) = P_r(d_o) - 10n \log\left(\frac{d}{d_o}\right)$$

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

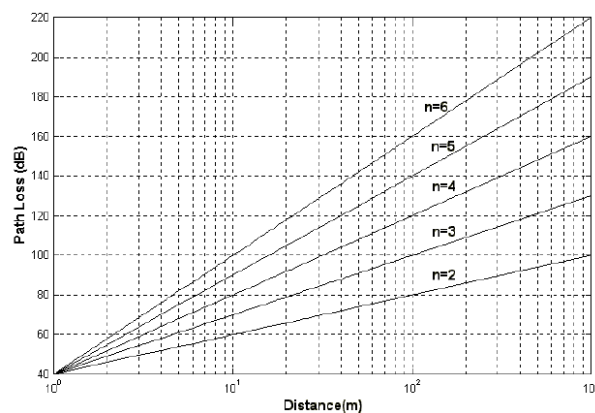
- όπου n ο συντελεστής απωλειών διάδοσης (path loss factor), ο οποίος για FSL είναι $n=2$.

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Μοντέλο Απλής Κλίσης

38

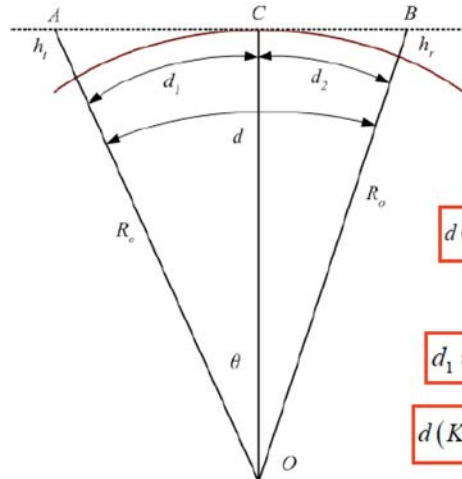
- Συνήθως κυμαίνεται από 2 ως 4 για τυπικές αστικές περιοχές με μακροκυψέλες και από 1.6 ως 8 για μικροκυψελωτό περιβάλλον.



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Ανάκλαση από Σφαιρική Επιφάνεια (Γη)

39



Οπτικός Ορίζοντας

$$d_1 = \theta R_o \cong \sqrt{2h_t R_o}$$

$$R_o \approx 6370 \text{ Km}$$

$$d (\text{Km}) = 3.57 (\sqrt{h_t (\text{m})} + \sqrt{h_r (\text{m})})$$

Ράδιο Ορίζοντας

$$d_1 \approx \sqrt{2h_t R_e} \quad R_e \approx 8490 \text{ Km}$$

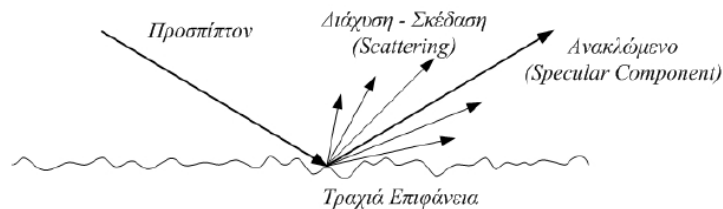
$$d (\text{Km}) = 4.12 (\sqrt{h_t (\text{m})} + \sqrt{h_r (\text{m})})$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής $d (\text{km}) = 3.57 \sqrt{Kh}$ K = ρυθμιστικός παράγοντας για να ληφθεί υπόψη η διάθλαση (K = 4/3)

Ανάκλαση και Σκέδαση από Τραχιά Επιφάνεια

40

- Αποτέλεσμα της τραχύτητας της επιφάνειας είναι η διάχυση της ανάκλασης σε πολλές κατευθύνσεις ή όπως αποκαλείται **σκέδαση**

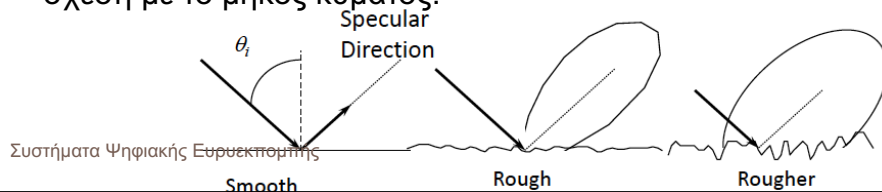


Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Ανάκλαση και Σκέδαση από Τραχιά Επιφάνεια

41

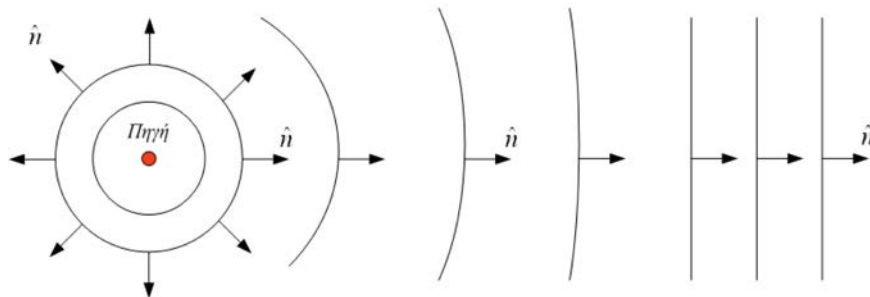
- Όταν η επιφάνεια είναι τραχύτερη, το κύμα ανακλάται (σκεδάζεται) από ένα μεγάλο αριθμό σημείων επί της επιφάνειας, διευρύνοντας έτσι την κατεύθυνση στην οποία μεταδίδεται/σκεδάζεται η ενέργεια
- Αυτή η διαδικασία μειώνει την ενέργεια της κατοπτρικής ανάκλασης / κατεύθυνσης
- Ο βαθμός σκέδασης εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης και την τραχύτητα της επιφάνειας σε σχέση με το μήκος κύματος.



Κυματικά Μέτωπα

42

Ισοφασικές Επιφάνειες = Κυματικά Μέτωπα



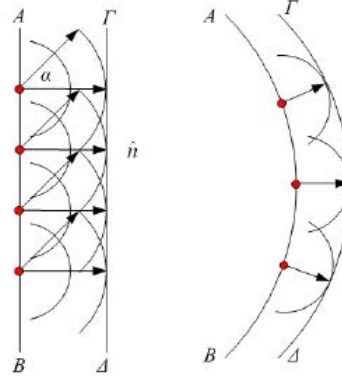
- Σε μεγάλες αποστάσεις από τη σημειακή πηγή το σφαιρικό κυματικό μέτωπο τείνει να γίνει επίπεδο

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

Αρχή του Huygens

43

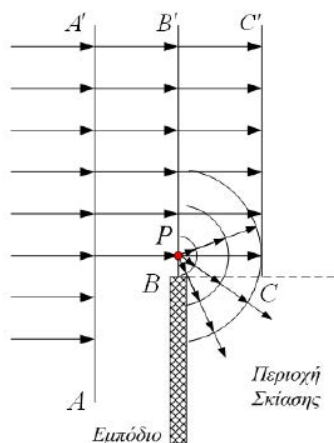
- Κάθε σημείο σε ένα πρωτεύον κυματικό μέτωπο αποτελεί πηγή δευτερευόντων σφαιρικών κυματικών μετώπων και αυτά τα δευτερεύοντα κυματικά μέτωπα συνδυάζονται και παράγουν ένα νέο επίπεδο κυματικό μέτωπο στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος.



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Περίθλαση σε Αιχμή

44



Τα κυλινδρικά κύματα που εκπέμπονται από τις δευτερεύουσες πηγές του κυματικού μετώπου BB' , θα εισέλθουν στη σκιασμένη περιοχή και το πεδίο σε κάθε σημείο αυτής της περιοχής θα προκύψει ως υπέρθεση των κυλινδρικών αυτών κυμάτων. Η **καμπύλωση** των ραδιοκυμάτων γύρω από την αιχμή του εμποδίου η οποία και καλείται **περίθλαση**.

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Περίθλαση σε Αιχμή

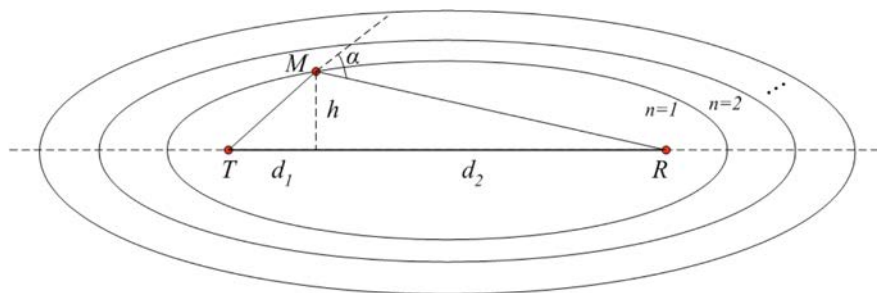
45

- Σε υψηλές συχνότητες το φαινόμενο της περίθλασης όπως και της ανάκλασης και της διάθλασης, είναι **τοπικό** και εξαρτάται από:
 - τη γεωμετρία του αντικειμένου στο σημείο της περίθλασης (π.χ. σφήνα, ακμή, καμπύλη επιφάνεια, κλπ.)
 - το πλάτος, τη φάση και την πόλωση του προσπίπτοντος πεδίου στο σημείο της περίθλασης.

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Ελλειψοειδή και Ζώνες Fresnel

46



- Ελλειψοειδή εκ περιστροφής γύρω από την ευθεία που συνδέει πομπό και δέκτη.
- Θεωρούμε ότι:

$$TM + MR = TR + n \frac{\lambda}{2}$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Ελλειψοειδή και Ζώνες Fresnel

47

$$TR = d_1 + d_2$$

$$TM = \sqrt{d_1^2 + h^2} = d_1 \sqrt{1 + \frac{h^2}{d_1^2}} \approx d_1 + \frac{h^2}{2d_1} \quad (h \ll d_1)$$

$$MR = \sqrt{d_2^2 + h^2} = d_2 \sqrt{1 + \frac{h^2}{d_2^2}} \approx d_2 + \frac{h^2}{2d_2} \quad (h \ll d_2)$$

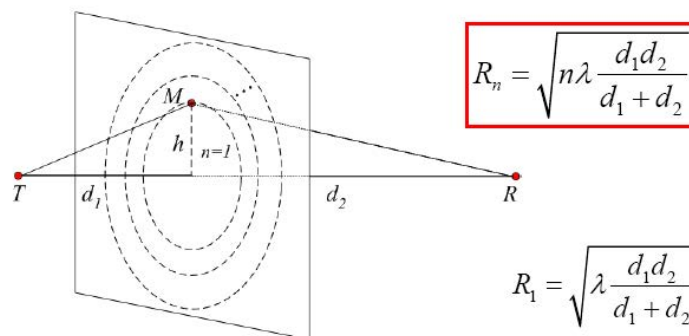
Διαφορά δρόμων $\Delta = n \frac{\lambda}{2}$

Διαφορά φάσης $\phi = k\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} n \frac{\lambda}{2} = n\pi$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομπής

Ελλειψοειδή και Ζώνες Fresnel

48



$$R_n = \sqrt{n\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

$$R_1 = \sqrt{\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

Συντελεστής Περίθλασης Fresnel-Kirchoff: $u = \sqrt{2} \frac{h}{R_1}$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομπής

Ελλειψοειδή και Ζώνες Fresnel

49

- Γενικεύοντας τη θεώρηση της τομής των ελλειψοειδών Fresnel με οποιοδήποτε επίπεδο, προκύπτουν οι ζώνες *Fresnel*, οι οποίες ορίζονται ως η περιοχή μεταξύ δύο διαδοχικών καμπυλών που προκύπτουν από την τομή.
- Όταν $d_1=d_2$

$$R_{n\max} = \sqrt{n\lambda \frac{d_1^2}{2d_1}} = \sqrt{\frac{n\lambda}{2}} d_1 = \sqrt{\frac{n\lambda}{4}} d$$

$$d = 1\text{Km} \quad f = 900\text{MHz} \quad 2R_{1\max} = 18.3\text{m}$$

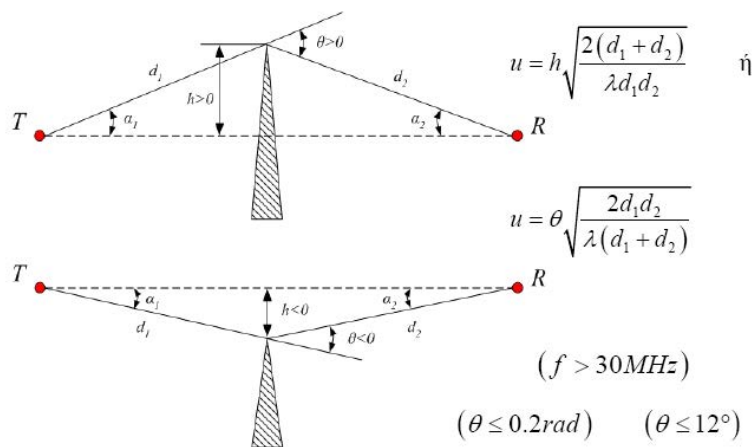
$$f = 1800\text{MHz} \quad 2R_{1\max} = 12.9\text{m}$$

$$f = 5700\text{MHz} \quad 2R_{1\max} = 7.25\text{m}$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Knife-Edge Diffraction

50



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Knife-Edge Diffraction

51

- Το περιθλώμενο από την ευθεία ακμή κύμα είναι κυλινδρικό.
- Το λαμβανόμενο μιγαδικό πεδίο στο δέκτη εκφρασμένο ως προς την τιμή του ελεύθερου χώρου, δηλαδή του λαμβανόμενου αν το εμπόδιο ήταν πολύ μακριά από την ευθεία οπτικής επαφής, δίνεται από τη σχέση

$$\frac{E}{E_0} = \frac{(1+j)}{2} \int_u^{\infty} \exp\left(-j\frac{\pi}{2}t^2\right) dt$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Knife-Edge Diffraction

52

- Μιγαδικό ολοκλήρωμα Fresnel

$$\int_u^{\infty} \exp\left(-j\frac{\pi}{2}t^2\right) dt = \int_u^{\infty} \cos\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt - j \int_u^{\infty} \sin\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt$$

$$\int_u^{\infty} \cos\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt = \frac{1}{2} - \int_0^u \cos\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt = \frac{1}{2} - C(u)$$

$$\int_u^{\infty} \sin\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt = \frac{1}{2} - \int_0^u \sin\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt = \frac{1}{2} - S(u)$$

$$F(u) = \int_0^u \exp\left(-j\frac{\pi}{2}t^2\right) dt = C(u) - jS(u)$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Knife-Edge Diffraction

53

$$\begin{aligned}\frac{E}{E_o} &= \frac{(1+j)}{2} \left\{ \left[\frac{1}{2} - C(u) \right] - j \left[\frac{1}{2} - S(u) \right] \right\} \\ &= \frac{(1+j)}{2} \left[\frac{1}{2}(1-j) - C(u) - jS(u) \right] \\ &= \frac{1}{2} [1 - (1+j)F(u)]\end{aligned}$$

$$L_{k.e.} = \left| \frac{E_o}{E} \right|^2 = \frac{4}{|1 - (1+j)F(u)|^2} = \frac{4}{\left| 1 - (1+j)F\left(\sqrt{2} \frac{h}{R_1}\right) \right|^2}$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

Knife-Edge Diffraction

54

Για $(u \geq -0.7)$ σύμφωνα με τη σύσταση ITU-R P.526

$$L_{k.e.} (dB) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(u-0.1)^2 + 1} + u - 0.1 \right)$$

Για $(u = 0)$ ή $(h = R_1)$

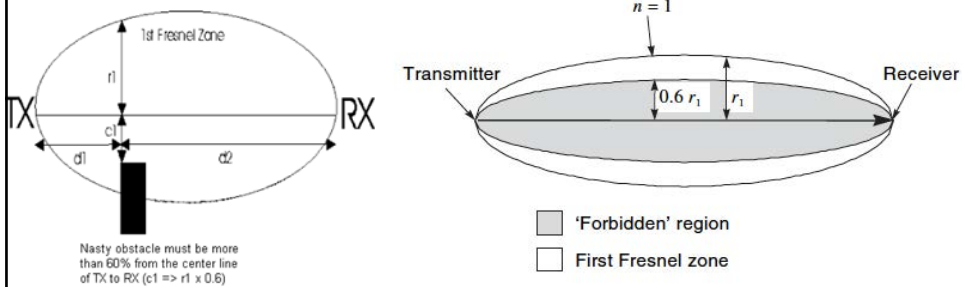
$$F(0) = 0 \quad E = \frac{E_o}{2} \quad \text{Απώλειες 6dB}$$

Πρακτικός Κανόνας: Για μηδενικές απώλειες λόγω περιθλασης κράτα «καθαρό» χωρίς εμπόδια το 56% της 1ης Ζώνης Fresnel ($u \approx -0.8$)

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

Knife-Edge Diffraction

55

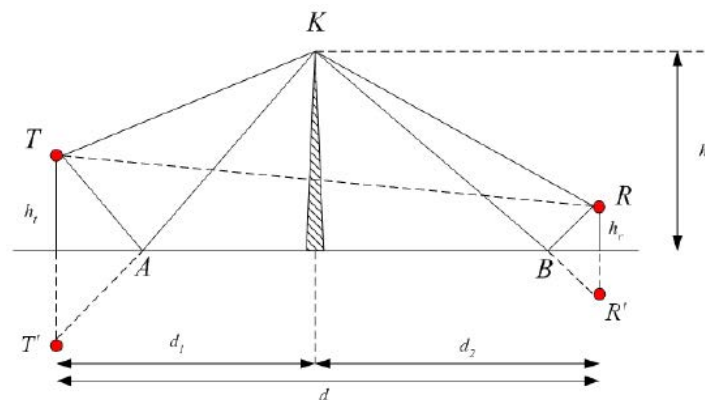


Πρακτικός Κανόνας: Για μηδενικές απώλειες λόγω περίθλασης κράτα «καθαρό» χωρίς εμπόδια το 56% της 1ης Ζώνης Fresnel ($u \approx -0.8$)

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

Περίθλαση από Ευθεία Ακμή Πάνω από Επίπεδο Έδαφος

56



Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

Περίθλαση από Ευθεία Ακμή Πάνω από Επίπεδο Έδαφος

57

$$E_{total} = \sum_{n=1}^4 E_{on} F_n$$

E_{o1} το πεδίο για το μονοπάτι TR
 E_{o2} το πεδίο για το μονοπάτι $T'R$
 E_{o3} το πεδίο για το μονοπάτι TR'
 E_{o4} το πεδίο για το μονοπάτι $T'R'$

$$E_{on} \sim \frac{e^{-jk r_n}}{r_n} \quad n = 1, \dots, 4$$

$$\begin{aligned}
 E_{total} &= E_{o1} F_1 + E_{o2} F_2 + E_{o3} F_3 + E_{o4} F_4 \\
 &= E_{o1} \frac{E_{d1}}{E_{o1}} + E_{o2} \frac{E_{d2}}{E_{o2}} + E_{o3} \frac{E_{d3}}{E_{o3}} + E_{o4} \frac{E_{d4}}{E_{o4}}
 \end{aligned}$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Περίθλαση από Ευθεία Ακμή Πάνω από Επίπεδο Έδαφος

58

$$F_n = \frac{1}{2} \left[1 - (1+j) F \left(\sqrt{2} \frac{h_n}{R_1} \right) \right] \Gamma_n$$

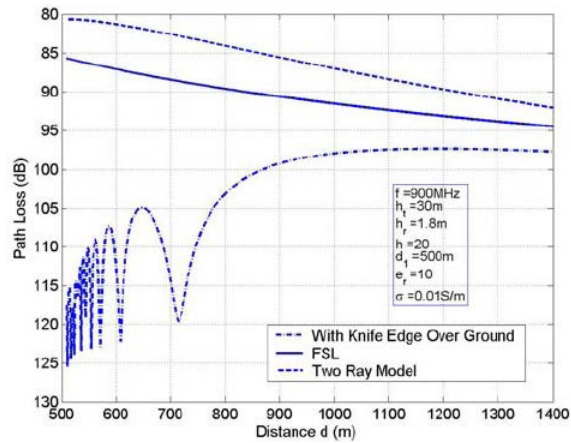
$$L_{k.e.f.e.} (dB) = 20 \log \left| \frac{E_{o1}}{E_{total}} \right| = -20 \log \left| \frac{E_{total}}{E_{o1}} \right|$$

Περίπτωση	Θέση Πομπού	Θέση Δέκτη	Απόσταση Ελεύθερου Χώρου, r_n	Ύψος h_n	Συντελεστής Ανάκλασης
1	T	R	$TR = \sqrt{d^2 + (h_t - h_r)^2}$	$h_1 = h - \frac{h_t d_2 + h_r d_1}{d}$	1
2	T'	R	$T'R = \sqrt{d^2 + (h_t + h_r)^2}$	$h_2 = h + \frac{h_t d_2 - h_r d_1}{d}$	Γ_A
3	T	R'	$TR' = TR$	$h_3 = h - \frac{h_t d_2 - h_r d_1}{d}$	Γ_B
4	T'	R'	$T'R' = TR$	$h_4 = h + \frac{h_t d_2 + h_r d_1}{d}$	$\Gamma_A \Gamma_B$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Περίθλαση από Ευθεία Ακμή Πάνω από Επίπεδο Έδαφος

59



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Περίθλαση από Ευθεία Ακμή Πάνω από Επίπεδο Έδαφος

60

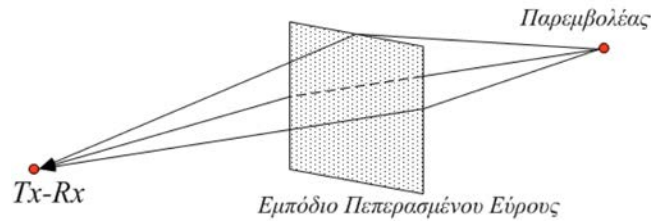
□ Προσέγγιση του Lee:

$$L(v) \text{ (dB)} = \begin{cases} -20 \log(0.5 - 0.62v) & -0.8 < v < 0 \\ -20 \log[0.5 \exp(-0.95v)] & 0 < v < 1 \\ -20 \log[0.4 - \{0.1184 - (0.38 - 0.1v)^2\}^{1/2}] & 1 < v < 2.4 \\ -20 \log(0.225/v) & v > 2.4 \end{cases}$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Περίθλαση σε Εμπόδιο Πεπερασμένου Εύρους

61



- **Βήμα 1^ο:** Υπολογισμός της γεωμετρικής παραμέτρου περίθλασης για κάθε μια από τις τρεις ακμές.
- **Βήμα 2^ο:** Υπολογισμός του παράγοντα απωλειών, με βάση την προσεγγιστική σχέση

$$L_{k.e.} (dB) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(u-0.1)^2 + 1} + u - 0.1 \right)$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομπής

Περίθλαση σε Εμπόδιο Πεπερασμένου Εύρους

62

$$l_{k.e.} (u_i) = 10^{L_{k.e.}(u_i)/20}$$

- **Βήμα 3^ο:** Υπολογισμός της ελάχιστης τιμής

$$L_{\min} (dB) = -20 \log \left[\frac{1}{l_{k.e.}(u_1)} + \frac{1}{l_{k.e.}(u_2)} + \frac{1}{l_{k.e.}(u_3)} \right]$$

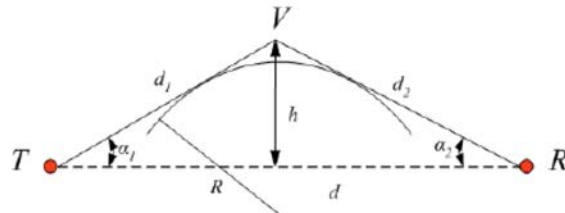
- **Βήμα 4^ο:** Υπολογισμός της μέσης τιμής

$$L_{av.} (dB) = -10 \log \left[\frac{1}{l_{k.e.}^2(u_1)} + \frac{1}{l_{k.e.}^2(u_2)} + \frac{1}{l_{k.e.}^2(u_3)} \right]$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομπής

Περίθλαση από Στρογγυλεμένο Εμπόδιο

63



$$L_{r.o.}(dB) = L_{k.e.}(dB) + T(m, n)(dB)$$

$$L_{k.e.}(dB) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(u-0.1)^2 + 1} + u - 0.1 \right) \quad u = \sqrt{2} \frac{h}{R_1}$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Περίθλαση από Στρογγυλεμένο Εμπόδιο

64

$$T(m, n) = km^b = (8.2 + 12n)m^{0.73 + 0.27[1 - \exp(-1.43n)]}$$

$$m = R \frac{\left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right)}{\left(\frac{\pi R}{\lambda} \right)^{1/3}}$$

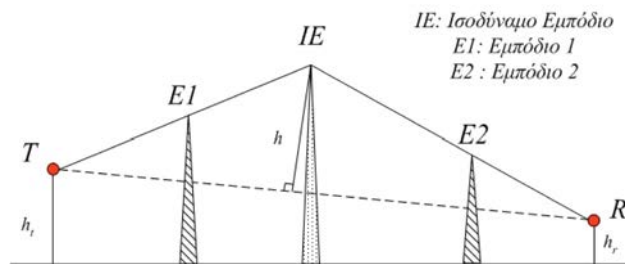
$$n = h \frac{\left(\frac{\pi R}{\lambda} \right)^{2/3}}{R}$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Περίθλαση από Πολλαπλές Ευθείες Ακμές

65

□ Προσέγγιση Bullington



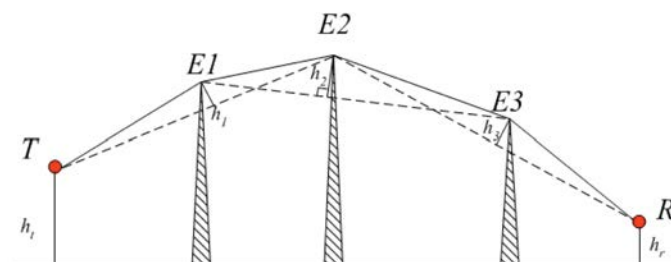
- Αν προσδιοριστεί το ισοδύναμο εμπόδιο, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των απωλειών περίθλασης οι τύποι του μοντέλου περίθλασης από ευθεία ακμή.

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Περίθλαση από Πολλαπλές Ευθείες Ακμές

66

□ Προσέγγιση Epstein-Peterson



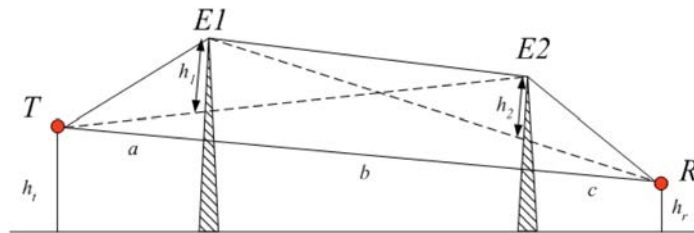
- Στην περίπτωση που τα εμπόδια είναι δύο, έχει αποδειχθεί από τον Millington ότι η προσέγγιση των Epstein-Peterson δεν είναι ικανοποιητική, αν τα δύο εμπόδια βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Περίθλαση από Πολλαπλές Ευθείες Ακμές

67

- Διόρθωση Millington



$$L_c(dB) = 10 \log \left[\frac{(a+b)(b+c)}{b(a+b+c)} \right]$$

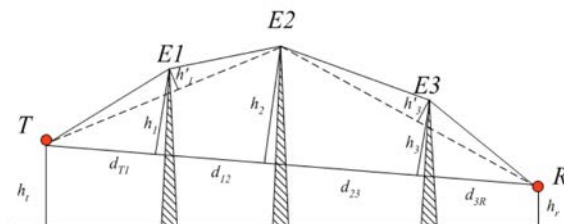
$$L(dB) = L_{k,e1}(dB) + L_{k,e2}(dB) + L_c(dB)$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

Περίθλαση από Πολλαπλές Ευθείες Ακμές

68

- Προσέγγιση του Deygout ή Μέθοδος Κύριας Ακμής



- Βρίσκουμε την ακμή με τη μέγιστη παράμετρο u

$$u_n = h_n \sqrt{\frac{2(d_{n-1,n} + d_{n,n+1})}{\lambda d_{n-1,n} d_{n,n+1}}}$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

Περίθλαση από Πολλαπλές Ευθείες Ακμές

69

- Υπολογίζουμε τις απώλειες περίθλασης λόγω της κύριας ακμής (η E2 στο σχήμα)

$$L_{k.e.2}(d_{T1} + d_{12}, d_{23} + d_{3R}, h_2)$$

- Σε αυτές προσθέτουμε τις απώλειες που προκύπτουν από τις υπόλοιπες ακμές ως εξής

$$L_{k.e.1}(d_{T1}, d_{12}, h'_1) \quad L_{k.e.3}(d_{23}, d_{3R}, h'_3)$$

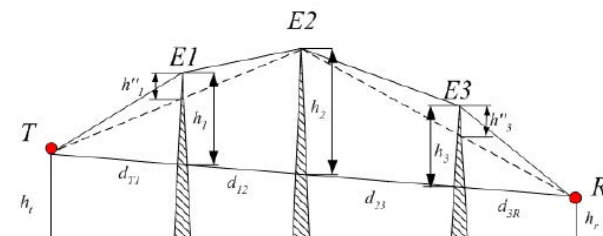
- Δηλαδή για όλες τις ακμές που προηγούνται της κύριας θέτουμε ως πομπό την προηγούμενη ακμή ή τον πομπό αν πρόκειται για την πρώτη ακμή και ως δέκτη την κύρια ακμή.

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

Περίθλαση από Πολλαπλές Ευθείες Ακμές

70

- Για όλες τις ακμές που έπονται της κύριας θεωρούμε ως πομπό πάλι την προηγούμενη ακμή και ως δέκτη τον πραγματικό δέκτη.
- Πολλές φορές χρησιμοποιούμε τα ύψη.



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής