ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μελέτη Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας και Παρεμβολών (EMC/EMI) και Προσομοίωση Περιβάλλοντος Τούνελ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

των

ΠΑΥΛΟΥ Δ. ΓΙΝΑΤΖΗ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΑΣ Δ. ΓΡΥΠΟΝΗΣΙΩΤΗ

ΧΡΙΣΤΙΝΑΣ Π. ΚΟΤΙΝΑ

Επιβλέπων : Φίλιππος Κωνσταντίνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2006

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μελέτη Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας και Παρεμβολών (EMC/EMI) και Προσομοίωση Περιβάλλοντος Τούνελ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

των

ΠΑΥΛΟΥ Δ. ΓΙΝΑΤΖΗ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΑΣ Δ. ΓΡΥΠΟΝΗΣΙΩΤΗ

ΧΡΙΣΤΙΝΑΣ Π. ΚΟΤΙΝΑ

Επιβλέπων : Φίλιππος Κωνσταντίνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 19η Ιουλίου 2006.

.....	.....	.....
Φίλιππος Κωνσταντίνου	Νικόλαος Ουζούνογλου	Μιχαήλ Θεολόγου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2006

…… …… ……

ΠΑΥΛΟΣ Δ. ΓΙΝΑΤΖΗΣ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ Δ. ΓΡΥΠΟΝΗΣΙΩΤΗ

ΧΡΙΣΤΙΝΑ Π. ΚΟΤΙΝΑ

Διπλωματούχοι Ηλεκτρολόγοι Μηχανικοί και Μηχανικοί Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © ΠΑΥΛΟΣ Δ. ΓΙΝΑΤΖΗΣ
Copyright © ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ Δ. ΓΡΥΠΟΝΗΣΙΩΤΗ
Copyright © ΧΡΙΣΤΙΝΑ Π. ΚΟΤΙΝΑ

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η διπλωματική αυτή εργασία έχει στόχο τη μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και των παρεμβολών σε περιβάλλον τούνελ και η προσομοίωση του υπό μελέτη περιβάλλοντος. Κεντρικός άξονας είναι η διερεύνηση των φαινομένων που εμφανίζονται κατά τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε περιβάλλον τούνελ, όπως είναι οι πολλαπλές ανακλάσεις και η πολυδιαδρομική διάδοση, και η συμπεριφορά του μεγέθους της εξασθένησης συναρτήσει της συχνότητας και της απόστασης από την πηγή εκπομπής. Αρχικά παρουσιάζεται η θεωρία της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, το ιστορικό υπόβαθρο υπό το οποίο αναπτύχθηκε καθώς και το νομικό πλαίσιο στο οποίο βασίζεται. Αναφέρονται οι πιθανοί κίνδυνοι παρεμβολών σε ιατρικό εξοπλισμό όπως είναι οι βηματοδότες, αλλά και ο πιθανός κίνδυνος βιολογικών βλαβών του ανθρώπινου οργανισμού. Επίσης αναφέρονται τα πρότυπα που εφαρμόζονται στις εφαρμογές των κινητών επικοινωνιών, όπως το GSM/DCS, το TETRA, το UMTS και το WiMax, που χρησιμοποιούνται στο υπό εξέταση περιβάλλον. Έπειτα, παρουσιάζεται η θεωρία διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε περιβάλλον τούνελ. Περιγράφονται τα χαρακτηριστικά και αναλύονται οι βασικοί μηχανισμοί διάδοσης σε περιβάλλον πολλαπλών ανακλάσεων. Αναφέρονται οι τεχνικές προσέγγισης κυματοδηγού καθώς και αναλυτικές υπολογιστικές τεχνικές προσομοίωσης. Τα τέσσερα βασικά μοντέλα εξασθένησης εξειδικεύονται και εφαρμόζονται στο υπό μελέτη τούνελ. Παρουσιάζεται η προσομοίωση του μοντέλου του τούνελ του μετρό της Αττικής, από το στάδιο της σχεδίασης ως και το τελικό στάδιο της υλοποίησής του. Παρουσιάζονται τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων και αναλύονται τα συμπεράσματα που εξάγονται. Τέλος γίνεται σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα θεωρητικά μοντέλα και εκτιμάται το πλέον κατάλληλο από αυτά που προσεγγίζει το υπό μελέτη τούνελ. Το πειραματικό μέρος της εργασίας υλοποιήθηκε με το πρόγραμμα προσομοίωσης Supernec V2.9 και το υπό μοντελοποίηση έργο ήταν το τούνελ του μετρό της Αττικής.

Λέξεις Κλειδιά: Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα, Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές, προσομοίωση, Supernec, τούνελ, ατρωσία, θωράκιση, διάδοση, συστήματα ασύρματων επικοινωνιών, κυματοδηγός, εξασθένηση, point-matching τεχνική, GSM, DCS, TETRA, UMTS, Wi-MAX

Abstract

The purpose of this master of engineering thesis is the study of the electromagnetic compatibility and electromagnetic interference in tunnels as well as the simulation of the tunnel environment. The main theme is the examination of the phenomena which appear during the propagation of electromagnetic waves in a tunnel environment, like the multiple reflections and the multipath propagation, and the way the attenuation behaves in relation to the frequency and the distance from the power source. At first the theory of electromagnetic compatibility is presented as well as the historical background and the legislation referring to it. The possible hazards of interference in medical equipment, like pacemakers, are mentioned and the possibility of biological damage to human beings is analyzed. Moreover the standards that are used in applications of mobile communications, like GSM/DCS, TETRA, UMTS and WiMax, which are used in the examined tunnel, are mentioned. Furthermore, the theory of propagation of electromagnetic waves in tunnels is presented. The characteristics are described and the basic ways of propagation in an environment of multiple reflections are analyzed. The techniques of the approach of waveguide are mentioned, as well as analytical calculating techniques of simulation. The four basic models of attenuation are being specified and are applied in the examined tunnel. The simulation of the model of tunnel of the metro system of Attica is presented, from its design till its materialization. The presentation of the results through diagrams and the analysis of the conclusions follow. Finally, the experimental results are compared to the theoretical models and the one which approaches best the tunnel of the study, is selected. The experimental part of the thesis was simulated with the simulation software Supernec V2.9 and the simulation model was the tunnel of the metro system of Attica.

Keywords: Electromagnetic Compatibility, Electromagnetic Interference, simulation, Supernec, tunnel, immunity, shielding, propagation, wireless telecommunication systems, waveguide, attenuation, point-matching technique, GSM, DCS, TETRA, UMTS, Wi-MAX

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις θερμότερες ευχαριστίες μας στον καθηγητή κ. Φ. Κωνσταντίνου για τη δυνατότητα που μας έδωσε να εκπονήσουμε την παρούσα διπλωματική εργασία και για την αμέριστη βοήθεια και συμπαράστασή του σε όλες τις φάσεις της συγγραφής της.

Γινατζής Παύλος
Γρυπονησιώτη Αλεξάνδρα
Κοτινά Χριστίνα

Ιούλιος 2006

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή 9

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή στην Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα 11

1.1 Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα.....13
1.2 Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές 14
1.3 Πτυχές της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας.....15
1.4 Προφύλαξη κατά των παρεμβολών 16
1.5 Ιστορία της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.....17
1.6 Παραδείγματα.....18
1.7 Shielding 20
1.8 Υπολογισμός της αποτελεσματικότητας θωράκισης.....25
1.9 Περιβάλλον τούνελ.....43
1.10 Νομικό πλαίσιο για την Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα.....44
1.11 Αλληλεπίδραση βηματοδοτών με ηλεκτρομαγνητικά πεδία 55
1.12 Αλληλεπίδραση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων με την έμβια ύλη61

Κεφάλαιο 2 - Συστήματα Ασύρματων Επικοινωνιών 73

2.1 Global System for Mobile communications 73
2.2 Universal Mobile Telecommunications System 78
2.3 TErrestial Trunked RAdio.....82
2.4 Wimax 89

Κεφάλαιο 3 - Διάδοση σε περιβάλλον τούνελ 93

3.1 Εισαγωγικά 93
3.2 Διάδοση στον ελεύθερο χώρο 94
3.3 Χαρακτηριστικά διάδοσης σε κυματοδηγό.....96
3.4 Χαρακτηριστικά διάδοσης σε περιβάλλον τούνελ 106
3.5 Βασικοί μηχανισμοί διάδοσης σε περιβάλλον τούνελ 116
3.6 Φυσική διάδοση 119
3.7 Εξοπλισμός μετάδοσης 127
3.8 Στατιστική ανάλυση διάδοσης..... 128
3.9 Αριθμητική μέθοδος μοντελοποίησης – Point-matching τεχνική ... 130
3.10 Διαχωρισμός κοντινής – μακρινής περιοχής 139

Κεφάλαιο 4 - Θεωρητική εκτίμηση επιπέδων εξασθένησης..... 143
4.1 ΜΟΝΤΕΛΟ 1 145
4.2 ΜΟΝΤΕΛΟ 2 150
4.3 ΜΟΝΤΕΛΟ 3 152
4.4 ΜΟΝΤΕΛΟ 4 154

Κεφάλαιο 5 - Προσομοίωση του τούνελ με το πρόγραμμα προσομοίωσης Supernec V2.9..... 161
5.1 Εισαγωγικά 161
5.2 Πρότυπο 162
5.3 Σχεδιασμός 167
5.4 Κατασκευή 170
5.5 Επιλογή διαγραμμάτων 183
5.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης..... 184
5.7 Συμπεράσματα..... 217
5.8 Πρόταση 218

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... 219

Εισαγωγή

Σκοπός της εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και των παρεμβολών σε περιβάλλον τούνελ και η προσομοίωση του υπό μελέτη περιβάλλοντος. Κεντρικός άξονας είναι η διερεύνηση των φαινομένων που εμφανίζονται κατά τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε περιβάλλον τούνελ και η συμπεριφορά του μεγέθους της εξασθένησης συναρτήσει της συχνότητας και της απόστασης από την πηγή εκπομπής.

Το πειραματικό μέρος της εργασίας υλοποιήθηκε με το πρόγραμμα προσομοίωσης Supernec V2.9 και το υπό μοντελοποίηση έργο ήταν το τούνελ του μετρό της Αττικής.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίνονται με τα θεωρητικά μοντέλα της εξασθένησης και γίνεται η εκτίμηση για το πλέον κατάλληλο από αυτά που θα προσεγγίζει το υπό μελέτη τούνελ.

Δομή της Εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η θεωρία της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, το ιστορικό υπόβαθρο και το νομικό πλαίσιο που την καλύπτει, ενώ γίνεται αναφορά στους πιθανούς κινδύνους παρεμβολών σε ιατρικό εξοπλισμό όπως είναι οι βηματοδότες, αλλά και ο πιθανός κίνδυνος βιολογικών βλαβών του ανθρώπινου οργανισμού.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πρότυπα που εφαρμόζονται στις εφαρμογές των κινητών επικοινωνιών, το GSM/DCS, το TETRA, το UMTS και το WiMax.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η θεωρία διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε περιβάλλον τούνελ. Περιγράφονται τα χαρακτηριστικά και αναλύονται οι βασικοί μηχανισμοί διάδοσης. Αναφέρονται οι τεχνικές προσέγγισης κυματοδηγού καθώς και αναλυτικές υπολογιστικές τεχνικές προσομοίωσης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα τέσσερα μοντέλα εξασθένησης σε περιβάλλον πολλαπλών ανακλάσεων και εφαρμόζονται στο υπό μελέτη τούνελ.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η προσομοίωση του μοντέλου του τούνελ του μετρό της Αττικής, από το στάδιο της σχεδίασης ως και το τελικό στάδιο της υλοποίησής του. Παρουσιάζονται τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων και αναλύονται τα συμπεράσματα που εξάγονται. Τέλος γίνεται σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα θεωρητικά μοντέλα.

1

Εισαγωγή στην Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα

Στις αρχές του 19ου αιώνα σηματοδοτείται η απαρχή της τηλεπικοινωνιακής επανάστασης με το πείραμα εκπομπής και λήψης ηλεκτρομαγνητικού σήματος που πραγματοποίησε ο Marconi πάνω από τον Ατλαντικό Ωκεανό. Έκτοτε οι τηλεπικοινωνίες βρήκαν έναν ανεξάντλητο αριθμό εφαρμογών. Η πληθώρα εν τούτοις των εφαρμογών αυτών απαιτούσε ολοένα και μεγαλύτερο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, με αποτέλεσμα στις ημέρες μας οι συχνότητες λειτουργίας να εκτείνονται μέχρι αυτές του φωτός.

Σχεδόν όμως παράλληλα με την ανάπτυξη και εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών, οι επιστήμονες παγκοσμίως άρχισαν να παρατηρούν φαινόμενα *ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης* μεταξύ των συσκευών και των συστημάτων. Ως ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση (electromagnetic interference) ορίζεται οποιοδήποτε ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο το οποίο μπορεί να μειώσει την επίδοση μιας συσκευής ή ενός συστήματος. Αρχικά, τέτοια φαινόμενα παρατηρήθηκαν σε συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς επίσης και σε ραδιοφωνικές εκπομπές και λήψεις σημάτων.

Είναι γνωστό ότι ένας σπινθηρισμός προκαλεί την εμφάνιση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, πλούσιων σε φασματικό περιεχόμενο, που μπορούν να προκαλέσουν παρεμβολές ή θόρυβο σε διάφορες ηλεκτρονικές και ηλεκτρικές συσκευές. Πολυάριθμες άλλες πηγές ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών, όπως οι κεραυνοί, οι dc ηλεκτρικοί κινητήρες και οι λαμπτήρες

φθορισμού, επίσης μπορούν να προκαλέσουν τη δημιουργία ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και παρεμβολών σε ηλεκτρικές συσκευές.

Στις ημέρες μας, όπου η χρήση ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών είναι εκτεταμένη, η μελέτη των προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης είναι κρίσιμη για τη σχεδίαση και την απρόσκοπτη λειτουργία τους σε όλο το εύρος των εφαρμογών τους όπως: στα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, στα συστήματα αυτόματου ελέγχου, στα κινητά τηλέφωνα, στις οικιακές συσκευές και στα ιατρικά μηχανήματα.

Το ενδιαφέρον εστιάζεται στην ικανότητα των ηλεκτρομαγνητικών αυτών εκπομπών να παρεμβάλλουν σε ηλεκτρονικές συσκευές. Ο αναγνώστης χωρίς αμφιβολία θα έχει την εμπειρία της εμφάνισης θορύβου σε AM ραδιόφωνα εξαιτίας ηλεκτρικών εκφορτίσεων λόγω κεραυνών. Η ηλεκτρική εκκένωση συγκεντρώνει πλήθος φασματικών παραγόντων, ορισμένοι από τους οποίους περνούν από το φίλτρο εισόδου του ραδιοφώνου προκαλώντας θόρυβο υπερπροστιθέμενο στο επιθυμητό σήμα. Επίσης ακόμη και αν ένας ραδιοφωνικός δέκτης δεν είναι συντονισμένος σε μια συγκεκριμένη συχνότητα, το σήμα εκπομπής είναι πιθανό να παραληφθεί από το δέκτη, προκαλώντας την λήψη ενός μη επιθυμητού σήματος. Τα δυο παραπάνω παραδείγματα παρεμβολής εμφανίζονται στους σκόπιμους δέκτες (*intentional receivers*). Ίσης σημασίας είναι και οι παρεμβολές που προκαλούνται και στους μη σκόπιμους δέκτες (*unintentional receivers*). Για παράδειγμα, μια ισχυρή εκπομπή από ένα FM ραδιοφωνικό σταθμό ή ένα τηλεοπτικό σταθμό είναι δυνατόν να ληφθεί από ένα ψηφιακό υπολογιστή, ο οποίος θα το ερμηνεύσει λανθασμένα σαν ψηφιακά δεδομένα ή σαν σήμα ελέγχου προκαλώντας λανθασμένη λειτουργία. Στον αντίποδα, και ένας ψηφιακός υπολογιστής δύναται να προκαλέσει εκπομπές που συσχετίζονται με το τηλεοπτικό σήμα, προκαλώντας παρεμβολές στον τηλεοπτικό δέκτη.

1.1 Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα

Η Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα είναι ο κλάδος που μελετά τη σκόπιμη παραγωγή, διάδοση και λήψη της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας με αναφορά στα ανεπιθύμητα αποτελέσματα τα οποία μια τέτοια ενέργεια μπορεί να προκαλέσει.

Συγκεκριμένα, ο στόχος του EMC είναι η σωστή λειτουργία, στο ίδιο περιβάλλον, διαφορετικών συστημάτων, στη λειτουργία των οποίων υπεισέρχονται ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα.

Προκειμένου να επιτευχθεί ένας τέτοιος στόχος, το EMC καταπιάνεται με τα εξής ζητήματα:

Θέματα εκπομπής: σχετίζονται με τη μείωση της σκόπιμης παραγωγής της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, δηλαδή με τα μέτρα που μπορούν να ληφθούν για να αποφύγουμε τη διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στο εξωτερικό περιβάλλον.

Διακρίνεται σε *κυματοδηγούμενη*-όταν λαμβάνεται υπόψη η μετάδοση ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών σε δομές κυματοδήγησης (wires, cables, printed circuit board)- και *ακτινοβολούμενη* – όταν λαμβάνεται υπόψη η διάδοση ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών σε ανοιχτό χώρο-.

Θέματα ευαισθησίας: αναφέρονται στη σωστή λειτουργία ηλεκτρικών συσκευών υπό συνθήκες ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.

Ο σχεδιαστής ενός ηλεκτρονικού συστήματος πρέπει να λαμβάνει υπόψη του τη συμβατότητα του συστήματος με το περιβάλλον του. Το σύστημα θα πρέπει να λειτουργεί υπό τις προκαθορισμένες προδιαγραφές χωρίς να παράγει ή να είναι ευαίσθητο σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

Ένα σύστημα είναι ηλεκτρομαγνητικά συμβατό όταν ικανοποιεί τρία κριτήρια:

1. *Δεν προκαλεί ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές σε άλλα συστήματα.*
2. *Δεν είναι ευαίσθητο σε εκπομπές άλλων γειτονικών συστημάτων.*
3. *Δεν προκαλεί παρεμβολές στον εαυτό του.*

Ο κατάλληλος σχεδιασμός ενός ηλεκτρομαγνητικά συμβατού συστήματος δεν αφορά μόνο την ικανοποιητική λειτουργία του αλλά και την εκπλήρωση του νομικών απαιτήσεων που όλες σχεδόν οι χώρες του κόσμου προβάλλουν πριν το σύστημα αποκτήσει την άδεια να κυκλοφορήσει στην ελεύθερη αγορά. Η αυταπόδεικτη συμβατότητα με βάση τη νομοθεσία για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα είναι ανεπαρκής ιδίως όταν έχουμε να ασχοληθούμε με μηχανήματα που αφορούν ασφάλεια, καθώς τότε απαιτείται μια πιο ασφαλής προσέγγιση σε όλα τα πιθανά θέματα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε λάθος κατά τη λειτουργία του μηχανήματος ή ακόμα και σε καταστροφή του.

1.2 Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές

Η λειτουργία ενός συστήματος μπορεί να επηρεαστεί κατά τη μετάδοση σημάτων με τρεις τρόπους:

1. Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI)
2. Παρεμβολές γραμμών ισχύος
3. Ηλεκτροστατική εκφόρτιση (ESD)

Ο παράγοντας εν τούτοις που πρωτίστως μας ενδιαφέρει είναι οι Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, λόγω της επιταχυνόμενης αύξησης των πιθανών ασύρματων συσκευών που μπορούν να υφίστανται παρεμβολές.

Προσπαθώντας να ορίσουμε το μέγεθος EMI θα λέγαμε πως αναφέρεται σε οποιαδήποτε ηλεκτρομαγνητική ενόχληση, φαινόμενο, σήμα ή εκπομπή που προκαλεί ή μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητη απόκριση στον ηλεκτρικό ή ηλεκτρονικό εξοπλισμό.

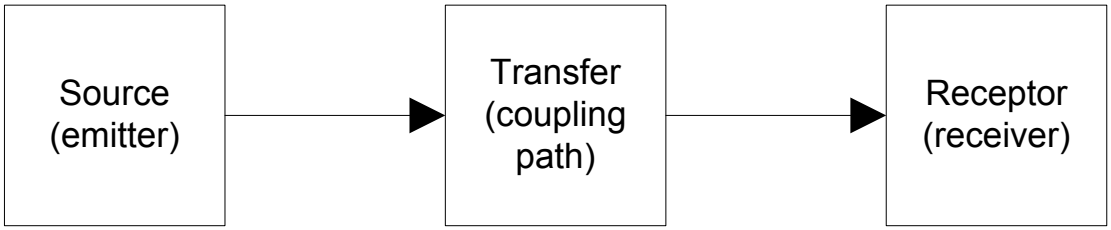
Ο βαθύτερος λόγος για τα περισσότερα προβλήματα παρεμβολών που αντιμετωπίζουμε σήμερα είναι μια ανεπιθύμητη επίπτωση της εμπλοκής της φυσικής στη μετάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας.

Η Ηλεκτρομαγνητική ενέργεια είναι η μόνη μορφή ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για τη μετάδοση «έξυπνων» σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις στον ελεύθερο χώρο υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Αυτό το χαρακτηριστικό ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας αναφέρεται σαν ηλεκτρομαγνητική διάδοση.

Παρόλα αυτά, αν και οι περισσότερες μεταδόσεις επιτυγχάνονται υπό ελεγχόμενες συνθήκες, είναι αυτή η μεταδιδόμενη ενέργεια που μπορεί να δημιουργήσει ένα φαινόμενο παραγωγής παρεμβολών, φαινόμενο που μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργία πολλών ηλεκτρονικών συσκευών.

1.3 Πτυχές της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα αφορά την *παραγωγή*, την *εκπομπή* και τη *λήψη* ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Αυτές οι τρεις πτυχές του EMC προβλήματος συνθέτουν το βασικό σκελετό κάθε EMC σχεδιασμού. Αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Για να υφίσταται ακτινοβολούμενη παρεμβολή πρέπει:

- Να υπάρχει μια *πηγή* ακτινοβολίας. Μια πηγή παρεμβολών ονομάζεται πομπός (source) ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Ο πομπός μπορεί να μεταδώσει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια είτε εκούσια, όπως ένα walkie-talkie, είτε ακούσια, όπως ένα PC.

- Να υπάρχει ένας δέκτης (τον αναφέρουμε συνήθως ως θύμα) που είναι ευαίσθητος στην εκπεμπόμενη ακτινοβολία. Αν ο ευαίσθητος δέκτης δεν έχει αρκετή ατρωσία στο να απορρίψει την ενέργεια στην οποία εκτίθεται μπορεί να εμφανιστεί η ΕΜΙ.
- Να υπάρχει μια φυσική σχέση ανάμεσα στα δύο, τέτοια ώστε να μοιράζονται ένα κοινό μεταδιδόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Να υφίσταται δηλαδή αυτό που ονομάζουμε *διαδρομή σύζευξης* (coupling path) ούτως ώστε να μεταφέρεται εκπεμπόμενη ενέργεια στο *δέκτη*, όπου υπόκειται σε επεξεργασία με αποτέλεσμα την επιθυμητή ή όχι συμπεριφορά

Παρεμβολή, κατά συνέπεια, εμφανίζεται αν η λαμβανόμενη ενέργεια προκαλεί το δέκτη να λειτουργήσει με μη επιθυμητό τρόπο. Μεταφορά ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας συμβαίνει συχνά σε μη σκόπιμες διαδρομές σύζευξης. Παρόλα αυτά, η μη σκόπιμη μεταφορά ενέργειας προκαλεί παρεμβολές μόνο στην περίπτωση που το λαμβανόμενο σήμα έχει επαρκές πλάτος και/ή φασματικό περιεχόμενο στην είσοδο του δέκτη ώστε να μην επιτρέψει στο σύστημα να λειτουργήσει φυσιολογικά. Η μη σκόπιμη εκπομπή ή λήψη ενέργειας δεν είναι απαραίτητα καταστροφική. Μόνο η μη επιθυμητή λειτουργία του δέκτη συνιστά παρεμβολή. Οπότε η επεξεργασία των λαμβανόμενων σημάτων στο δέκτη παίζει σπουδαίο ρόλο στο θέμα της εμφάνισης παρεμβολών ή όχι. Δεν είναι απαραίτητο ότι ένα εκπεμπόμενο σήμα που προκαλεί παρεμβολές σε ένα σύστημα, θα προκαλέσει παρεμβολές και σε οποιοδήποτε άλλο.

1.4 Προφύλαξη κατά των παρεμβολών

Υπάρχουν τρεις τρόποι προφύλαξης κατά των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών:

1. *Καταπίεση του εκπεμπόμενου σήματος στην πηγή*
2. *Μετατροπή της διαδρομής σύζευξης σε όσο 'ανεπαρκή' γίνεται*
3. *Μετατροπή του δέκτη σε λιγότερο ευαίσθητο ως προς τη λήψη των παρεμβαλλόμενων εκπομπών*

Η πρώτη "γραμμή άμυνας" είναι η καταπίεση των εκπομπών των μη σκόπιμων πηγών. Έχει αποδειχθεί ότι οι χρόνοι ανόδου/καθόδου των παλμών μιας ψηφιακής συσκευής είναι ο πρωταρχικός παράγοντας για τη δημιουργία σημάτων παρεμβολής υψηλών συχνοτήτων. Με τη μείωση αυτών των χρόνων είναι δυνατή η μείωση των παρεμβολών που προκαλούν τα ψηφιακά συστήματα. Αλλά αυτή η μείωση δεν μπορεί να είναι μεγάλη και περιορίζεται από τις προδιαγραφές επιθυμητής λειτουργίας κάθε συστήματος. Άλλος τρόπος μείωσης της ικανότητας της διαδρομής σύζευξης είναι η τοποθέτηση του δέκτη σε μεταλλικό περίβλημα (shield). Παρόλα αυτά, η διαδικασία προστασίας, που ονομάζεται shielding, είναι δαπανηρή και η πραγματική της απόδοση σε μια εγκατάσταση απέχει από το να χαρακτηριστεί ιδανική. Η μείωση της ευαισθησίας του δέκτη ως προς τη λήψη των μη επιθυμητών σημάτων είναι πολύ δύσκολο να πραγματοποιηθεί με την παράλληλη διατήρηση της επιθυμητής λειτουργίας του συστήματος. Ένα παράδειγμα μείωσης του παρεμβαλλόμενου θορύβου σε ένα σύστημα είναι η χρήση κωδικοποίησης με δυνατότητα διόρθωσης λαθών στο δέκτη. Παρόλο που τα μη επιθυμητά σήματα θα λαμβάνονταν κανονικά από το δέκτη, η χρήση της κωδικοποίησης θα επέτρεπε στο δέκτη να λειτουργήσει ικανοποιητικά. Ο σχεδιαστής ενός ηλεκτρομαγνητικά συμβατού συστήματος θα πρέπει να λάβει σοβαρά υπόψη του το κόστος υλοποίησης της προστασίας. Μια λύση θα ήταν να τοποθετηθούν μεταλλικά περιβλήματα σε κάθε ηλεκτρονική συσκευή και να χρησιμοποιηθούν εσωτερικές μπαταρίες για την τροφοδότησή τους, αλλά η εμφάνιση, η χρησιμότητα και το κόστος του συστήματος δε θα ήταν αποδεκτά από το χρήστη του.

1.5 Ιστορία της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας

Μπορεί να ειπωθεί ότι το πρόβλημα των παρεμβολών άρχισε να υφίσταται από τον πρώτο σπινθηρισμό στο πείραμα του Marconi στο τέλος του 19^{ου} αιώνα. Το 1901, ο Marconi δημιούργησε την πρώτη υπερατλαντική ζεύξη χρησιμοποιώντας ένα πλαίσιο από σύρματα χαλκού. Οι μόνοι δέκτες ουσιαστικής σημασίας τότε ήταν οι ραδιοφωνικοί δέκτες. Ήταν λίγοι και ευρέως διασκορπισμένοι, οπότε το πρόβλημα των παρεμβολών ήταν εύκολο να λυθεί. Τα πρώτα τεχνικά έγγραφα σχετικά με τις ραδιοπαρεμβολές εμφανίστηκαν το 1920. Οι κακοσχεδιασμένες αντένες και

δέκτες εκείνης της εποχής ήταν ευαίσθητες σε παρεμβολές. Η βελτίωση στη σχεδίαση των συστημάτων πομπών/δεκτών έλυσε το πρόβλημα.

Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκόσμιου Πολέμου, η χρήση ηλεκτρονικών συσκευών, κυρίως ραδιοπομπών, συσκευών πλοήγησης και radar, αυξήθηκε με αποτέλεσμα την αύξηση των εμφανιζόμενων παρεμβολών. Η χρήση της τεχνικής επανατοποθέτησης συχνότητας σε ένα όχι ευρέως χρησιμοποιούμενο φάσμα συχνοτήτων διόρθωσε σημαντικά τα προβλήματα που προκλήθηκαν. Η μεγάλη αύξηση των προβλημάτων παρεμβολών εμφανίστηκε στη δεκαετία του '50 με την εφεύρεση των υψηλής πυκνότητας ηλεκτρονικών παραγόντων όπως το διπολικό τρανζίστορ, τα ολοκληρωμένα κυκλώματα και τα chip μικροεπεξεργαστών στη δεκαετία του '70. Επίσης οι αυξανόμενες ανάγκες για υπηρεσίες φωνής και δεδομένων κατέστησε περισσότερο 'συνωστισμένο' το φάσμα συχνοτήτων. Οι προσπάθειες για εξεύρεση λύσης εναπόκεινται στον προσεκτικό σχεδιασμό, που λαμβάνει υπόψη του τη χρησιμοποίηση του φάσματος, και συνεχίζονται μέχρι σήμερα.

1.6 Παραδείγματα

Υπάρχουν αρκετά παραδείγματα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, από τα πιο συνηθισμένα ως τα πιο καταστροφικά, που τονίζουν τη σημασία που πρέπει να δίνεται στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα των συστημάτων που χρησιμοποιούνται.

Πιθανόν το πιο συνηθισμένο παράδειγμα είναι η εμφάνιση οριζόντιων γραμμών στον τηλεοπτικό δέκτη όταν μια ηλεκτρική σκούπα ή κάποια άλλη συσκευή με dc κινητήρα βρίσκεται σε λειτουργία στο κοντινό περιβάλλον της τηλεόρασης. Η αιτία που το προκαλεί είναι οι σπινθηρισμοί που προκαλούνται στο μοτέρ κατά τη λειτουργία του κινητήρα. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που δημιουργούνται είναι πλούσια σε φασματικό περιεχόμενο και λαμβάνονται από τον δέκτη της τηλεόρασης μέσω του καλωδίου τροφοδοσίας της συσκευής που λειτουργεί σαν μια πολύ ικανή αντένα.

Σε ένα άλλο παράδειγμα, ένας κατασκευαστής εξοπλισμού γραφείου τοποθέτησε ένα φωτοτυπικό μηχάνημα στο διάδρομο ενός ορόφου των γραφείων της εταιρίας του. Οποτεδήποτε κάποιος έβγαζε μια φωτοτυπία, το ρολόι του τοίχου μηδενιζόταν. Το πρόβλημα αποδείχτηκε ότι ήταν οι ανορθωτές πυριτίου του κυκλώματος τροφοδοσίας του φωτοτυπικού. Αυτές οι συσκευές ανοιγόκλειναν για να μετατρέψουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές, παράγοντας σήματα που περνούσαν στο δίκτυο τροφοδοσίας του κτιρίου και μηδένιζαν τα ρολόγια που συγχρονίζονταν από τη συχνότητα του δικτύου.

Κάποια τρέιλερ φορτηγών είχαν εγκατεστημένα ηλεκτρικά φρένα. Χρησιμοποιώντας ένα CB πομπό σε ένα αυτοκινητόδρομο, κάποιος προκαλούσε το κλείδωμα των ηλεκτρικών φρένων. Το πρόβλημα λύθηκε καλύπτοντας με μεταλλικό περίβλημα το κύκλωμα των φρένων.

Το 1982, το Ηνωμένο Βασίλειο έχασε ένα καταδρομικό, το HMS Sheffield, από ένα πύραυλο Exocet σε μια αναμέτρηση με τις δυνάμεις της Αργεντινής στον πόλεμο των Falklands. Το σύστημα επικοινωνιών του πλοίου δε λειτουργούσε σωστά όταν ήταν ενεργοποιημένο το σύστημα έγκαιρης ειδοποίησης πυραύλων. Προκειμένου να επικοινωνήσουν με τους επιτελείς του στόλου, το πλήρωμα του καταδρομικού έκλεισε το εν λόγω σύστημα και δέχτηκε τον αντίπαλο πύραυλο.

Το ελικόπτερο του Αμερικάνικου Στρατού UH-60 Black Hawk ήταν ευαίσθητο εκ σχεδιασμού σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές από radar sites ή ακόμη και από CB πομπούς. 22 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους σε ατυχήματα σχετιζόμενα με παρεμβολές.

Τέλος, το 1967 το Αμερικανικό αεροπλανοφόρο Forrestal είχε αναπτυχθεί στη θάλασσα του Βόρειου Βιετνάμ. Η παραγωγή σημάτων RF συχνοτήτων στις ενώσεις του radar υψηλής ισχύος του πλοίου προκάλεσε την ενεργοποίηση των βομβών των βομβαρδιστικών που ήταν πάνω στο πλοίο οδηγώντας στο θάνατο 134 ναύτες.

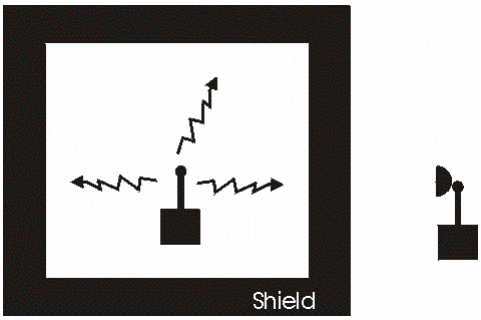
Έχουν ακουστεί πολλά παραδείγματα βενζινάδικων που ανατινάχθηκαν εξαιτίας των παρεμβολών που δημιούργησαν κινητά τηλέφωνα στην αντλία καυσίμων, που σε συνδυασμό με τα παραπάνω παραδείγματα υπογραμμίζουν τη σπουδαιότητα που παρουσιάζει η μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας σε όλα τα συστήματα που χρησιμοποιεί ο άνθρωπος.

1.7 Shielding

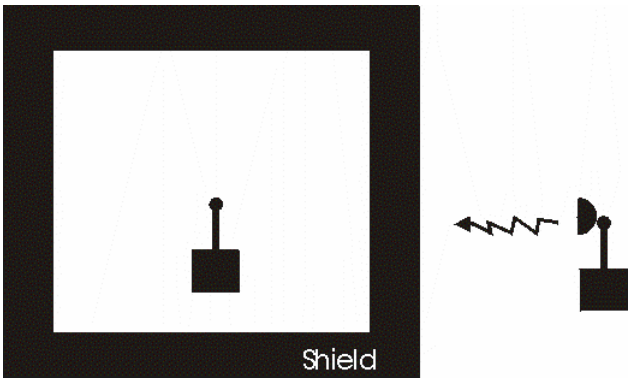
Η έννοια της θωράκισης που θα μελετηθεί εν συνεχεία αποτελεί σημαντικό τμήμα της ανάλυσης της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας καθώς είναι χρήσιμη για τη μελέτη τόσο της διείσδυσης (penetration) της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο εσωτερικό μεταλλικών οχημάτων (αυτοκινήτων, τρένων κινούμενα σε περιβάλλον τούνελ) όσο και της ατρωσίας του βιομηχανικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού των οχημάτων (ηλεκτρικά φρένα, αισθητήρες κίνησης, συστήματα επικοινωνιών) και του ιατρικού εξοπλισμού των επιβατών αυτών (βηματοδότες, ακουστικά βαρηκοΐας).

Ο όρος *θωράκιση* (*shielding* βλ.[16]) συνήθως αναφέρεται σε ένα μεταλλικό περίβλημα που καλύπτει ολοκληρωτικά μια ηλεκτρονική συσκευή ή ένα τμήμα της. Η χρήση της θωράκισης καλύπτει δυο στόχους.

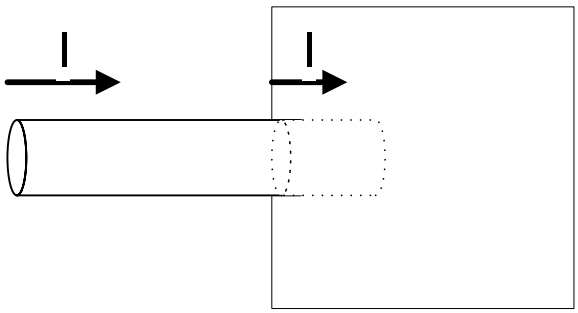
Ο πρώτος είναι να εμποδίσει τις εκπομπές ενός μέρους ή όλου του συστήματος εκτός των ορίων του. Το κίνητρο εδώ είναι οι εκπομπές του συστήματος να μην ξεπερνούν τα θεσπισμένα όρια και να μην προκαλούνται παρεμβολές σε γειτονικά συστήματα.



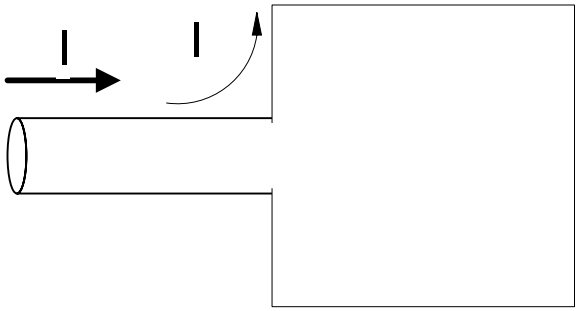
Ο δεύτερος στόχος της θωράκισης είναι να εμποδίσει εξωτερικές εκπομπές από γειτονικά συστήματα να παρεμβάλλουν στα ηλεκτρονικά του υπό εξέταση συστήματος, μειώνοντας την ευαισθησία σε εξωτερικά μη επιθυμητά σήματα.



Η θωράκιση είναι ουσιαστικά το "σύνορο" στη μετάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ως *αποτελεσματικότητα θωράκισης* ορίζεται ο λόγος του πλάτους του ηλεκτρικού (μαγνητικού) πεδίου που προσπίπτει στο σύνορο προς το πλάτος του ηλεκτρικού (μαγνητικού) πεδίου που μεταδίδεται δια μέσου του συνόρου. Παρακάτω θα υπολογίσουμε ιδανικές τιμές της αποτελεσματικότητας θωράκισης, της τάξης των εκατοντάδων dB. Αποτελεσματικότητα 100dB σημαίνει ότι το προσπίπτον πεδίο μειώνεται με ένα παράγοντα 100000 καθώς εισέρχεται / εξέρχεται από το πλαίσιο θωράκισης. Για να υλοποιηθούν τόσο μεγάλες τιμές αποτελεσματικότητας θωράκισης, πρέπει το πλαίσιο θωράκισης να περικλείει ολοκληρωτικά τα ηλεκτρονικά του συστήματος και να μην υπάρχουν καθόλου πιθανά σημεία διείσδυσης όπως τρύπες, καλώδια ή σχισμές. Κάθε σημείο διείσδυσης, αν δεν φροντιστεί κατάλληλα, μπορεί να μειώσει θεαματικά την αποτελεσματικότητα θωράκισης. Φυσικά, το μεταλλικό περίβλημα που αποτελεί το πλαίσιο θωράκισης πρέπει να είναι κατάλληλα σχεδιασμένο και γειωμένο για να μην λειτουργεί σαν αντένα. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ένα μεταλλικό κουτί με ένα καλώδιο να το διαπερνά, όπως αυτό του παρακάτω σχήματος.



Ας υποθέσουμε επίσης ότι μια γειτονική ακτινοβολούσα πηγή εκπέμπει ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Αυτό το πεδίο θα συζευχτεί με το καλώδιο, δημιουργώντας ρεύμα I στην επιφάνειά του. Αυτό το ρεύμα θα διεισδύσει στο εσωτερικό του μεταλλικού κουτιού ανεμπόδιστα και μπορεί να συζευχτεί με τα ηλεκτρονικά του εσωτερικού χώρου. Το αντίστροφο είναι επίσης πιθανό. Ο θόρυβος που δημιουργείται στο εσωτερικό του μεταλλικού κουτιού μπορεί να συζευχτεί με το καλώδιο, να δημιουργηθεί ρεύμα που θα ρέει στο εξωτερικό μέρος του καλωδίου και το καλώδιο να λειτουργήσει ως κεραία που ακτινοβολεί. Αυτός ο τύπος διείσδυσης μπορεί να μειώσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα θωράκισης. Οι εισαγωγές καλωδίων τέτοιου τύπου πρέπει να αντιμετωπίζονται κατάλληλα για να διατηρηθεί η αποτελεσματικότητα στα επιθυμητά επίπεδα. Μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για να παρέχει φιλτράρισμα του καλωδίου στο σημείο εισόδου / εξόδου είναι η χρήση θωρακισμένων καλωδίων, των οποίων η εξωτερική θωράκιση είναι περιφερειακά συνδεδεμένη στη θωράκιση του μεταλλικού κουτιού (βλ. σχήμα)

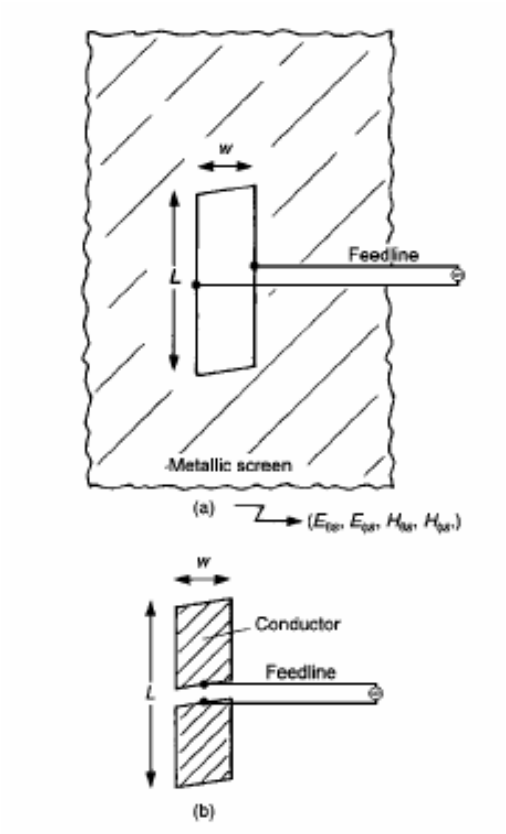


Παρατηρούμε ότι το καλώδιο έχει ρεύματα επαγόμενα σε αυτό από το εξωτερικό πεδίο. Αν απλά ενώσουμε το θωρακισμένο καλώδιο με το μεταλλικό κουτί με τη χρήση ενός απλού καλωδίου, είναι πιθανό τα

επαγόμενα στο εξωτερικό περίβλημα ρεύματα να περάσουν στο εσωτερικό καλώδιο και να ακτινοβοληθούν τα εσωτερικά ηλεκτρονικά του μεταλλικού κουτιού, μειώνοντας έτσι την αποτελεσματικότητα της θωράκισης.

Αντίστροφα, στην περίπτωση που τα δυο θωρακισμένα περιβλήματα δεν είναι περιφερειακά ενωμένα, ο θόρυβος και τα επαγόμενα ρεύματα είναι δυνατό να περάσουν στο εξωτερικό περίβλημα του καλωδίου, το οποίο θα λειτουργήσει σαν ακτινοβολούσα αντένα. Για να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα θωράκισης ενός καλωδίου και να μειωθούν τα ακτινοβολούμενα πεδία που προκαλούνται από τα επαγόμενα στο περίβλημα ρεύματα, πρέπει το περίβλημα της θωράκισης να είναι συνδεδεμένο με ένα σημείο μηδενικού δυναμικού, δηλαδή να είναι ιδανικά γειωμένο. Αν το μήκος του καλωδίου είναι της τάξεως του $\lambda_0/4$, το περίβλημα θωράκισης μετατρέπεται σε ένα αποτελεσματικότατο πομπό. Τα περιφερειακά καλώδια, όπως για παράδειγμα τα καλώδια του εκτυπωτή ενός προσωπικού υπολογιστή, έχουν συνήθως μήκος 1.5m, το οποίο αποτελεί το ¼ του μήκους κύματος για τη συχνότητα των 50MHz. Για τον παραπάνω λόγο είναι σύνηθες φαινόμενο η εμφάνιση συντονισμών σε εκπομπές προϊόντων με εκπομπές των συγκεκριμένων καλωδίων στη ζώνη συχνοτήτων 50-100MHz. Η αποσύνδεση αυτών των καλωδίων από τις συσκευές μειώνει τους συντονισμούς και τις εκπομπές που προκαλούνται από αυτά.

Ένας άλλος κοινός τύπος διείσδυσης είναι η ύπαρξη οπών και σχισμών στα τοιχώματα του περιβλήματος θωράκισης. Τα πεδία που δημιουργούνται είτε στο εσωτερικό είτε στο εξωτερικό της θωράκισης ακτινοβολούν διαμέσου των οπών αυτών, μειώνοντας έτσι την αποτελεσματικότητα θωράκισης. Αυτό οφείλεται εν μέρει σε ένα σημαντικό θεώρημα, την *αρχή του Babinet* (βλ.[16]). Για να επεξηγήσουμε αυτή την αρχή θεωρούμε μια σχισμή σε μια τέλεια αγώγιμη πλάκα, όπως στο παρακάτω σχήμα.



Μια γραμμή μεταφοράς συνδέει τα δυο άκρα της σχισμής και τα διεγείρει. Τα μακρινά πεδία που ακτινοβολούν σε αυτή την "αντένα σχισμής" σημειώνονται ως $E_{\theta s}$, $E_{\varphi s}$, $H_{\theta s}$ και $H_{\varphi s}$. Τώρα ας θεωρήσουμε τη συμπληρωματική διάταξη, στην οποία αντικαθιστούμε την πλάκα με ελεύθερο χώρο και τη σχισμή με έναν ιδανικό αγωγό ίδιου σχήματος. Η αντένα τροφοδοτείται από την ίδια γραμμή μεταφοράς που ενώνει τα δυο άκρα. Τα μακρινά πεδία που ακτινοβολούν στην νέα αυτή διάταξη σημειώνονται ως $E_{\theta c}$, $E_{\varphi c}$, $H_{\theta c}$ και $H_{\varphi c}$. Η αρχή του Babinet δηλώνει ότι τα μακρινά πεδία που ακτινοβολούν στην αρχική πλάκα με τη σχισμή και αυτά που ακτινοβολούν στην περίπτωση της συμπληρωματικής διάταξης συνδέονται με τις σχέσεις:

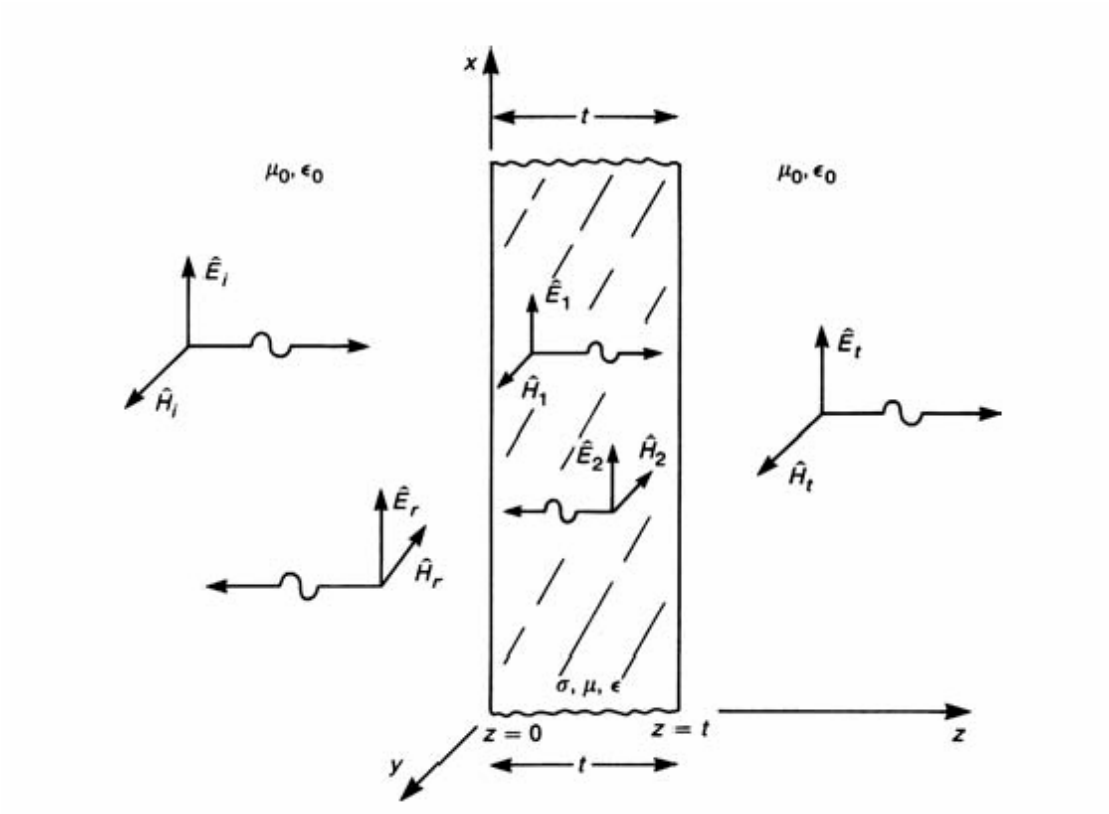
$$E_{\theta s} = H_{\theta c}$$
$$E_{\phi s} = H_{\phi c}$$
$$H_{\theta s} = -\frac{E_{\theta s}}{n_0^2}$$
$$H_{\phi s} = -\frac{E_{\phi c}}{n_0^2}$$

Αυτό υποδηλώνει ότι σχισμές και οπές σε μεταλλικά τοιχώματα είναι το ίδιο αποτελεσματικοί ακτινοβολητές με κεραίες που έχουν τις διαστάσεις των οπών και των σχισμών.

Πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα ότι η χρήση θωράκισης δεν μπορεί να εξαλείψει εξ ολοκλήρου τις ακτινοβολούμενες εκπομπές ενός συστήματος. Επίσης υπάρχουν παραδείγματα ηλεκτρονικών συσκευών που δεν χρησιμοποιούν θωράκιση προστασίας αλλά είναι συμβατές με βάση τους κανόνες ασφαλείας. Οι ηλεκτρονικές γραφομηχανές χρησιμοποιούν πλαστικό περίβλημα παρόλο που έχουν συχνότητα ρολογιού 10MHz και πάνω. Άλλα συστήματα, όπως προσωπικοί υπολογιστές ή mainframes, καλύπτονται από μεταλλικά περιβλήματα. Αποτελεσματική φροντίδα των σημείων διείσδυσης παρέχει αποτελεσματική προστασία των συσκευών αυτών.

1.8 Υπολογισμός της αποτελεσματικότητας θωράκισης

Για τον υπολογισμό της αποτελεσματικότητας θωράκισης, θα θεωρήσουμε το γενικό πρόβλημα του μεταλλικού συνόρου πάχους t, αγωγιμότητας σ, σχετικής επιτρεπτότητας ε_r και σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας μ_r όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



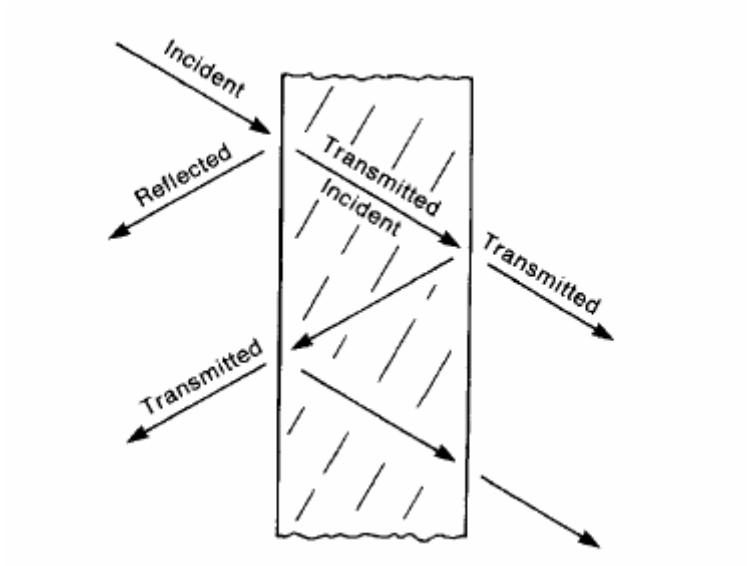
Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει στο σύνορο. Ένα τμήμα του κύματος ανακλάται στην διαχωριστική επιφάνεια και ένα άλλο τμήμα μεταδίδεται διαμέσου του μεταλλικού συνόρου. Η αποτελεσματικότητα θωράκισης του συνόρου, όπως ορίστηκε παραπάνω, δίνεται για το ηλεκτρικό πεδίο από τον ακόλουθο τύπο (σε dB):

$$SE = 20\log_{10}\left|\frac{E_i}{E_t}\right|$$

Όπου E_i το προσπίπτον στην ασπίδα ηλεκτρικό πεδίο και E_t το διαδιδόμενο διαμέσου της ασπίδας ηλεκτρικό πεδίο. Το παραπάνω μέγεθος είναι πάντα θετικό αφού το πεδίο που προσπίπτει στην ασπίδα αναμένεται να είναι μεγαλύτερο από το πεδίο που εξάγεται από αυτήν. Με χρήση των αντίστοιχων μαγνητικών πεδίων:

$$SE = 20\log_{10}\left|\frac{H_i}{H_t}\right|$$

Αν το προσπίπτον κύμα είναι ένα ομοιόμορφο επίπεδο κύμα και το μέσο διάδοσης στις δύο πλευρές του συνόρου είναι το ίδιο, τότε οι δυο παραπάνω ορισμοί ταυτίζονται, αφού το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο σχετίζονται μεταξύ τους μέσω της αντίστασης του μέσου. Στην περίπτωση που εξετάζεται το κοντινό πεδίο ή στην περίπτωση που το μέσο διάδοσης είναι διαφορετικό σε κάθε πλευρά του συνόρου, δεν υπάρχει ισότητα ορισμών. Παρόλα αυτά, ο ορισμός της αποτελεσματικότητας θωράκισης σε όρους ηλεκτρικού πεδίου συνήθως λαμβάνεται ως πρότυπο σε κάθε περίπτωση.



Η μείωση που εισάγεται στο πεδίο οφείλεται σε τρεις παράγοντες. Ο πρώτος παράγοντας ονομάζεται *απώλεια ανάκλασης*. Αναφέρεται στην απώλεια που εισάγεται στο πεδίο εξαιτίας της ανάκλασης του προσπίπτοντος κύματος στο εξωτερικό μέτωπο του συνόρου. Το ποσοστό του κύματος που ανακλάται στην επιφάνεια δίνεται από το συντελεστή ανάκλασης της επιφάνειας αυτής. Το ποσοστό του κύματος που μεταδίδεται και διαπερνά το σύνορο εξασθενεί σύμφωνα με τον παράγοντα e^{-az}, όπου a η σταθερά εξασθένησης του υλικού από το οποίο είναι φτιαγμένο το σύνορο. Αυτή η εξασθένηση αποτελεί το δεύτερο παράγοντα και ονομάζεται *απώλεια απορρόφησης*. Εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το βάθος διείσδυσης του υλικού. Συγκεκριμένα για υλικά που αποτελούν καλούς αγωγούς ισχύει η σχέση $a=1/\delta$. Για αυτό το λόγο το πλάτος των κυμάτων μειώνεται με βάση τον παράγοντα $e^{-z/\delta}$. Αν το πάχος του συνόρου είναι πολύ μεγαλύτερο από το βάθος διείσδυσης του υλικού στη συχνότητα

του προσπίπτοντος κύματος, τότε το κύμα που προσπίπτει στο εσωτερικό μέτωπο του συνόρου μειώνεται σε μεγάλο βαθμό. Ένα μέρος αυτού του νέου προσπίπτοντος κύματος ανακλάται στο εσωτερικό μέτωπο του συνόρου ενώ ένα άλλο μέρος μεταδίδεται στην άλλη πλευρά του συνόρου. Το ανακλώμενο κύμα προσπίπτει εκ νέου στο εξωτερικό μέτωπο του συνόρου και ανακλάται ξανά, δημιουργώντας μια αλυσίδα ανακλώμενων κυμάτων τα οποία παρουσιάζονται εξασθενημένα λόγω της διάδοσής τους στο εσωτερικό του συνόρου. Αυτό το φαινόμενο αποτελεί τον τρίτο παράγοντα που ονομάζεται *απώλεια πολλαπλών ανακλάσεων*.

Συνοπτικά έχουμε:

$$SE = R_{dB} + A_{dB} + M_{dB}$$

Όπου R_{dB} η απώλεια ανάκλασης, A_{dB} η απώλεια απορρόφησης και M_{dB} η απώλεια πολλαπλών ανακλάσεων. Καθώς οι πολλαπλές ανακλάσεις δημιουργούν νέα πεδία τα οποία μπορούν να συνεισφέρουν αθροιστικά στο υπάρχον, ο όρος των πολλαπλών ανακλάσεων είναι αρνητικός και γενικά μειώνει την αποτελεσματικότητα της ασπίδας, ενώ οι δυο άλλοι όροι είναι πάντα θετικοί. Στην περίπτωση που το πάχος του συνόρου είναι πολύ μεγαλύτερο του βάθους διείσδυσης του υλικού, ο όρος των πολλαπλών ανακλάσεων μπορεί να παραλειφθεί στον υπολογισμό της αποτελεσματικότητας θωράκισης.

<u>Πηγές μακρινού πεδίου</u>

Σε αυτή την περίπτωση θα θεωρήσουμε ότι η πηγή του προσπίπτοντος κύματος βρίσκεται αρκετά μακριά από το σύνορο της θωράκισης και ότι το προσπίπτον κύμα είναι ένα ομοιόμορφο επίπεδο κύμα.

<u>Ακριβής υπολογισμός της αποτελεσματικότητας θωράκισης</u>

Θεωρούμε σύνορο θωράκισης πάχους t, αγωγιμότητας σ, επιτρεπτότητας ε και μαγνητικής διαπερατότητας μ και προσπίπτον ομοιόμορφο επίπεδο κύμα. Για πρακτικούς λόγους θεωρούμε ότι το μέσο διάδοσης στις δύο πλευρές του συνόρου θωράκισης είναι ο ελεύθερος χώρος. Θα χρησιμοποιήσουμε το τρισορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων με το

επίπεδο *xy* να είναι κάθετο στην κατεύθυνση διάδοσης *z* και παράλληλο στο σύνορο. Το εξωτερικό μέτωπο του συνόρου βρίσκεται στη θέση *z=0* και το εσωτερικό μέτωπο στη θέση *z=t*. Στην περιοχή αριστερά του συνόρου έχουμε δυο κύματα, το προσπίπτον και το ανακλώμενο στο εξωτερικό μέτωπο. Στο εσωτερικό του συνόρου έχουμε επίσης δυο είδη κυμάτων, αυτά που ταξιδεύουν προς τα θετικά z και αυτά που ταξιδεύουν προς τα αρνητικά z που αντιπροσωπεύουν τα ανακλώμενα στο εσωτερικό μέτωπο κύματα. Στην περιοχή δεξιά του συνόρου έχουμε μόνο κύματα που ταξιδεύουν προς τα θετικά z διότι δεν υπάρχει ανακλώμενη επιφάνεια στο άπειρο. Οι γενικές μορφές των κυμάτων είναι:

$$\vec{E}_i = E_i e^{-i\beta_0 z}\vec{a}_x$$
$$\vec{H}_i = \frac{E_i}{n_0} e^{-i\beta_0 z}\vec{a}_y$$
$$\vec{E}_r = E_r e^{i\beta_0 z}\vec{a}_x$$
$$\vec{H}_r = -\frac{E_r}{n_0} e^{i\beta_0 z}\vec{a}_y$$
$$\vec{E}_1 = E_1 e^{-\gamma z}\vec{a}_x$$
$$\vec{H}_1 = \frac{E_1}{n} e^{-\gamma z}\vec{a}_y$$

$$\vec{E}_2 = E_2 e^{\gamma z}\vec{a}_x$$
$$\vec{H}_2 = -\frac{E_2}{n} e^{\gamma z}\vec{a}_y$$
$$\vec{E}_t = E_t e^{-i\beta_0 z}\vec{a}_x$$
$$\vec{H}_t = \frac{E_t}{n_0} e^{-i\beta_0 z}\vec{a}_y$$

Όπου τα διάφορα μεγέθη δίνονται από τους τύπους:

$$\beta_0 = \omega\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$$
$$n_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$$
$$\gamma = \sqrt{i\omega\mu(\sigma + i\omega\varepsilon)} = a + i\beta$$
$$n = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma + i\omega\varepsilon}}$$

Το πλάτος του προσπίπτοντος πεδίου E_i θεωρείται γνωστό. Για να καθορίσουμε τα υπόλοιπα πλάτη E_r, E_1, E_2, και E_t χρειαζόμαστε τέσσερις εξισώσεις. Αυτές θα προκύψουν από τον υπολογισμό των οριακών συνθηκών στα σημεία z=0 και z=t. Η συνέχεια των εφαπτομενικών συνιστωσών του ηλεκτρικού πεδίου στις δύο επιφάνειες δίνει:

$$\vec{E}_i\Big|_{z=0} + \vec{E}_r\Big|_{z=0} = \vec{E}_1\Big|_{z=0} + \vec{E}_2\Big|_{z=0}$$
$$\vec{E}_1\Big|_{z=t} + \vec{E}_2\Big|_{z=t} = \vec{E}_t\Big|_{z=t}$$

Η συνέχεια των εφαπτομενικών συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου στις δύο επιφάνειες δίνει:

$$\vec{H}_i\Big|_{z=0} + \vec{H}_r\Big|_{z=0} = \vec{H}_1\Big|_{z=0} + \vec{H}_2\Big|_{z=0}$$
$$\vec{H}_1\Big|_{z=t} + \vec{H}_2\Big|_{z=t} = \vec{H}_t\Big|_{z=t}$$

Αντικαθιστώντας στις παραπάνω οριακές συνθήκες τις εξισώσεις των πεδίων παίρνουμε τις τέσσερις απαραίτητες εξισώσεις για τον υπολογισμό των πλατών:

$$E_i + E_r = E_1 + E_2$$
$$E_1 e^{-\gamma t} + E_2 e^{\gamma t} = E_t e^{-i\beta_0 t}$$
$$\frac{E_i}{n_0} - \frac{E_r}{n_0} = \frac{E_1}{n} - \frac{E_2}{n}$$
$$\frac{E_1}{n} e^{-\gamma t} - \frac{E_2}{n} e^{\gamma t} = \frac{E_t}{n_0} e^{-i\beta_0 t}$$

Λύνοντας τις παραπάνω εξισώσεις υπολογίζουμε το λόγο του προσπίπτοντος προς το μεταδιδόμενο κύμα ως εξής:

$$\frac{E_i}{E_t} = \frac{(n_0+n)^2}{4\, n_0 n}\left[1-\left(\frac{n_0-n}{n_0+n}\right)^2 e^{-\frac{2t}{\delta}} e^{-i2\beta t}\right] e^{\frac{t}{\delta}} e^{i\beta t} e^{-i\beta_0 t}$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι η ακριβής έκφραση για το λόγο του ολικού προσπίπτοντος πεδίου προς το ολικό μεταδιδόμενο πεδίο. Στην παραπάνω έκφραση καταλήγουμε αν κάνουμε τις αντικαταστάσεις *γ=a+iβ* και *a=1/δ*, όπου *δ* το βάθος διείσδυσης του υλικού στη συχνότητα του προσπίπτοντος κύματος, το οποίο θεωρείται πολύ μικρότερο του πάχους του συνόρου. Στον παραπάνω ακριβή τύπο μπορούμε να κάνουμε κάποιες περαιτέρω προσεγγίσεις χωρίς βλάβη της γενικότητας. Καταρχήν θεωρούμε ότι το σύνορο είναι κατασκευασμένο από υλικό υψηλής αγωγιμότητας ώστε η εσωτερική αντίσταση του υλικού να μπορεί να θεωρηθεί πολύ μικρότερη από αυτή του ελευθέρου χώρου:

$$n \ll n_0$$

Με βάση την παραπάνω προσέγγιση έχουμε:

$$\frac{n_0 - n}{n_0 + n} \cong 1$$
$$e^{-\gamma t} = e^{-\alpha t} e^{-i\beta t} = e^{-\frac{t}{\delta}} e^{-i\beta t} \ll 1 \quad for\ t \gg \delta$$

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω προσεγγίσεις στην ακριβή εξίσωση και παίρνοντας την απόλυτη τιμή του λόγου έχουμε το παρακάτω αποτέλεσμα:

$$\left|\frac{E_i}{E_t}\right| = \left|\frac{(n_0+n)^2}{4\ n_0 n}\right| e^{\frac{t}{\delta}} \cong \left|\frac{n_0}{4\ n}\right| e^{\frac{t}{\delta}}$$

Για να εκφράσουμε το παραπάνω αποτέλεσμα της αποτελεσματικότητας θωράκισης σε dB υπολογίζουμε το λογάριθμο της παραπάνω έκφρασης:

$$SE_{dB} \cong 20\log_{10}\left|\frac{n_0}{4\hat{n}}\right| + 20\log_{10} e^{t/\delta} + M_{dB}$$

όπου ο πρώτος όρος αναφέρεται στην απώλεια ανάκλασης και ο δεύτερος όρος στην απώλεια απορρόφησης.

$$M_{dB} = 20\log_{10}\left|1-\left(\frac{n_0-n}{n_0+n}\right)^2 e^{-2\,t/\delta} e^{-i2\beta\, t}\right|$$

$$\cong 20\log_{10}\left|1-e^{-2\,t/\delta} e^{-i2\,t/\delta}\right|$$

Ο όρος των πολλαπλών ανακλάσεων μπορεί να αμεληθεί σε περίπτωση που το υλικό του συνόρου θωράκισης έχει υψηλή αγωγιμότητα, έχει πάχος πολύ μεγαλύτερο από το βάθος διείσδυσης και ισχύει $n<<n_0$. Στον παραπάνω υπολογισμό του M_{dB} έχουμε κάνει την αντικατάσταση $\beta=a=1/\delta$ θεωρώντας ότι το σύνορο έχει κατασκευαστεί από υλικό υψηλής αγωγιμότητας.

<u>Πηγές κοντινού πεδίου</u>

Ο υπολογισμός της αποτελεσματικότητας θωράκισης στην περίπτωση που οι πηγές των κυμάτων που προσπίπτουν στο σύνορο θωράκισης είναι σε κοντινή απόσταση από αυτό, γίνεται με τεχνικές που εξαρτώνται από τον τύπο των πηγών, οι οποίες μπορεί να είναι είτε μαγνητικές είτε ηλεκτρικές.

Σχέση κοντινού – μακρινού πεδίου

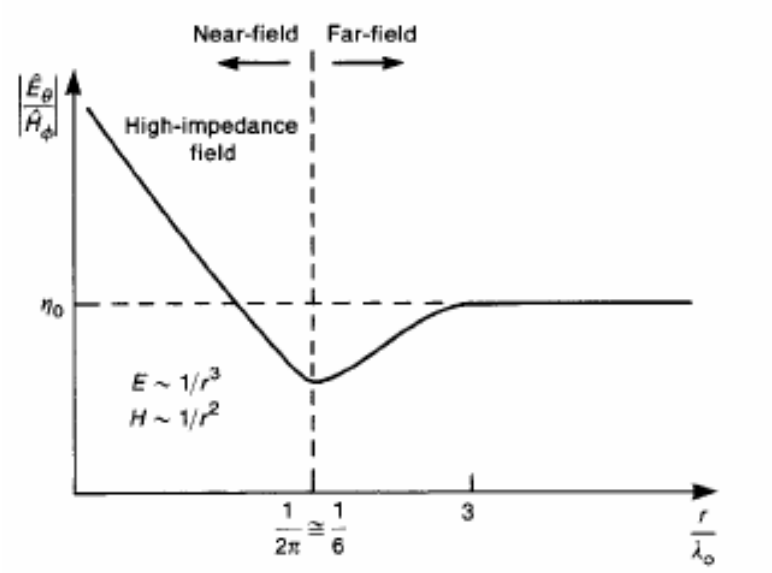
Για να γίνει κατανοητή η ανάγκη του διαχωρισμού των πηγών ανάλογα με τον τύπο τους, θεωρούμε το στοιχειώδες ηλεκτρικό δίπολο Hertz. Είναι γνωστό πως σε μακρινή απόσταση από το δίπολο για τα κύματα που δημιουργούνται ισχύει ότι οι συνιστώσες μακρινού πεδίου E_θ και H_φ είναι ορθογώνιες μεταξύ τους και ότι η αντίσταση του μέσου διάδοσης δίνεται από το λόγο $n_0=E_\theta/H_\varphi$. Στο κοντινό πεδίο του δίπολου αυτές οι συνθήκες δεν ισχύουν. Γενικά, τα κοντινά πεδία έχουν περισσότερες πεδιακές συνιστώσες. Επιπλέον οι πεδιακές συνιστώσες δεν έχουν εξάρτηση από το αντίστροφο της απόστασης 1/r, αλλά εξαρτώνται από τα $1/r^2$ και $1/r^3$. Ο όρος 1/r ισοδυναμεί με τους όρους $1/r^2$ και $1/r^3$ όταν $r=\lambda_0/2\pi$ ή περίπου $r=\lambda_0/6$. Ένα κριτήριο για το όριο κοντινού / μακρινού πεδίου είναι ο λόγος E_θ προς H_φ να είναι n_0. Αυτός ο λόγος ονομάζεται κυματική αντίσταση:

$$Z_w = \frac{E_\theta}{H_\phi}$$

Μόνο στην περίπτωση του μακρινού πεδίου μπορούμε να χρησιμοποιούμε την έκφραση εσωτερική αντίσταση για να χαρακτηρίζουμε την κυματική αντίσταση. Η κυματική αντίσταση υπολογίζεται από τις εξισώσεις των ολικών πεδίων και δίνεται από τον τύπο:

$$Z_w = n_0 \frac{\frac{i}{\beta_0 r} + \frac{1}{(\beta_0 r)^2} - \frac{i}{(\beta_0 r)^3}}{\frac{i}{\beta_0 r} + \frac{1}{(\beta_0 r)^2}}$$

Το πλάτος της κυματικής αντίστασης συναρτήσει της απόστασης από την πηγή δίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Στο μακρινό πεδίο ο όρος *1/r* κυριαρχεί δίνοντας $Z_w \cong n_0$. Στο κοντινό πεδίο έχουμε:

$$Z_w \cong n_0\left(-\frac{i}{\beta_0 r}\right) \quad \left(near\ field\ \beta_0 r << 1\right)$$

$$\cong \frac{n_0}{\beta_0 r}\angle -90°$$

Στο κοντινό πεδίο το ηλεκτρικό πεδίο είναι ανάλογο του $1/r^3$ ενώ το μαγνητικό πεδίο ανάλογο του $1/r^2$:

$$\left.\begin{aligned} E_\theta &\approx \frac{1}{r^3} \\ H_\phi &\approx \frac{1}{r^2} \end{aligned}\right\} \left(electric\,source, near\ field\right)$$

Επίσης, στο κοντινό πεδίο του ηλεκτρικού διπόλου, η κυματική αντίσταση είναι μεγαλύτερη από την αντίσταση του μέσου. Για αυτό το λόγο το ηλεκτρικό δίπολο αναφέρεται ως *πηγή υψηλής αντίστασης.* Το πλάτος της κυματικής αντίστασης για ένα ηλεκτρικό δίπολο είναι:

$$\left|Z_w\right|_e = \frac{1}{2f\pi\varepsilon_0 r} = 60\frac{\lambda_0}{r}$$

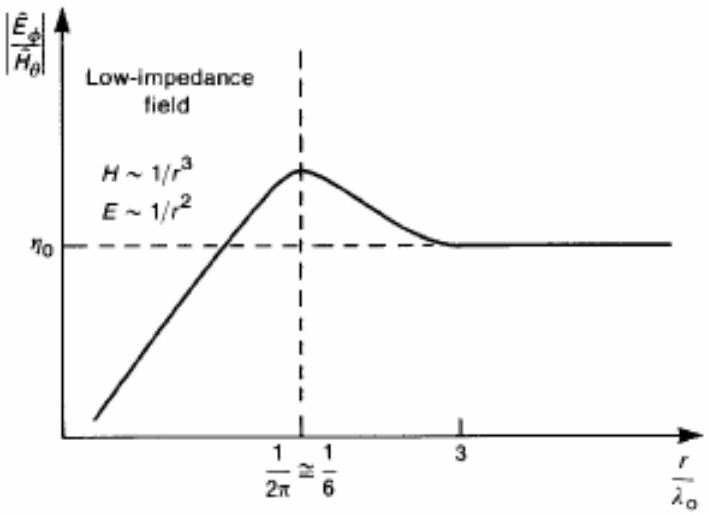
Το στοιχειώδες μαγνητικό δίπολο (μαγνητικός βρόχος) είναι το δυϊκό στοιχείου του ηλεκτρικού διπόλου. Για αυτό το λόγο μπορούμε να εναλλάξουμε τις ποσότητες του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου και να πάρουμε σωστά αποτελέσματα. Οι πεδιακές συνιστώσες μακρινού πεδίου του μαγνητικού διπόλου είναι οι E_φ και H_θ. Η κυματική αντίσταση ορίζεται ως:

$$Z_w = \frac{E_\phi}{H_\theta}$$

Υπολογίζεται δε από τον τύπο:

$$Z_w = -n_0 \frac{\frac{i}{\beta_0 r} + \frac{1}{(\beta_0 r)^2}}{\frac{i}{\beta_0 r} + \frac{1}{(\beta_0 r)^2} - \frac{i}{(\beta_0 r)^3}}$$

Το πλάτος της κυματικής αντίστασης συναρτήσει της απόστασης από την πηγή δίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Στο μακρινό πεδίο ο όρος *1/r* κυριαρχεί δίνοντας $Z_w \cong n_0$. Στο κοντινό πεδίο έχουμε:

$$Z_w \cong -in_0\beta_0 r \quad \left(near\ field\ \beta_0 r << 1\right)$$
$$\cong n_0\beta_0 r \ \angle -90°$$

Στο κοντινό πεδίο το μαγνητικό πεδίο είναι ανάλογο του $1/r^3$ ενώ το ηλεκτρικό πεδίο ανάλογο του $1/r^2$:

$$\left.\begin{aligned} H_\theta &\approx \frac{1}{r^3} \\ E_\phi &\approx \frac{1}{r^2} \end{aligned}\right\} \left(magnetic\ source, near\ field\right)$$

Επίσης, στο κοντινό πεδίο του μαγνητικού δίπολου, η κυματική αντίσταση είναι μικρότερη από την αντίσταση του μέσου. Για αυτό το λόγο το μαγνητικό δίπολο αναφέρεται ως *πηγή χαμηλής αντίστασης.* Το πλάτος της κυματικής αντίστασης για ένα μαγνητικό δίπολο είναι:

$$\left|Z_w\right|_m = 2f\pi\,\mu_0 r = 2369\frac{r}{\lambda_0}$$

Η διάκριση μεταξύ ηλεκτρικών και μαγνητικών πηγών μας επιτρέπει να μεταφέρουμε πολλά από τα αποτελέσματα που υπολογίσαμε για τις πηγές μακρινού πεδίου σε αυτές κοντινού πεδίου.

<u>Ηλεκτρικές πηγές</u>

Οι βασικοί μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της θωράκισης σε περιπτώσεις πηγών μακρινού πεδίου ισχύουν και στην περίπτωση πηγής κοντινού πεδίου, αλλά ο τύπος της πηγής είναι ένας σημαντικός παράγοντας για τον καθορισμό μιας αποτελεσματικής μεθοδολογίας θωράκισης. Η ακριβής λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι πολύ πιο δύσκολη από την περίπτωση του ομοιόμορφου επίπεδου κύματος. Μια προσέγγιση που παίρνουμε είναι ο υπολογισμός της αποτελεσματικότητας θωράκισης ως το γινόμενο του όρου ανάκλασης, του όρου απορρόφησης και του όρου πολλαπλών ανακλάσεων, όπου κάθε όρος υπολογίζεται όπως στην ανάλυση μακρινού πεδίου αντικαθιστώντας τον όρο n_0 με την κυματική αντίσταση Z_w

σε κάθε εξίσωση. Ο όρος της απορρόφησης παραμένει και δεν επηρεάζεται από τον τύπο της πηγής.

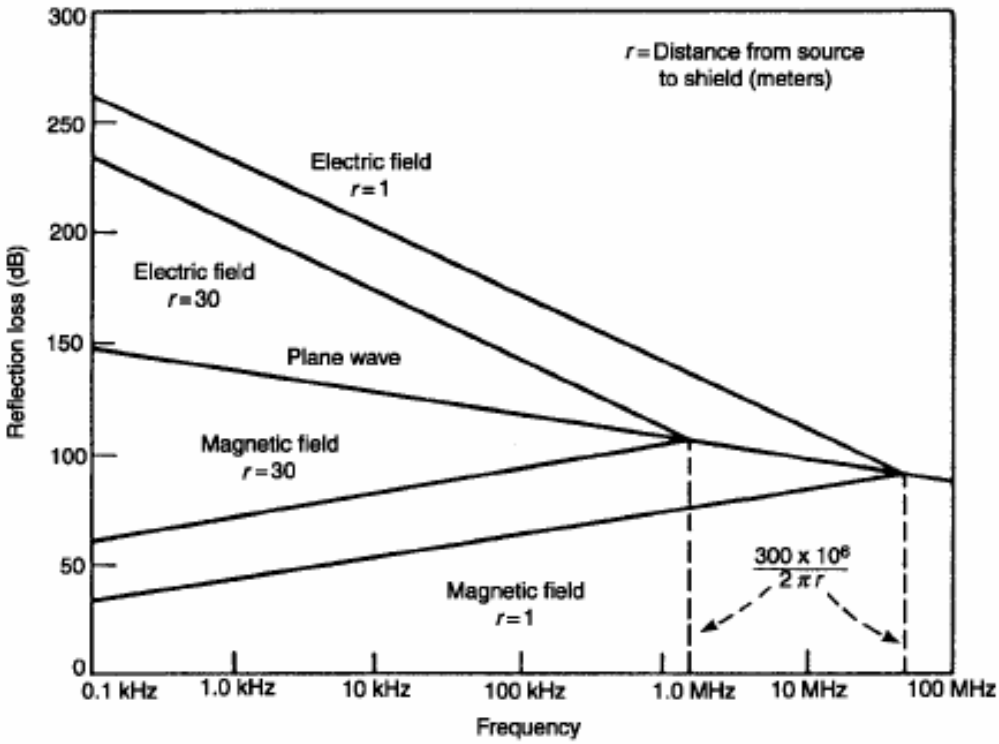
Οι απώλειες ανάκλασης υπολογίζονται αντικαθιστώντας την αντίσταση του ελευθέρου χώρου με την κυματική αντίσταση:

$$R_{dB} = 20\log_{10}\left|\frac{\left(Z_w + n\right)^2}{4\ Z_w n}\right| \cong 20\log_{10}\left|\frac{Z_w}{4\ n}\right|$$

Αν στον παραπάνω τύπο αντικαταστήσουμε την κυματική αντίσταση με το ισοδύναμό της για ηλεκτρική πηγή και με την προσέγγιση υψηλής αγωγιμότητας παίρνουμε τον τύπο:

$$R_{dB} = 322 + 10\log_{10}\left(\frac{\sigma_r}{\mu_r f^3 r^2}\right)$$

Οι απώλειες ανάκλασης για μια ηλεκτρική πηγή δίνονται στο παρακάτω γράφημα για θωράκιση χαλκού συναρτήσει της συχνότητας της πηγής και της απόστασής της από το σύνορο θωράκισης.



Παρατηρούμε στο παραπάνω γράφημα ότι οι απώλειες ανάκλασης για μια πηγή κοντινού πεδίου είναι σημαντικά υψηλότερες από τις αντίστοιχες μιας πηγής ομοιόμορφου επίπεδου κύματος. Επίσης αυξάνονται όσο μειώνεται η απόσταση μεταξύ πηγής και θωράκισης.

Μαγνητικές πηγές

Και σε αυτή την περίπτωση, όπως παραπάνω, η απώλειες απορρόφησης είναι οι ίδιες με την περίπτωση του ομοιόμορφου επίπεδου κύματος. Οι απώλειες ανάκλασης για μαγνητικές πηγές κοντινού πεδίου υπολογίζονται αντικαθιστώντας την κυματική αντίσταση για μαγνητικές πηγές στο γενικό τύπο:

$$R_{dB} = 14.57 + 10\log_{10}\left(\frac{\sigma_r f \ r^2}{\mu_r}\right)$$

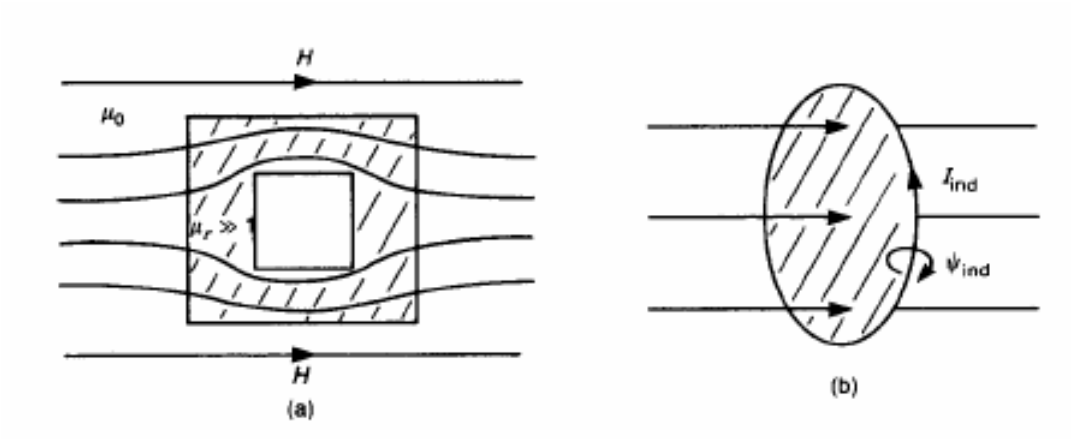
Στο παραπάνω σχήμα δίνονται οι απώλειες ανάκλασης για μια μαγνητική πηγή για θωράκιση χαλκού συναρτήσει της συχνότητας της πηγής και της απόστασής της από το σύνορο θωράκισης. Παρατηρούμε ότι οι απώλειες ανάκλασης για μια πηγή κοντινού πεδίου είναι χαμηλότερες από τις αντίστοιχες μιας πηγής ομοιόμορφου επίπεδου κύματος. Επίσης μειώνονται όσο μειώνεται η συχνότητα της πηγής. Κατά συνέπεια, οι απώλειες ανάκλασης συνήθως θεωρούνται αμελητέες για χαμηλές συχνότητες. Επίσης, οι απώλειες απορρόφησης είναι μικρές σε χαμηλές συχνότητες και για αυτό το λόγο πρέπει να χρησιμοποιηθούν άλλες τεχνικές όταν μελετάται η περίπτωση μαγνητικών πηγών κοντινού πεδίου και χαμηλής συχνότητας.

Μαγνητική θωράκιση χαμηλής συχνότητας

Στην προηγούμενη ανάλυση είδαμε ότι για τις πηγές μακρινού πεδίου, οι απώλειες ανάκλασης είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός θωράκισης σε χαμηλές συχνότητες, ενώ οι απώλειες απορρόφησης είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός

σε υψηλές συχνότητες. Για την περίπτωση ηλεκτρικών πηγών κοντινού πεδίου ισχύουν οι ίδιες αρχές: οι απώλειες ανάκλασης είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός θωράκισης σε χαμηλές συχνότητες, ενώ οι απώλειες απορρόφησης είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός σε υψηλές συχνότητες. Για την περίπτωση των μαγνητικών πηγών κοντινού πεδίου, τα πράγματα αλλάζουν στις χαμηλές συχνότητες. Οι απώλειες απορρόφησης είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός θωράκισης για όλες τις συχνότητες. Παρόλα αυτά, τόσο οι απώλειες ανάκλασης όσο και οι απώλειες απορρόφησης είναι σχετικά μικρές για χαμηλές συχνότητες οπότε πρέπει να εξεταστούν άλλες τεχνικές.

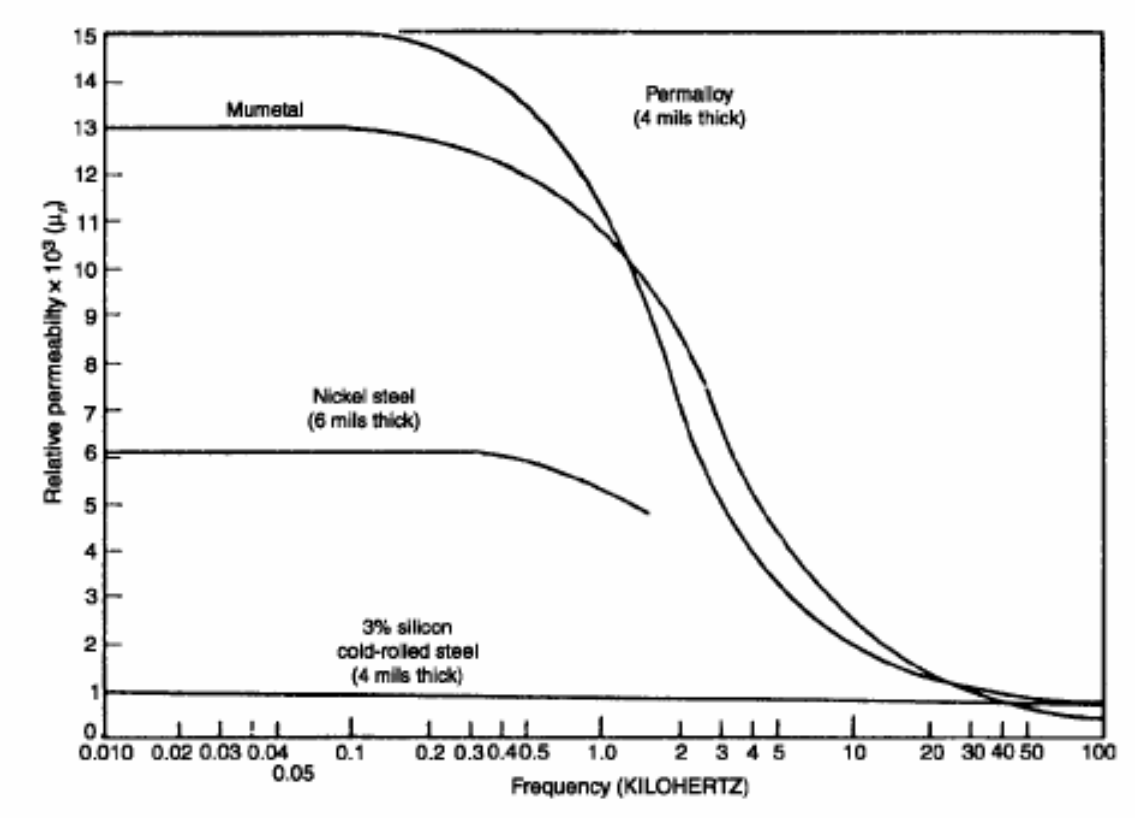
Υπάρχουν δυο βασικές μέθοδοι για τη θωράκιση σε περίπτωση μαγνητικών πηγών κοντινού πεδίου, χαμηλών συχνοτήτων: εκτροπή της μαγνητικής ροής με χρήση υλικών υψηλής διαπερατότητας και δημιουργία αντίθετης ροής με χρήση του νόμου του Faraday. Η εκτροπή της μαγνητικής ροής μέσω ενός μονοπατιού χαμηλής μαγνητικής αντίστασης (υψηλής διαπερατότητας) φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Θεωρώντας ότι το εξωτερικό μέσο είναι ο ελεύθερος χώρος με $\mu=\mu_r\mu_0$ και $\mu_r>>1$, το μαγνητικό πεδίο τείνει να συγκεντρωθεί σε ένα χαμηλής μαγνητικής αντίστασης φερρομαγνητικό μονοπάτι και δε θα μπορέσει να επηρεάσει την περιοχή στο εσωτερικό της θωράκισης. Η μέθοδος δημιουργίας αντίθετης ροής φαίνεται επίσης στο παρακάτω σχήμα. Σε αυτή τη μέθοδο, ένας αγώγιμος βρόχος (ένα καλώδιο) είναι τοποθετημένος έτσι ώστε το προσπίπτον μαγνητικό πεδίο να διεισδύει στην επιφάνεια που ορίζεται από το βρόχο, επάγοντας, σύμφωνα με το νόμο του Faraday, ένα ρεύμα I_{ind} στο βρόχο και την αντίστοιχη μαγνητική ροή ψ_{ind}. Αυτή η επαγόμενη μαγνητική ροή είναι τέτοιας πολικότητας και διεύθυνσης ώστε να εξουδετερώνει το αρχικό προσπίπτον μαγνητικό πεδίο. Κατά συνέπεια το ολικό μαγνητικό πεδίο στην περιοχή του βρόχου μειώνεται. Υπάρχουν αρκετές εφαρμογές των δυο παραπάνω μεθόδων.



Παρόλα αυτά, υπάρχουν δυο παράγοντες που είναι πιθανόν να μειώσουν την αποτελεσματικότητα της τεχνικής εκτροπής ροής και πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη. Αυτοί είναι:

1. Η διαπερατότητα των φερρομαγνητικών υλικών μειώνεται όταν αυξάνεται η συχνότητα.
2. Η διαπερατότητα των φερρομαγνητικών υλικών μειώνεται όταν αυξάνεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου.

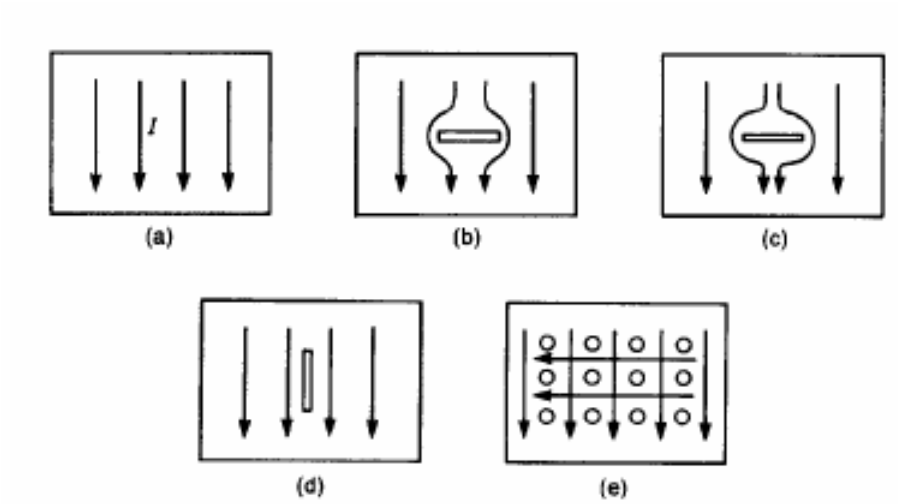
Στο παρακάτω σχήμα διακρίνουμε την εξάρτηση της μαγνητικής διαπερατότητας κάποιων υλικών συναρτήσει της συχνότητας.



Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από το γράφημα, υλικά υψηλής διαπερατότητας όπως το Mumetal είναι αποτελεσματικά μόνο σε μαγνητικά πεδία συχνότητας κάτω του 1kHz. Για να θωρακίσουμε αποτελεσματικά ενάντια σε πεδία άνω των 20kHz μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ατσάλι. Για αυτό το λόγο τα πλαίσια θωράκισης των μηχανισμών μεταγωγής ισχύος κατασκευάζονται από ατσάλι και όχι από Mumetal. Το ατσάλι είναι λιγότερο ακριβό από το Mumetal και το ίδιο αποτελεσματικό στις βασικές συχνότητες λειτουργίας (20-100kHz) και στις αρμονικές του μεταγωγέα.

Επίδραση των οπών

Υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις όπου η αποφυγή ύπαρξης οπών σε ένα κατά τα άλλα στεγανά θωρακισμένο πλαίσιο είναι αδύνατη. Μια από τις πιο συνηθισμένες περιπτώσεις είναι η ύπαρξη ανοιγμάτων για εξαερισμό για θερμικούς λόγους. Συνήθως αυτά τα ανοίγματα είναι σε μορφή πολλών μικρών οπών σε διάταξη παρά σε μια μόνο μεγάλη οπή.



Υπάρχει ένας σοβαρός λόγος που γίνεται αυτό. Ας θεωρήσουμε μια συμπαγή πλάκα θωράκισης. Επάγονται ρεύματα σε αυτή την πλάκα και είναι αυτά τα ρεύματα και τα σχετικά με αυτά πεδία που δημιουργούν διασκορπισμένα πεδία που εξουδετερώνουν ή μειώνουν την επίδραση των πεδίων που προσπίπτουν στην πλάκα. Ας υποθέσουμε ότι δημιουργούμε μια σχισμή στην πλάκα κάθετη στην διεύθυνση των επαγόμενων ρευμάτων. Η σχισμή θα εμποδίζει τη ροή του ρεύματος και θα μειώσει για αυτό το λόγο την αποτελεσματικότητα της θωράκισης. Το πλάτος της σχισμής δεν επηρεάζει σημαντικά το ποσοστό της μείωσης. Αν, παρόλα αυτά, προσανατολίσουμε τη σχισμή ώστε να είναι παράλληλη με τη διεύθυνση του επαγόμενου ρεύματος, η σχισμή θα έχει πολύ μικρότερη επίδραση στη θωράκιση. Από τη στιγμή που δεν είναι εφικτό να προκαθορίσουμε τη διεύθυνση των επαγόμενων ρευμάτων και να δημιουργήσουμε τις σχισμές με την κατάλληλη διεύθυνση, δημιουργούμε στη θέση της σχισμής ένα μεγάλο αριθμό μικρών οπών που έχουν το ίδιο αποτέλεσμα όσον αφορά τον εξαερισμό.

Πολλές φορές είναι σημαντικό να υπάρχουν θύρες πρόσβασης σε ένα θωρακισμένο θάλαμο. Στα σημεία που κλείνουν αυτές οι θύρες, δημιουργούνται κενά που μπορούν να λειτουργήσουν σαν κεραίες. Ακόμη και αν το κενό που δημιουργείται είναι μικρό, οι δυνατότητες ακτινοβόλησης είναι μεγάλες σύμφωνα με την αρχή του Babinet που εξετάσαμε νωρίτερα. Μεγάλη σημασία δεν έχει το βάθος του κενού αλλά το μήκος του. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται βίδες ανά τακτά διαστήματα

ώστε να μειώνουν το ενεργό μήκος των κενών. Επίσης για την κάλυψη των κενών χρησιμοποιούνται παρεμβύσματα (gaskets).

1.9 Περιβάλλον τούνελ

Το περιβάλλον τούνελ είναι γεμάτο από πηγές που προκαλούν ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Ορισμένες από αυτές τις πηγές είναι εξαρτώμενες μόνο για ένα μικρό χρονικό διάστημα και το μέγεθος των παρεμβολών ίσως να μη μπορεί να προβλεφθεί εύκολα. Ο εξοπλισμός που είναι ευαίσθητος σε εξωτερική παρεμβολή μπορεί να μη μπορεί να προβλεφθεί και για αυτό το λόγο να είναι πιθανόν επικίνδυνος. Δυστυχώς καθώς οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές είναι τελείως τυχαίες στη φύση είναι δύσκολο να χαρακτηριστούν και κατά συνέπεια πολύ δύσκολο να προβλεφθούν οι συνέπειές τους.

Στο περιβάλλον του μετρό συγκεκριμένα, ο ηλεκτρισμός υπεισέρχεται με διάφορους τρόπους και τα σημεία στα οποία πρέπει να αναζητηθούν οι πιθανές αιτίες ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών σχετίζονται με:

- Την προώθηση του συρμού και την υψηλή ταχύτητά τους.
- Την ύπαρξη αρκετών κινούμενων πηγών μέσα στην ίδια ζώνη επιρροής και την πιθανότητα ταυτόχρονης δημιουργίας διαταραχής από πολλές πηγές.
- Τα σηματοδοτικά και τηλεπικοινωνιακά συστήματα κατά μήκος των σιδηροτροχιών και μεταξύ των κέντρων ελέγχου, τα οποία ασχολούνται με την κίνηση των συρμών.
- Τον κλιματισμό και το φωτισμό με μετατροπείς και πάνω στα οχήματα.
- Συστήματα πληροφόρησης επιβατών σε οχήματα, σταθμούς και αποβάθρες.

Ως εκ τούτου, προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας εμφανίζονται στο κύριο και στα διάφορα σχετικά συστήματα, η διαταραγμένη λειτουργία των οποίων μπορεί να είναι πηγή ηλεκτρομαγνητικού θορύβου ικανού να επηρεάσει όλα τα υπόλοιπα συστήματα.

1.10 Νομικό πλαίσιο για την Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα

Η παρατήρηση παρενοχλήσεων από το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον άρχισε να γίνεται αντικείμενο συζήτησης στους κύκλους της επιστημονικής κοινότητας στη δεύτερη δεκαετία του περασμένου αιώνα. Οι ανησυχίες που εκφράστηκαν τότε στάθηκαν η αφορμή για τη δημιουργία της πρώτης Επιτροπής, με βασικό στόχο την εξέταση της παρεμβολής από ραδιοσυχνότητες. Η Επιτροπή αυτή συστήθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής από την Εθνική Ένωση Ηλεκτρικού Φωτός (National Electric Light Association) και την Εθνική Ένωση Κατασκευαστών Ηλεκτρικών (National Electrical Manufacturers Association). Οι προσπάθειες αυτές της επιτροπής συνέδραμαν στη δημοσίευση τεχνικών αναφορών και εγγράφων μεθόδων μέτρησης καθώς επίσης και στην εξέλιξη των οργάνων μέτρησης.

Την ίδια χρονική περίοδο, τα προηγμένα ευρωπαϊκά κράτη κατέγραφαν και ανέλυαν φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης και συγκροτούσαν Εθνικές Επιτροπές για την επίλυση των προβλημάτων, που κυρίως προέρχονταν από τη λειτουργία μηχανών (οχήματα, τρένα) και διακοπτών. Διαπιστώθηκε λοιπόν από την επιστημονική κοινότητα ότι τα προβλήματα θα μπορούσαν να επιλυθούν αποτελεσματικότερα με τη συνεργασία όλων των ενδιαφερόμενων κρατών. Το αποτέλεσμα ήταν η ένωση (1993) της IEC (International Electrotechnical Commission) και της IUB (International Union of Broadcasting) με την ονομασία CISPR (Comite International Special des Perturbations Radioelectrique). Μετά τη λήξη του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, η CISPR άρχισε να δραστηριοποιείται σε πολλούς κλάδους συγγενούς ενδιαφέροντος σε συνεργασία με επιστημονικές επιτροπές από τις Η.Π.Α., τον Καναδά, την Αυστραλία και αργότερα από την Ασία. Βαθμιαία οι συνεδριάσεις της CISPR έκαναν σημαντικά βήματα για την ανάπτυξη της συνεργασίας μεταξύ των κρατών και την αντιμετώπιση πληθώρας προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης. Αυτό το κατόρθωσε με την καθιέρωση μεθοδολογίας μετρήσεων και τη θέσπιση ορίων λειτουργίας των συστημάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα προβλήματα είχαν αυξηθεί δραματικά μετά την ώθηση που δέχθηκαν οι τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές κατά τη διάρκεια του πολέμου.

Η IEC συνεργάζεται στενά με τον ISO (International Standards Organization) και το 1990 αριθμούσε 41 κράτη-μέλη. Η επιτροπή της IEC που ασχολείται αποκλειστικά με θέματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας είναι η TC77. Ωστόσο υπάρχουν άλλες 40, περίπου, επιτροπές της που ασχολούνται με παρεμφερή ζητήματα. Για την Ευρωπαϊκή Ένωση, ο φορέας θέσπισης προτύπων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας είναι η CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization) και για τον τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό είναι το ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Από ελληνικής πλευράς, ο φορέας που συμμετέχει, ελέγχει και προτείνει στη CENELEC είναι ο ΕΛΟΤ (Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης), του οποίου οι επιτροπές απαρτίζονται από επιστήμονες διαφόρων ειδικοτήτων.

Οι συνέπειες της ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης ποικίλλουν από το απλό τρεμόσβημα (flickering) της οθόνης ενός υπολογιστή, λόγω της παρουσίας ενός κινητού τηλεφώνου σε κοντινή απόσταση, έως την ασφάλεια πτήσης των αεροσκαφών και τη σύζευξη μεταξύ ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και ενός εμφυτευμένου βηματοδότη. Με κύριο σκοπό λοιπόν την προστασία του καταναλωτικού κοινού, του περιβάλλοντος αλλά και τη διαφύλαξη του υγιούς ανταγωνισμού μεταξύ των εταιρειών, οι κυβερνήσεις όλων των ανεπτυγμένων χωρών θέσπισαν Πρότυπα Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας για το σύνολο σχεδόν των συσκευών. Τα πρότυπα αναφέρουν τις συσκευές που εμπίπτουν σε αυτά και περιγράφουν τα όρια, τη διάταξη και την ακριβή διαδικασία μετρήσεων. Τα πρότυπα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: τα γένια, τα βασικά και τα πρότυπα προϊόντος.

Τα γένια πρότυπα έχουν ευρεία εφαρμογή και δε σχετίζονται με ένα συγκεκριμένο προϊόν ή οικογένεια προϊόντων. Τα πρότυπα αυτά προορίζονται να παρουσιάσουν τις θεμελιώδεις απαιτήσεις συμβατότητας όλων σχεδόν των προϊόντων και χωρίζονται περαιτέρω σε πρότυπα ατρωσίας (immunity) και εκπομπής (emission). Σε περιπτώσεις που υπάρχουν πρότυπα για ένας συγκεκριμένο προϊόν, αυτά εφαρμόζονται σε προτεραιότητα έναντι του γένιου προτύπου. Τα βασικά πρότυπα είναι εξ ολοκλήρου αφιερωμένα σε θέματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας

ευρύτερου ενδιαφέροντος και λαμβάνονται υπόψη από τις επιτροπές που αναπτύσσουν πρότυπα προϊόντος.

Εν συνεχεία θα αναφερθούμε περιληπτικά σε κάποια πρότυπα τα οποία σχετίζονται με το αντικείμενο έρευνάς μας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση αναφοράς για τους υπολογισμούς μας.

Προδιαγραφές εκπομπών

EN 50 011

Όρια και μέθοδοι μέτρησης χαρακτηριστικών ραδιοπαρενόχλησης για βιομηχανικό, επιστημονικό και ιατρικό εξοπλισμό

Στο πρότυπο αυτό περιέχονται οι παρακάτω πληροφορίες:

- Ορίζονται οι έννοιες του βιομηχανικού, επιστημονικού και ιατρικού εξοπλισμού (ISM)
- Ορίζονται δύο ομάδες του ISM εξοπλισμού

Ομάδα 1: Εξοπλισμός στον οποίο η σκόπιμα παραγόμενη ισχύς ραδιοσυχνοτήτων συζευγνύεται με αγώγιμο τρόπο (π.χ. γεννήτριες σημάτων, αναλυτές φάσματος, συχνόμετρα, ζυγιστικές μηχανές κ.λ.π.)

Ομάδα 2: Εξοπλισμός στον οποίο η σκόπιμα παραγόμενη ισχύς χρησιμοποιείται στη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

- Καθορίζονται τα όρια αγώγιμων εκπομπών, τόσο στην κατηγορία Α (που αφορά εξοπλισμό που χρησιμοποιείται σε όλα τα περιβάλλοντα εκτός του οικιακού), όσο και στην κατηγορία Β (που αφορά σε συσκευές που λειτουργούν σε οικιακό περιβάλλον).
- Καθορίζονται τα όρια για ακτινοβολούμενες εκπομπές.

Ο εξοπλισμός της ομάδας 1-κατηγορία Α θα πρέπει να μετριέται σε ανοικτό χώρο σε απόσταση 30m. Επιπλέον, ο εξοπλισμός της ομάδας 1-κατηγορία Β θα πρέπει να μετριέται σε απόσταση 10m. Τα όρια φαίνονται στον πίνακα 3.

Πίνακας 1

Κατηγορία Α				
Περιοχή Συχνότητας (MHz)	**Ομάδα 1**		**Ομάδα 2**	
	Μέγιστο dBμV	**Μέσο dBμV**	**Μέγιστο dBμV**	**Μέσο dBμV**
0.15-0.50	79	66	100	90
0.50-5	73	60	86	76
5-30	73	60	90-70	80-60

Πίνακας 2

Κατηγορία Β		
Περιοχή Συχνότητας (MHz)	**Ομάδα 1 και 2**	
	Μέγιστο dBμV	**Μέσο dBμV**
0.15-0.50	66-56	56-46
0.50-5	56	46
5-30	60	50

Πίνακας 3

Ζώνη Συχνότητας (MHz)	**Επίπεδο (dBμV/m)**
30-230	30
230-1000	37

Προδιαγραφές Ατρωσίας

Εκτός από τα πρότυπα εκπομπών, κάθε κατασκευαστής θα πρέπει να αναπτύσσει τα προϊόντα του έτσι ώστε να ακολουθούν και τις προδιαγραφές ατρωσίας, ούτως ώστε να διευκολύνεται η διαδικασία αυτοπιστοποίησης που εισάγεται με την κοινοτική οδηγία 89/336/EEC. Το πιο σημαντικό πρότυπο ατρωσίας είναι το διεθνές πρότυπο IEC 801, που αποτελείται από 6 τμήματα που θα περιγραφούν συνοπτικά στη συνέχεια. Γενικά, τα τρέχοντα ευρωπαϊκά πρότυπα ατρωσίας κάνουν συχνά αναφορά στο IEC 801 και πολλά από αυτά βρίσκονται στο στάδιο οριστικοποίησής τους.

EN 55 020
Ατρωσία από ραδιοπαρεμβολές ραδιοτηλεοπτικών δεκτών και του αντίστοιχου εξοπλισμού

Στο πρότυπο αυτό περιλαμβάνονται πληροφορίες στα παρακάτω:

- Καθορίζεται το είδος των συσκευών που καλύπτεται από το πρότυπο.
- Καθορίζονται τα όρια 'ατρωσίας' σε ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση:
  Απαιτήσεις σε ατρωσία στην είσοδο
  Ατρωσία σε αγώγιμες τάσεις
  Ατρωσία σε αγώγιμα ρεύματα
  Ατρωσία σε ακτινοβολούμενα πεδία
  Απαιτήσεις αποτελεσματικής απεικόνισης
- Καθορίζονται τα κριτήρια ελέγχου
- Περιγράφονται οι μέθοδοι μέτρησης
- Καθορίζονται οι απαιτήσεις ελέγχων για μαζική παραγωγή προϊόντων

ENV 50140:1994
Το πρότυπο αυτό είναι αντίστοιχο του IEC 801-3 με δύο κύριες αλλαγές:

- Προσθήκη διαμόρφωσης AM στο σήμα ελέγχου
- Προσθήκη ελέγχου στη συχνότητα των 900MHz

ENV 50141:1994
Το πρότυπο αυτό είναι αντίστοιχο του IEC 801-6, που θα αντικατασταθεί από το οριστικό πρότυπο IEC 1000-4-6.

ENV 50 204:1996
Το πρότυπο αυτό εξετάζει τα ακτινοβολούμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία από ψηφιακά ραδιοτηλέφωνα. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η 'ατρωσία' ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από κινητά τηλέφωνα των συστημάτων GSM (Group Special Mobile) και DECT (Digital European Cordless Telephone) που

χρησιμοποιούν τεχνική πολλαπλής προσπέλασης διαίρεσης χρόνου (TDMA). Οι συχνότητες που εξετάζονται είναι τα 900MHz και 1.89GHz. Το πρότυπο ENV 50 204 βασίζεται στο πρότυπο IEC 1000-4-3, αλλά εισάγει μια σειρά αλλαγών σε σχέση με αυτό.

Στο πρότυπο αυτό αναφέρεται ότι η γεννήτρια που θα χρησιμοποιείται στις δοκιμές θα πρέπει να διαθέτει εύρος συχνοτήτων μέχρι τα 1.89GHz τουλάχιστον και θα διαθέτει επιπλέον δυνατότητα διακοπτόμενης λειτουργίας (duty cycle 50%) στα 200Hz. Η τελευταία απαίτηση σημαίνει στην πράξη ότι η γεννήτρια θα εκπέμπει για 2.5ms (κατάσταση ON) και δε θα εκπέμπει για τα επόμενα 2.5ms (κατάσταση OFF).

Οι δοκιμές στις συγκεκριμένες συχνότητες θα περιλαμβάνουν και τις δύο πολώσεις. Τέλος, βρίσκεται υπό εξέταση η εισαγωγή ενός προσομοιωτή του ανθρώπινου σώματος στη διάταξη των δοκιμών. Τα επίπεδα δοκιμών που χρησιμοποιούνται στο πρότυπο αυτό είναι τα ακόλουθα.(πίνακας 4)

Η επιλογή του επίπεδου ελέγχου γίνεται με βάση την απόσταση προστασίας που είναι η ελάχιστη απόσταση του κινητού από την υπό εξέταση συσκευή, ώστε το προκαλούμενο ηλεκτρικό πεδίο σε αυτή να μην υπερβαίνει το αντίστοιχο επίπεδο ελέγχου. Στον πίνακα 5 φαίνεται η συσχέτιση της απόστασης προστασίας για τα υπό εξέταση ψηφιακά συστήματα και του επίπεδου ελέγχου.

Πίνακας 4

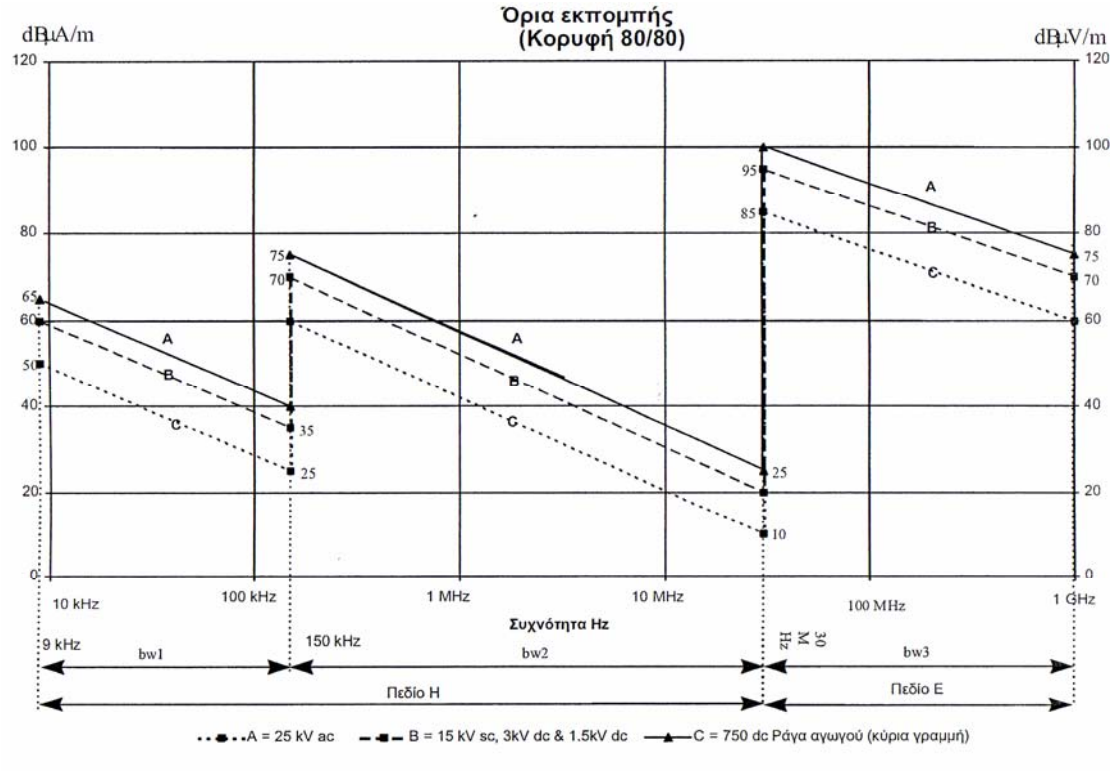
Επίπεδο	Ένταση πεδίου ελέγχου (V/m)
1	1
2	3
3	10
4	30
X	Ειδική κατηγορία

Πίνακας 5

Επίπεδο Ελέγχου V/m	Απόσταση Προστασίας για GSM 2W	Απόσταση Προστασίας για GSM 8W	Απόσταση Προστασίας για DECT 0.25W
1	5.5m	11m	1.9m
3	1.8m	3.7m	0.6m
10	0.6m	1.1m	0.2m
30	0.2m	0.4m	0.1m

EN 50121-2:2000
Σιδηροδρομικές εφαρμογές – Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα – Μέρος 2: Εκπομπή του συνολικού σιδηροδρομικού συστήματος στο εξωτερικό περιβάλλον

Αυτό το Ευρωπαϊκό πρότυπο καθορίζει τα όρια εκπομπής από το συνολικό σιδηροδρομικό σύστημα συμπεριλαμβανομένων των αστικών οχημάτων για χρήση σε δρόμους πόλεων, περιγράφει τη μέθοδο μέτρησης για να ελεγχθούν οι εκπομπές και δίνει τις τιμές χαρτογραφίας των πεδίων που συναντώνται συχνότερα. Παρουσιάζονται όρια εκπομπής για εκπομπή από την ανοιχτή διαδρομή σιδηροδρόμου, για εκπομπή από υποσταθμούς σιδηροδρόμου, για εκπομπή σε ραδιοσυχνότητες από γραμμές τροφοδοσίας ισχύος σιδηροδρόμου, για εκπομπή από τον υποσταθμό σε συχνότητες ισχύος και αρμονικές έως 9kHz. Ακολουθεί μέθοδος μέτρησης εκπομπής από κινούμενους συρμούς καθώς και διάγραμμα με τα όρια εκπομπής σε εύρος συχνοτήτων από 9kHz έως 1GHz.



Στο Παράρτημα Β του προτύπου αυτού εντοπίζουμε σημαντικές πληροφορίες αναφορικά με το υπόβαθρο των μεθόδων. Στο Παράρτημα αυτό περιγράφεται μια μέθοδος μέτρησης του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου που εκπέμπει ένα σιδηροδρομικό δίκτυο όταν οχήματα σιδηροδρόμου κινούνται στο δίκτυο αυτό. Οι υπάρχουσες μέθοδοι δεν θεωρούνται κατάλληλες επειδή τα οχήματα κινούνται με σημαντικές ταχύτητες. (Τα αντίστοιχα θα ισχύουν και για την περίπτωση του μετρό)

Ένα σιδηροδρομικό δίκτυο έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τα οποία κάνουν απαραίτητη τη χρήση μιας ειδικής μεθόδου μέτρησης. Αυτά τα χαρακτηριστικά συμπεριλαμβάνουν μια ταχέως κινούμενη πηγή και την πιθανότητα ακτινοβολίας από την μακριά κεραία που σχηματίζεται από τους αγωγούς ηλεκτρικής τροφοδοσίας ηλεκτρικού σιδηροδρόμου.

Στο Παράρτημα Γ του ίδιου προτύπου περιλαμβάνεται ένας πίνακας που δίνει τις τυπικές αριθμητικές τιμές ποσοτήτων που περιγράφουν την εκπομπή του σιδηροδρόμου στο εξωτερικό περιβάλλον.

EN 50121-3-2:2001
Σιδηροδρομικές Εφαρμογές-Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα-Μέρος 3-2: Τροχαίο υλικό-Συσκευές

Το συγκεκριμένο Ευρωπαϊκό πρότυπο εφαρμόζεται στις περιπτώσεις εκπομπής και ατρωσίας της EMC για ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές που προορίζονται να χρησιμοποιηθούν σε σιδηροδρομικό τροχαίο υλικό. Η περιοχή συχνότητας που καλύπτεται είναι από d.c. έως 400GHz. Προς το παρόν δεν προσδιορίζονται δοκιμές για συχνότητες που υπερβαίνουν το 1GHz. Η εφαρμογή των δοκιμών πρέπει να εξαρτάται από τη διαμόρφωση, τις θύρες, την τεχνολογία και τις συνθήκες λειτουργίας των συγκεκριμένων συσκευών. Το πρότυπο αυτό λαμβάνει υπόψη το εσωτερικό περιβάλλον του σιδηροδρομικού τροχαίου υλικού και το εξωτερικό περιβάλλον του σιδηροδρόμου, καθώς και τις παρεμβολές στις συσκευές που προέρχονται από εξοπλισμό όπως οι χειρόφερτοι ραδιοπομποί. Αν μια θύρα προορίζεται για να εκπέμπει ή να λαμβάνει για σκοπούς ραδιοεπικοινωνίας, τότε τα όρια εκπομπής και ατρωσίας του προτύπου δεν εφαρμόζονται.

Το αντικείμενο του συγκεκριμένου προτύπου είναι να καθορίσει όρια και μεθόδους δοκιμών για ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές και απαιτήσεις δοκιμών ατρωσίας σε σχέση με αγώγιμες και ακτινοβολούμενες διαταραχές. Αυτά τα όρια και οι δοκιμές αντιπροσωπεύουν ουσιώδεις απαιτήσεις ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Οι απαιτήσεις εκπομπής έχουν επιλεχθεί έτσι ώστε να εξασφαλίζεται πως οι διαταραχές που δημιουργούνται από τις συσκευές που λειτουργούν ομαλά σε τροχαίο υλικό δεν υπερβαίνουν τη στάθμη που θα μπορούσε να εμποδίζει την επιδιωκόμενη λειτουργία άλλων συσκευών. Επιπλέον, οι απαιτήσεις ατρωσίας έχουν επιλεχθεί έτσι ώστε να εξασφαλίζεται μια επαρκής στάθμη ατρωσίας για συσκευές τροχαίου υλικού. Ωστόσο οι στάθμες δεν καλύπτουν ακραίες περιπτώσεις οι οποίες μπορεί να συμβούν με υπερβολικά χαμηλή πιθανότητα πολύ σπάνια σε οποιαδήποτε θέση. Συγκεκριμένες απαιτήσεις οι οποίες αποκλίνουν από αυτό το πρότυπο πρέπει να καθοριστούν. Καθορίζονται απαιτήσεις δοκιμών για κάθε σχετική θύρα. Οι συγκεκριμένες αυτές διατάξεις είναι πρόσθετες των γενικών διατάξεων του EN 50121-1.

Στο πρότυπο αυτό ορίζονται τα κριτήρια επίδοσης, οι συνθήκες δοκιμής καθώς και η εφαρμοσιμότητα. Ακολουθούν δοκιμές και όρια εκπομπής για τις συσκευές με τη μέθοδο θύρα προς θύρα και πίνακες για τις θύρες ισχύος a.c.,για τις θύρες ισχύος έλξης d.c. ,για τις βοηθητικές θύρες ισχύος a.c. ή d.c., για τις θύρες αναφοράς συσσωρευτή, για τις θύρες ελέγχου και μέτρησης διεργασίας και τη θύρα περιβλήματος. Επιπλέον υπάρχουν δοκιμές και όρια ατρωσίας για συσκευές με τη μέθοδο θύρα προς θύρα και πίνακες για θύρες με μπαταρία, για θύρες ελέγχου και διεργασίες μέτρησης, σημάτων και επικοινωνίας και για θύρες περιβλήματος.

Στο παράρτημα Α του προτύπου παρουσιάζονται παραδείγματα συσκευών με τις αντίστοιχες απαιτήσεις δοκιμών και παραδείγματα θυρών για τις διάφορες συσκευές που μπορούμε να συναντήσουμε.

EN 50121-5
Σιδηροδρομικές εφαρμογές Μέρος 5:Εκπομπή και ατρωσία εγκαταστάσεων και συσκευών σταθερής τροφοδοσίας ισχύος

Το Ευρωπαϊκό αυτό πρότυπο εφαρμόζεται για περιπτώσεις εκπομπής και ατρωσίας της ΕΜC για ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές και συστήματα σχεδιασμένα για χρήση σε σταθερές εγκαταστάσεις σιδηροτροχιών, οι οποίες σχετίζονται με τροφοδότηση ισχύος. Αυτό περιλαμβάνει την τροφοδοσία ισχύος στη συσκευή, την ίδια τη συσκευή με τα προστατευτικά κυκλώματα ελέγχου της, στοιχεία πλευρικά της τροχιάς όπως σταθμούς διακοπής, αυτομετασχηματιστές ισχύος, ενισχυτικούς μετασχηματιστές, συσκευές διακοπής και ελέγχου των υποσταθμών και συσκευές διακοπής σε άλλες διαμήκεις και τοπικές παροχές. Τα φίλτρα που λειτουργούν στην τάση του σιδηροδρομικού συστήματος δεν περιλαμβάνονται στο πρότυπο αφού κάθε τοποθεσία έχει ειδικές απαιτήσεις. Τα φίλτρα θα έπρεπε κανονικά να έχουν ξεχωριστά περιβλήματα με ξεχωριστούς κανόνες πρόσβασης. Αν απαιτούνται ηλεκτρομαγνητικά όρια, αυτά θα εμφανίζονται στην προδιαγραφή του εξοπλισμού. Τα όρια στο πρότυπο δεν εφαρμόζονται σε εκούσια συστήματα επικοινωνίας. Η περιοχή συχνότητας που καλύπτεται είναι από d.c. έως

400GHz. Προς το παρόν δεν προσδιορίζονται δοκιμές για συχνότητες που υπερβαίνουν το 1GHz. Όρια δίνονται για την EMC μεταξύ των στοιχείων της συσκευής τα οποία βρίσκονται:

- Μέσα στα όρια της περιοχής ενός υποσταθμού, ο οποίος παρέχει ηλεκτρική ενέργεια στο σιδηρόδρομο,
- Δίπλα σε σιδηροτροχιά με σκοπό τον έλεγχο ή τη ρύθμιση της τροφοδοσίας του σιδηρόδρομου, συμπεριλαμβανομένης της διόρθωσης συντελεστή ισχύος και του φιλτραρίσματος,
- Κατά μήκος της σιδηροτροχιάς με σκοπό την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο σιδηρόδρομο, με τρόπο άλλο από ότι μέσω αγωγών συλλογής του ρεύματος επαφής και των σχετικών αγωγών επιστροφής. Συμπεριλαμβάνονται τα συστήματα τροφοδότησης υψηλής τάσης εντός των ορίων της περιοχής του σιδηροδρόμου, τα οποία τροφοδοτούν τους υποσταθμούς στους οποίους η τάση μειώνεται σε εκείνη του σιδηροδρομικού συστήματος,
- Δίπλα στη σιδηροτροχιά με σκοπό τον έλεγχο και τη ρύθμιση της ηλεκτρικής παροχής ισχύος σε χώρους σύνθεσης συρμών, σε υπόστεγα συντήρησης και σταθμούς,
- Άλλες παροχές ισχύος μη ελκυσμού διάφορες από σιδηροδρομικές πηγές, οι οποίες μοιράζονται με σιδηροδρομική έλξη.

Το πρότυπο περιέχει δοκιμές και όρια εκπομπών όσον αφορά την εκπομπή από τον υποσταθμό στο εξωτερικό περιβάλλον, την εκπομπή για συσκευές που λειτουργούν σε λιγότερο από 1000V r.m.s. a.c. και τιμές εκπομπών εντός των ορίων του υποσταθμού. Παράλληλα παρουσιάζονται δοκιμές ατρωσίας και όρια για συσκευές με τη μέθοδο θύρα προς θύρα καθώς και πίνακες ατρωσίας για τη θύρα περιβλήματος, για τις θύρες για γραμμές σημάτων και αρτηρίες δεδομένων που δεν εμπλέκονται στη διεργασία ελέγχου, για τις θύρες για τις γραμμές διεργασίας, μέτρησης και ελέγχου, όπως και μεγάλες γραμμές αρτηριών και ελέγχου, για τις θύρες εισόδου d.c. και εξόδου d.c. και τις αντίστοιχες a.c. και για τη θύρα γείωσης.

Στο παράρτημα Α γίνεται αναφορά στην εκπομπή εντός των ορίων του υποσταθμού για κανονική λειτουργία και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας διακοπτών.

Στο παράρτημα Γ γίνεται αναφορά στη δοκιμή της συχνότητας έλξης (γραμμή προς έδαφος). Παρουσιάζονται πίνακες ατρωσίας για θύρες εισόδου-εξόδου και θύρες ισχύος d.c. και a.c.

1.11 Αλληλεπίδραση βηματοδοτών με ηλεκτρομαγνητικά πεδία

Υπό το πρίσμα της ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης και της πρόληψης αυτής, κρίθηκε σκόπιμη η εξέταση της πιθανότητας πρόκλησης προβλημάτων σε καρδιακούς βηματοδότες κατά την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία, διαφόρων συχνοτήτων.

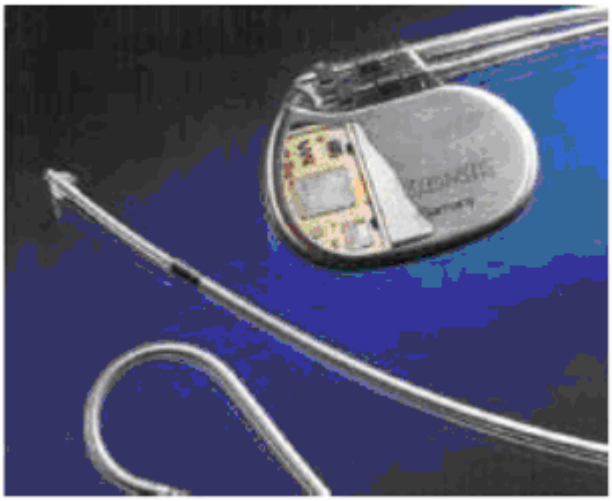
Σε αντίθεση με την ύπαρξη προτύπων για βιομηχανικό ή οικιακό εξοπλισμό, δεν υπάρχουν πρότυπα που να καλύπτουν θέματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και ηλεκτροχειρουργικής υψηλής συχνότητας, καθώς τα θέματα αυτά παραμένουν υπό μελέτη. Η ομάδα εργασίας της Τεχνικής Επιτροπής TC 62 της CENELEC, ''Ηλεκτροακτινολογικές και ηλεκτροϊατρικές συσκευές'' δημιούργησε το πρότυπο ''Ασφάλεια εμφυτεύσιμων καρδιακών βηματοδοτών'' (ΕΛΟΤ ΕΝ 50061), το οποίο όμως δεν προδιαγράφει τη στάθμη ποιότητας ή την αξιοπιστία των διαφόρων προϊόντων. Στην προσπάθεια δημιουργίας ενός τέτοιου πλήρους προτύπου, ανακύπτουν διάφορα προβλήματα, με κυριότερο των οποίων το ότι οι βηματοδότες που χρησιμοποιούνται σήμερα διαφέρουν σημαντικά στον τρόπο λειτουργίας και στη μακροβιότητά τους. Οι ιατρικές αυτές διατάξεις υπόκεινται επίσης σε συχνή και ταχεία τεχνική εξέλιξη. Επομένως κρίνεται πολύ δύσκολο να αναφερθούν σε ένα πρότυπο όλες οι αναγκαίες απαιτήσεις για βηματοδότες, λαμβάνοντας υπόψη και το ότι ένα πρότυπο για βηματοδότες που προδιαγράφει ορισμένες κατασκευαστικές απαιτήσεις θα εμπόδιζε τη μελλοντική ιατρική και τεχνική εξέλιξη.

Λόγω των ανωτέρω θα πρέπει να βασιστούμε ως επί το πλείστον στις μέχρι τώρα έρευνες και δημοσιεύσεις προκειμένου να εξάγουμε όσο το δυνατό ασφαλέστερα συμπεράσματα περί της παρεμβολής ή μη, των

ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που εκπέμπονται από τις κεραίες μέσα στο τούνελ και τους καρδιακούς βηματοδότες που ενδεχομένως φέρουν οι επιβάτες και το εργασιακό προσωπικό.

Τι είναι βηματοδότης;

Ως βηματοδότης, στην ιατρική ορολογία, αναφέρεται η συσκευή αυτή που παράγει ηλεκτρικά ερεθίσματα, τα οποία διεγείρουν την καρδιά μέσω ενός ή δυο ειδικών καλωδίων. Τοποθετείται στις καταστάσεις που η αυτόχθων διέγερση της καρδιάς έχει διαταραχθεί με αποτέλεσμα την εμφάνιση βραδυαρρυθμιών, οι οποίες μπορεί να προκαλούν ζάλη, κόπωση, δύσπνοια ή λιποθυμικά επεισόδια.



Το παραπάνω σχήμα δείχνει τη φωτογραφία ενός μονοπολικού βηματοδότη καθώς και τη θέση του καρδιακού βηματοδότη μέσα στο μοντέλο σώματος με εμφύτευση στο δεξί θώρακα, συνήθως σε βάθος εμφύτευσης των 5mm.

Η λειτουργία του βηματοδότη

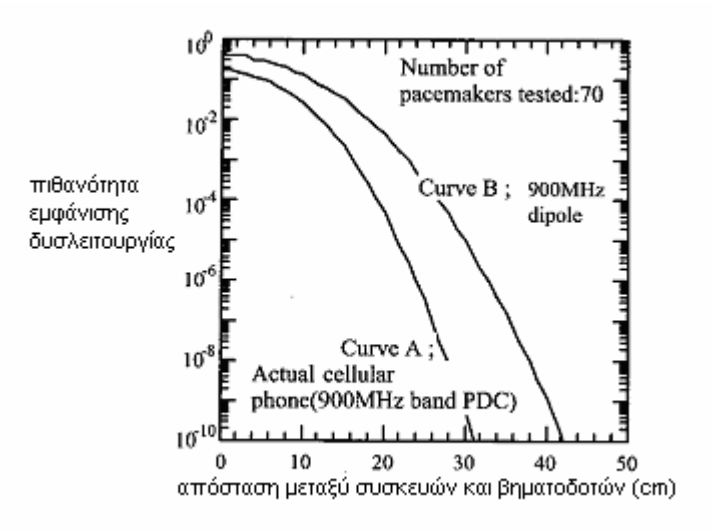
Χρησιμοποιώντας ιατρικούς όρους και μη κρίνοντας αναγκαία την εκτενέστερη περιγραφή, μπορούμε να αναφέρουμε ότι ο βηματοδότης μεταβάλλει τον καρδιακό ρυθμό ώστε να ανταποκρίνεται η καρδιά στις ανάγκες τον σώματος σε αίμα. Παρέχει έτσι βηματοδοτικά σήματα που μοιάζουν πολύ με τα φυσιολογικά σήματα της καρδιάς. Ανάλογα με την κατάσταση του ασθενή ο βηματοδότης μπορεί να αντικαταστήσει τα σήματα του φλεβόκομβου που καθυστερούν ή χάνονται κατά την πορεία του

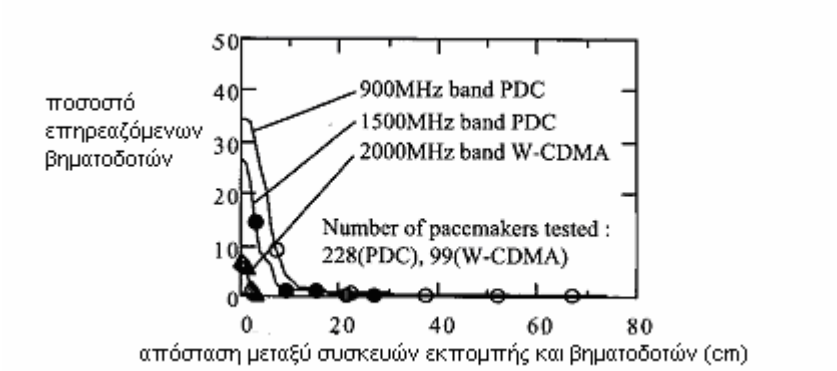
ηλεκτρικού δρόμου μεταξύ κόλπων- κοιλιών. Επίσης μπορεί να βοηθήσει στο χρονικό συντονισμό μεταξύ κόλπων-κοιλιών και να εξασφαλίσει τη σύσπαση των κοιλιών της καρδιάς σε επαρκή συχνότητα.

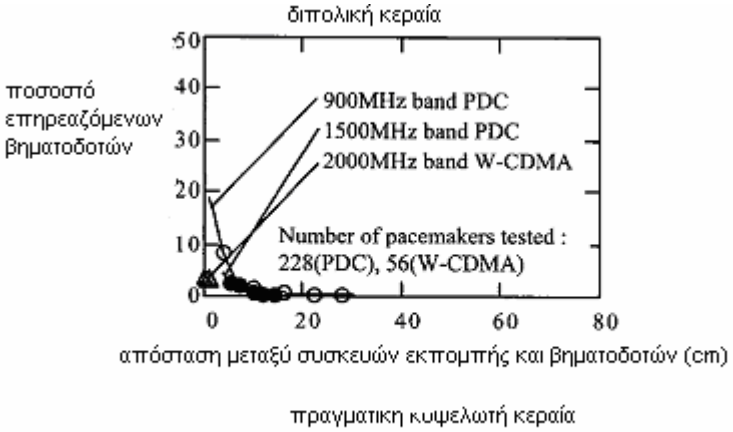
Αποτελέσματα ερευνών

Το Δεκέμβριο του 1995, η Ιαπωνική ομάδα έρευνας του ηλεκτρικού ιατρικού εξοπλισμού, καταπιάστηκε με τη μελέτη της επίδρασης των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών στους βηματοδότες λόγω των κινητών τηλεφώνων. Εξετάστηκαν 228 διαφορετικά είδη βηματοδοτών. Βάσει των αποτελεσμάτων που συγκεντρώθηκαν, η ερευνητική ομάδα εισήγαγε την ακόλουθη οδηγία για τη χρήση των κινητών τηλεφώνων από βηματοδοτούμενους ασθενείς: το κινητό τηλέφωνο πρέπει να κρατείται σε απόσταση τουλάχιστον 22 cm από την πλευρά του εμφυτευμένου βηματοδότη.

Σύμφωνα με πειράματα που διενεργήθηκαν το 2002 στη περιοχή συχνοτήτων των 900 MHz χρησιμοποιώντας πραγματικά κυψελωτά τηλέφωνα με μέγιστη ισχύ εισόδου κεραίας στα 0.8W ανακάλυψαν ότι 20 από τα 70 είδη βηματοδοτών εμφάνισαν δυσλειτουργίες. Η μέγιστη απόσταση παρεμβολής, ορισμένη ως η απόσταση ανάμεσα στη συσκευή έκθεσης και το βηματοδότη όταν η δυσλειτουργία αρχίζει να εμφανίζεται, ήταν 10 cm. Τα πειραματικά αποτελέσματα επεξεργάστηκαν και υπολογίστηκαν οι πιθανότητες της εμφάνισης δυσλειτουργίας συναρτήσει της απόστασης ανάμεσα στη συσκευή έκθεσης και το βηματοδότη, καθώς και το ποσοστό των βηματοδοτών που επηρεάζονται συναρτήσει επίσης της απόστασης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις παρακάτω εικόνες:







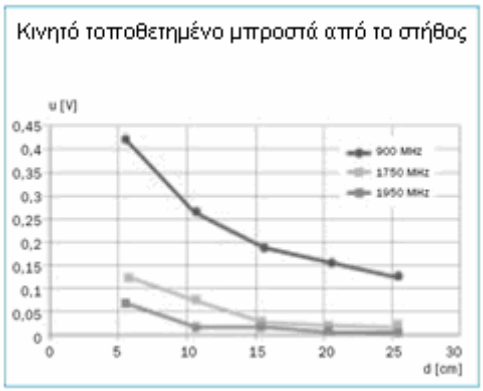
Το Φεβρουάριο του 2005 δημοσιεύτηκαν στο "EMC and Technology" από τον Dr. Achim Bahr τα αποτελέσματα μιας έρευνας που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό τη δημιουργία ενός μοντέλου σύνδεσης ανάμεσα στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που εκπέμπονται από την πηγή του πεδίου (π.χ. μία κινητή συσκευή λήψης) και την τάση που εμφανίζεται

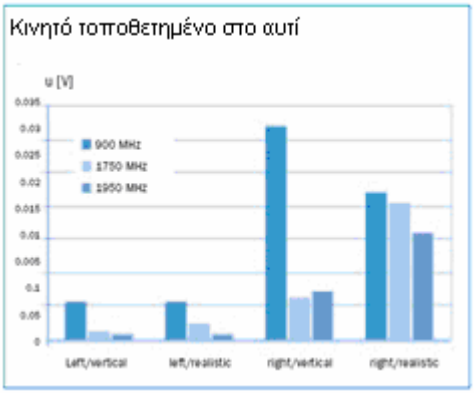
στην είσοδο του βηματοδότη, ο οποίος υπάγεται σε ρεαλιστικές συνθήκες εμφύτευσης. Στην έρευνα αυτή ελήφθησαν τρία σενάρια έκθεσης:

- Η συσκευή λήψης σε διαφορετικές αποστάσεις από το στήθος
- Η συσκευή λήψης σε απόσταση τηλεφωνήματος (τοποθετημένη είτε στο αριστερό είτε στο δεξί αυτί)
- Έκθεση στο μακρινό πεδίο ενός σταθμού βάσης της κεραίας

και χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλα σχεδιασμένα μοντέλα συσκευής λήψης, βηματοδότη, σώματος και βιολογικού ιστού.

Από τα αποτελέσματα του σεναρίου έκθεσης, με το κινητό τηλέφωνο τοποθετημένο μπροστά στο στήθος, για τις συχνότητες 900 MHz, 1750 MHz, 1950 MHz (σχήμα 1) και τα αποτελέσματα του σεναρίου με το κινητό τηλέφωνο τοποθετημένο στο αυτί για τις ίδιες συχνότητες(σχήμα 2), παρατηρήθηκε ότι στην πρώτη περίπτωση η παρεμβάλλουσα τάση στα 900 MHz είναι μεγαλύτερη για παραπάνω από 10dB συγκριτικά με τις άλλες δύο συχνότητες ενώ στη δεύτερη περίπτωση οι μέγιστες παρεμβάλλουσες τάσεις υπολείπονται κατά 20dB και πλέον αυτών του σεναρίου έκθεσης ‘’κινητό τηλέφωνο τοποθετημένο μπροστά στο στήθος’’.



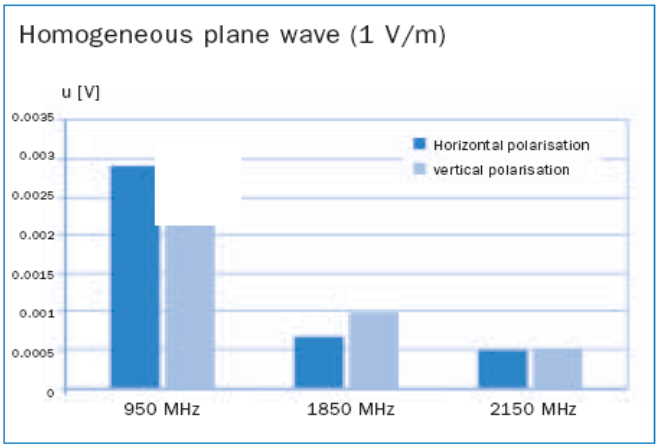


Σχήμα 1 Σχήμα 2

Στην περίπτωση ωστόσο που η πηγή ακτινοβολίας είναι πολύ μακριά από το βηματοδότη, όπως όταν πρόκειται για ένα σταθμό βάσης -περίπτωση που πρωτίστως μας ενδιαφέρει - οι επηρεασμοί του περιβάλλοντος μπορούν να αγνοηθούν και για απλοποίηση μπορεί να θεωρηθεί ένα

ομογενές επίπεδο κύμα με σκοπό να περιγράψει τη χωρική κατανομή του πεδίου.

Το ακόλουθο σχήμα απεικονίζει γραφικά τα αποτελέσματα των υπολογισμών με ένα οριζόντια και ένα κάθετα προσανατολισμένο ομοιογενές κύμα πλάτους E=1 V/m. Είναι και πάλι προφανές ότι οι υψηλότερες παρεμβάλλουσες τάσεις εμφανίζονται στο εύρος συχνοτήτων των 900 MHz.



Γραφική απεικόνιση των παρεμβαλλουσών τάσεων(πλάτος) στη μετωπική πρόσπτωση ενός ομοιογενούς επίπεδου κύματος (HPW E=1V/m)

Σε μια προσπάθεια σύνοψης των αποτελεσμάτων, συμπεραίνεται από τη διενέργεια της έρευνας ότι όλοι οι εξεταζόμενοι βηματοδότες – 88 στο σύνολό τους - με την εξαίρεση της έκθεσής τους στο κινητό τηλέφωνο GSM στα 900 MHz, δεν υφίστανται παρενόχληση. Επίσης δεν αναμένεται παρεμβολή από τα κινητά τηλέφωνα GSM 1800 και UMTS. Αναφορικά με τους GSM και UMTS σταθμούς βάσης, η παρεμβολή μπορεί να αποκλειστεί όταν υπάρχει συμμόρφωση με τις 1999/519/EC τιμές αναφοράς.

Διαπιστώθηκε επίσης ότι μια επικάλυψη των GSM και των UMTS σημάτων παρεμβολής δεν οδηγεί σε αλλαγή στην συμπεριφορά των παρεμβολών του βηματοδότη.

Συνδέοντας το τελευταίο αυτό συμπέρασμα με το αντικείμενο μελέτης μας, μπορούμε συνεπαγωγικά να υποθέσουμε ότι οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που ίσως εμφανιστούν στο υπό μελέτη περιβάλλον τούνελ

λόγω της ύπαρξης των διαφόρων συστημάτων (GSM, UMTS,TETRA), δε χρειάζεται να υπεισέλθουν στη μελέτη της ορθής λειτουργίας των βηματοδοτών.

Επιπρόσθετη ασφάλεια απορρέει από το γεγονός ότι πολυάριθμες εταιρείες ιατρικών συσκευών που κατασκευάζουν βηματοδότες, εγκαθιστούν πλέον γραμμή τροφοδοσίας μέσω των βηματοδοτών προκειμένου να φιλτράρουν τις εκπομπές ραδιοσυχνοτήτων που μπορεί να επηρεάσουν τη λειτουργία των βηματοδοτών. Το φιλτράρισμα αυτό εξαλείφει κατ' ουσία την ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (EMI).

1.12 Αλληλεπίδραση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων με την έμβια ύλη

Υπάρχουν τρεις βασικοί μηχανισμοί μέσω των οποίων τα χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία αλληλεπιδρούν άμεσα με την έμβια ύλη:

- Σύζευξη με χαμηλής συχνότητας ηλεκτρικά πεδία
- Σύζευξη με χαμηλής συχνότητας μαγνητικά πεδία
- Απορρόφηση ενέργειας από ηλεκτρομαγνητικά πεδία

Σύζευξη με χαμηλής συχνότητας ηλεκτρικά πεδία

Η αλληλεπίδραση των χρονικά μεταβαλλόμενων ηλεκτρικών πεδίων με το ανθρώπινο σώμα συνεπάγεται τη ροή ηλεκτρικών φορτίων (ηλεκτρικό ρεύμα), το σχηματισμό ηλεκτρικών διπόλων και την αλλαγή προσανατολισμού των διπόλων που ήδη υπάρχουν στον ιστό. Η σχετική έκταση των διαφορετικών αυτών αποτελεσμάτων εξαρτάται από τις ηλεκτρικές ιδιότητες του σώματος που είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα (ελέγχει τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος) και η επιτρεπτότητα (ελέγχει την έκταση των επιδράσεων της πόλωσης). Η ηλεκτρική αγωγιμότητα και επιτρεπτότητα ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο του ιστού του σώματος και εξαρτώνται από τη συχνότητα των εφαρμοζόμενων πεδίων. Ηλεκτρικά πεδία εξωτερικά του σώματος επάγουν επιφανειακή φόρτιση στο σώμα, η κατανομή της οποίας εξαρτάται από τις συνθήκες έκθεσης, από το μέγεθος και το σχήμα του σώματος και από τη θέση του σώματος μέσα στο πεδίο.

Σύζευξη με χαμηλής συχνότητας μαγνητικά πεδία

Η φυσική αλληλεπίδραση των χρονικά μεταβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων με το ανθρώπινο σώμα οδηγεί σε επαγόμενα ηλεκτρικά πεδία και κυκλοφορούντα ηλεκτρικά ρεύματα. Το μέγεθος του επαγόμενου πεδίου και η ένταση του ρεύματος είναι ανάλογα της ακτίνας του βρόχου, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του ιστού και του ρυθμού αλλαγής της μαγνητικής πυκνότητας ροής. Η ακριβής διαδρομή του επαγόμενου ρεύματος σε οποιοδήποτε μέρος του σώματος θα εξαρτηθεί από την ηλεκτρική αγωγιμότητα του ιστού.

Το σώμα δεν είναι ηλεκτρικά ομογενές, εν τούτοις οι επαγόμενες ηλεκτρικές εντάσεις μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας ανατομικώς και ηλεκτρικώς ρεαλιστικά μοντέλα του σώματος και μεθόδους υπολογισμού, που έχουν υψηλό βαθμό ανατομικού μετασχηματισμού.

Απορρόφηση ενέργειας από ηλεκτρομαγνητικά πεδία

Η έκθεση σε χαμηλής συχνότητας ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία φυσιολογικά οδηγεί σε αμελητέα απορρόφηση ενέργειας και καμία θερμοκρασιακή αύξηση δε γίνεται στο σώμα. Εν τούτοις, η έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία σε συχνότητες πάνω από 100 kHz μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική απορρόφηση ενέργειας και θερμοκρασιακές αλλαγές. Γενικά, η έκθεση σε ομοιόμορφο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο συνεπάγεται ιδιαίτερα ανομοιόμορφη απόθεση και κατανομή ενέργειας μέσα στο σώμα, η οποία πρέπει να εκτιμηθεί από δοσιμετρικές μετρήσεις και υπολογισμούς.

Όπως εκτιμάται η απορρόφηση ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα, τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις περιοχές:

- Συχνότητες στην περιοχή από περίπου 100 kHz μέχρι κάτω από 20 MHz, στην οποία η απορρόφηση στον ανθρώπινο κορμό μειώνεται γρήγορα με τη μειούμενη συχνότητα και σημαντική απορρόφηση μπορεί να συμβεί στο λαιμό και τα πόδια
- Συχνότητες στην περιοχή από περίπου 20 MHz έως 300 MHz, στην οποία μπορεί να συμβεί σχετικά υψηλή απορρόφηση σε όλο το σώμα

- Συχνότητες στην περιοχή από περίπου 300 MHz έως μερικά GHz, στην οποία λαμβάνει χώρα σημαντική τοπική, μη ομοιόμορφη απορρόφηση και
- Συχνότητες στην περιοχή πάνω από τα 10 GHz περίπου στην οποία η απορρόφηση ενέργειας συμβαίνει κυρίως στην επιφάνεια του σώματος.

Ένα μέγεθος που υπεισέρχεται στο σημείο αυτό είναι ο SAR (Μέσος Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης) ο οποίος ορίζεται ως ο ρυθμός με τον οποίο η ενέργεια απορροφάται ανά μονάδα μάζας ιστών του σώματος και εκφράζεται σε W/kg. Στον ιστό, ο SAR είναι ανάλογος του τετραγώνου της εσωτερικής ισχύος του ηλεκτρικού πεδίου ενώ ο μέσος SAR και η κατανομή του μπορούν να υπολογιστούν ή να εκτιμηθούν από εργαστηριακές μετρήσεις. Οι τιμές του εξαρτώνται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Τις παραμέτρους του πεδίου π.χ. τη συχνότητα, την ένταση, την πόλωση και τη σχετική θέση πηγής-αντικειμένου
- Τα χαρακτηριστικά του εκτιθέμενου σώματος π.χ. το μέγεθός του, την εσωτερική και εξωτερική γεωμετρία και τις ηλεκτρικές ιδιότητες των διαφόρων ιστών
- Αποτελέσματα ανακλάσεων από άλλα αντικείμενα στο πεδίο κοντά στο εκτιθέμενο σώμα.

Όταν ο μεγάλος άξονας του ανθρωπίνου σώματος είναι παράλληλος στο διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου, και έχουμε συνθήκες επίπεδης διάδοσης, ο SAR όλου του σώματος λαμβάνει μέγιστες τιμές. Το μέγεθος της απορροφημένης ενέργειας εξαρτάται από τον αριθμό των παραγόντων, συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους του εκτιθέμενου σώματος.

Για κάποιες συσκευές που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10 MHz (π.χ. κινητά τηλέφωνα) η ανθρώπινη έκθεση μπορεί να συμβεί σε συνθήκες κοντινού πεδίου. Η εξάρτηση από τη συχνότητα της απορρόφησης ενέργειας κάτω από αυτές τις συνθήκες είναι πολύ διαφορετική από αυτή που περιγράφηκε για το μακρινό πεδίο. Τα μαγνητικά πεδία μπορεί να είναι καθοριστικά για συγκεκριμένες συσκευές,

όπως είναι τα κινητά τηλέφωνα, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες έκθεσης.

Σύνοψη των βιολογικών αποτελεσμάτων και των επιδημιολογικών μελετών
(100 kHz-300 GHz)

Λόγω της σπουδαιότητας του θέματος έχει διεξαχθεί μια σειρά ερευνών από διάφορες ανά τον κόσμο ερευνητικές ομάδες. Τα μέχρι τώρα διαθέσιμα πειραματικά στοιχεία δείχνουν ότι η έκθεση ανθρώπων σε ανάπαυση για περίπου 30 λεπτά σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία παράγοντας έναν SAR σε όλο το σώμα με τιμές ανάμεσα στα 1 και 4 $W\,kg^{-1}$ οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του σώματος μικρότερη από 1 ^{o}C . Δεδομένα από ζώα δείχνουν ερεθισμό των αποκρίσεων συμπεριφοράς στο εύρος αυτό τιμών του SAR. Η έκθεση σε μεγαλύτερης έντασης πεδία, παράγοντας τιμές SAR μεγαλύτερες από 4$W\,kg^{-1}$, μπορεί να κατανικήσει τη θερμορυθμιστική ικανότητα του σώματος και να παράγει επιβλαβή επίπεδα θέρμανσης ιστών. Πολλές εργαστηριακές μελέτες με τρωκτικά ως πειραματόζωα και όχι ανθρώπους κατέδειξαν το μεγάλο εύρος καταστροφής ιστών ως αποτέλεσμα της θέρμανσης είτε μέρους είτε ολόκληρου του σώματος με θερμοκρασιακές αυξήσεις μεγαλύτερες από 1-2 ^{o}C . Η ευαισθησία των διαφόρων τύπων ιστών στη θερμική καταστροφή ποικίλλει, αλλά το κατώφλι για μη αναστρέψιμα αποτελέσματα ακόμα και στους πιο ευαίσθητους ιστούς είναι πάνω από 4 $W\,kg^{-1}$ υπό φυσιολογικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτά τα δεδομένα μορφοποιούν μια βάση για περιορισμό επαγγελματικής έκθεσης στα 0.4$W\,kg^{-1}$, η οποία παρέχει ένα μεγάλο περιθώριο ασφάλειας για άλλες περιοριστικές συνθήκες όπως είναι η υψηλή περιβαλλοντική θερμοκρασία, η υγρασία ή το επίπεδο φυσικής δραστηριότητας.

Ένας μεγάλος αριθμός μελετών των βιολογικών συνεπειών των διαμορφωμένων κατά πλάτος ηλεκτρομαγνητικών πεδίων διεξαγομένων κυρίως υπό χαμηλά επίπεδα έκθεσης, απέδωσαν τόσο θετικά όσο και αρνητικά αποτελέσματα. Μέσω της ανάλυσης των μελετών αυτών

παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα των ΑΜ πεδίων ποικίλλουν ανάλογα με τις παραμέτρους έκθεσης, τους τύπους των κυττάρων και των ιστών.

Προκειμένου όμως να εξασφαλιστεί η επικινδυνότητα ή μη συγκεκριμένων πεδίων απαιτείται ο καθορισμός οριακών τιμών έκθεσης καθώς και των τιμών ανάληψης δράσης για τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Αυτός γίνεται στο πρότυπο του ΕΛΟΤ 1422-3:2005 ‘’Συνεγκατάσταση κεραιών ραδιοεπικονωνιών-Μέρος 3:Τεχνικές δοκιμών και μετρήσεων – Όρια’’

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι βασικοί περιορισμοί του SAR για διάφορες τιμές συχνοτήτων (πίνακας 6) καθώς και τα επίπεδα αναφοράς τόσο για επαγγελματική έκθεση όσο και για έκθεση γενικού πληθυσμού. Επίπεδα αναφοράς όσον αφορά την έκθεση προβλέπονται για λόγους σύγκρισης με τις τιμές των μετρούμενων μεγεθών. Η τήρηση όλων των προτεινόμενων επιπέδων αναφοράς θα εξασφαλίσει τη τήρηση των βασικών περιορισμών.

Εάν οι μετρούμενες τιμές είναι μεγαλύτερες από τα επίπεδα αναφοράς, αυτό δεν σημαίνει αυτομάτως και υπέρβαση των βασικών περιορισμών. Στην περίπτωση αυτή, πρέπει να εκτιμηθεί το κατά πόσο τα επίπεδα έκθεσης είναι χαμηλότερα από τους βασικούς περιορισμούς.

Τα επίπεδα αναφοράς για τον περιορισμό της έκθεσης προέρχονται από τους βασικούς περιορισμούς, υπό συνθήκες μέγιστης σύζευξης του πεδίου με το εκτιθέμενο σε αυτό άτομο, παρέχοντας το μέγιστο βαθμό προστασίας. Στους επόμενους πίνακες παρέχεται μια σύνοψη των επιπέδων αναφοράς. Τα επίπεδα αναφοράς αποτελούν γενικά μέσες τιμές για όλο το σώμα του ατόμου, με τη σημαντική όμως προϋπόθεση ότι δε θα γίνεται υπέρβαση των βασικών περιορισμών τοπικής έκθεσης.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, όταν η έκθεση επικεντρώνεται σε ένα σημείο, όπως για παράδειγμα με τα κινητά τηλέφωνα και το ανθρώπινο κεφάλι, η χρήση των επιπέδων αναφοράς δεν ενδείκνυται. Στις περιπτώσεις αυτές, η συμμόρφωση με τους βασικούς περιορισμούς τοπικής έκθεσης πρέπει να αξιολογείται άμεσα.

Βασικοί περιορισμοί για χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία για συχνότητες μέχρι 10 GHz.

Πίνακας 6

Χαρακτηριστικά έκθεσης	Εύρος συχνοτήτων	Ένταση ρεύματος για το κεφάλι κ τον κορμό $(mA\,m^{-2})(rms)$	Μέσος SAR σε όλο το σώμα	Τοπικός SAR (κεφάλι κ κορμός) $W\,kg^{-1}$	Τοπικός SAR (άκρα) $W\,kg^{-1}$
Επαγγελματική έκθεση	μέχρι 1 Hz	40	--	--	--
	1-4 Hz	40/f	--	--	--
	4 Hz-1 kHz	10	--	--	--
	1-100 kHz	f/100	--	--	--
	100 kHz-10MHz	f/100	0.4	10	20
	10 MHz-10 GHz	--	0.4	10	20
Έκθεση γενικού πληθυσμού	μέχρι 1 Hz	8	--	--	--
	1-4 Hz	8/f	--	--	--
	4 Hz-1 kHz	2	--	--	--
	1-100 kHz	f/500	--	--	--
	100 kHz-10MHz	f/500	0.08	2	4
	10 MHz-10 GHz	--	0.08	2	4

Επίπεδα αναφοράς για επαγγελματική έκθεση σε χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία

Πίνακας 7

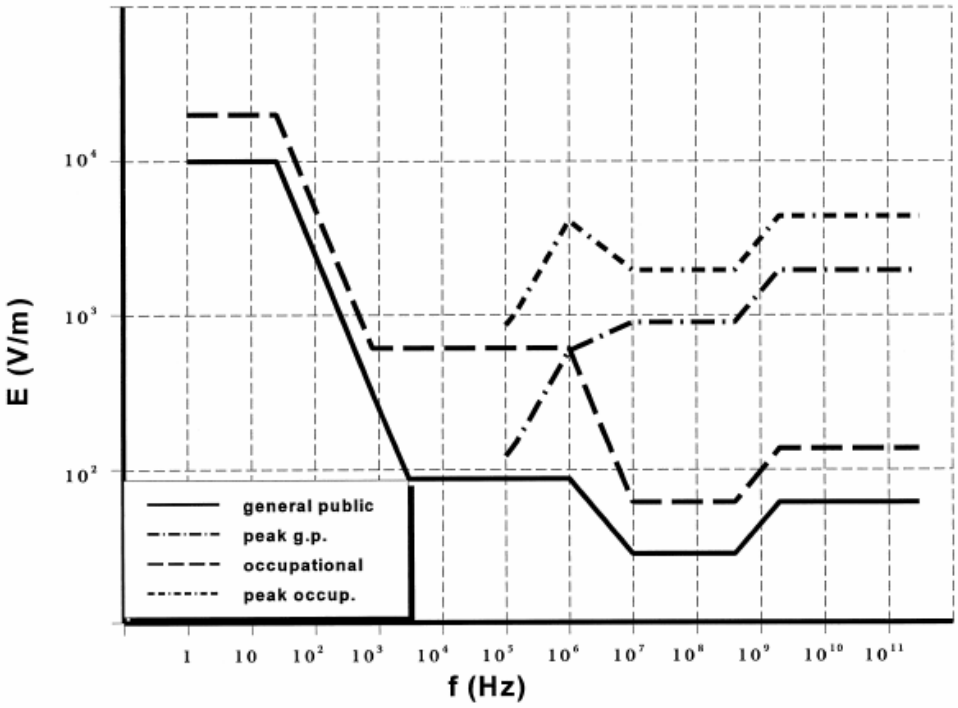
Εύρος συχνοτήτων	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου $(V\,m^{-1})$	Ένταση μαγνητικού πεδίου $(V\,m^{-1})$	Β-πεδίο (μΤ)	Ισοδύναμη ένταση ισχύος επίπεδου κύματος $S_{eq}\ (W\,m^{-2})$
μέχρι 1 Hz	--	$1.63\cdot10^5$	$2\cdot10^5$	--
1-8 Hz	20,000	$1.63\cdot10^5/f^2$	$2\cdot10^5/f^2$	--
8 Hz-25 Hz	20,000	$2\cdot10^4/f$	$2.5\cdot10^4/f$	--
0.025-0.82 kHz	500/*f*	20/*f*	25/*f*	--
0.82 kHz-65 kHz	610	24.4	30.7	--
0.065 -1 MHz	610	1.6/*f*	2.0/*f*	--
1 -10 MHz	610/*f*	1.6/*f*	2.0/*f*	--
10 - 400 MHz	61	0.16	0.2	10
400 - 2,000 MHz	$3f^{1/2}$	$0.008\,f^{1/2}$	$0.01\,f^{1/2}$	*f*/40
2 -300 GHz	137	0.36	0.45	50

Επίπεδα αναφοράς για έκθεση γενικού πληθυσμού σε χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία

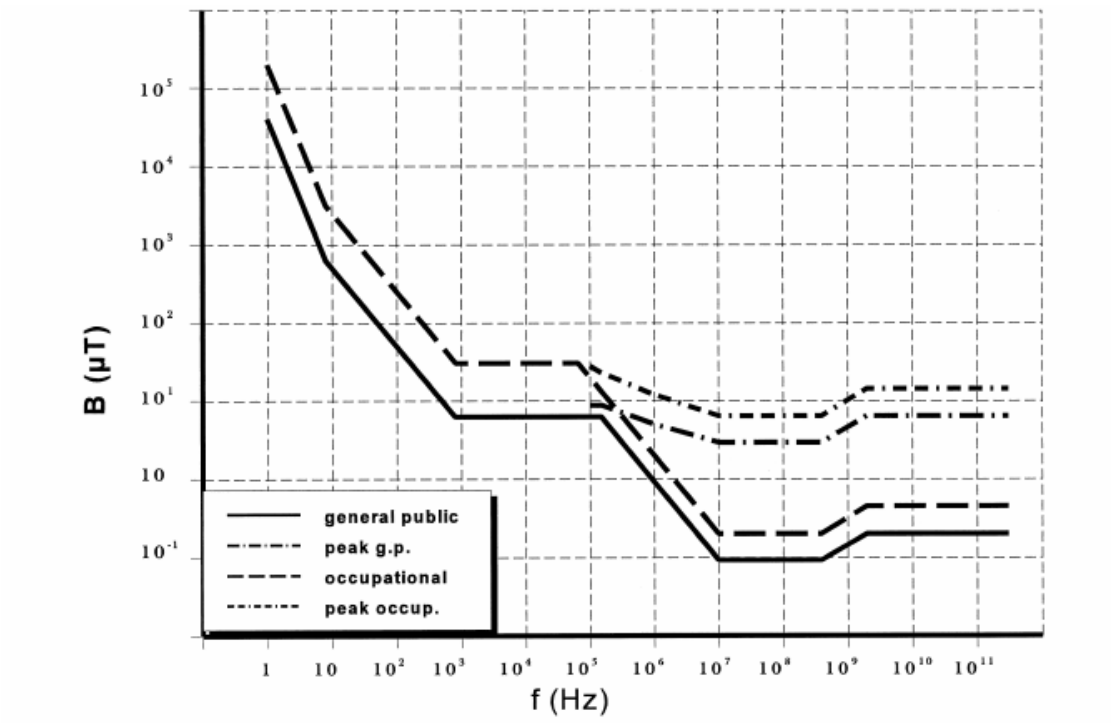
Πίνακας 8

Εύρος συχνοτήτων	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου $(V\,m^{-1})$	Ένταση μαγνητικού πεδίου $(V\,m^{-1})$	Β-πεδίο (μΤ)	Ισοδύναμη ένταση ισχύος επίπεδου κύματος $S_{eq}\ (W\,m^{-2})$
μέχρι 1 Hz	--	$3.2\cdot10^4$	$4\cdot10^4$	--
1-8 Hz	10,000	$3.2\cdot10^4/f^2$	$4\cdot10^4/f^2$	--
8 Hz-25 Hz	10,000	4,000/*f*	5,000/*f*	--
0.025-0.8 kHz	250/*f*	4/*f*	5/*f*	--
0.8 kHz-3 kHz	250/*f*	5	6.25	--
3 kHz-150 kHz	87	5	6.25	
0.15 -1 MHz	87	0.73/*f*	0.92/*f*	--
1 -10 MHz	$87/f^{1/2}$	0.73/*f*	0.92/*f*	--
10 - 400 MHz	28	0.073	0.092	2
400 - 2,000 MHz	$1.375\,f^{1/2}$	$0.0037\,f^{1/2}$	$0.0046\,f^{1/2}$	*f*/200
2 -300 GHz	61	0.16	0.20	10

Στα παρακάτω γραφήματα μπορούμε να δούμε τα συγκριτικά επίπεδα αναφοράς όπως προκύπτουν από τους πίνακες 2 και 3 για χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία.



Εικ.1 Επίπεδα αναφοράς για έκθεση σε χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία



Εικ.2 Επίπεδα αναφοράς για έκθεση σε χρονικά μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία

Περαιτέρω λεπτομέρειες των βασικών περιορισμών και επιπέδων αναφοράς για την έκθεση του ευρέως κοινού σε συχνότητες από 0 έως 300 GHz, περιλαμβάνονται στη σύσταση του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης ‘’Σχετικά με τον περιορισμό της έκθεσης του κοινού σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία 0 Hz – 300 GHz’’(L199, 1999/519/EC). Στη σύσταση αυτή οι βασικοί περιορισμοί για την έκθεση του κοινού στα εκπεμπόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, βασίστηκαν σε όλες τις μέχρι σήμερα αποδεδειγμένες επιδράσεις και έχουν οριστεί με μεγάλους συντελεστές ασφαλείας (μεγέθους περίπου 50) έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι αβεβαιότητες που υπάρχουν όσον αφορά την ατομική ευαισθησία, τις περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς και τις διαφορές σχετικά με την ηλικία και την κατάσταση υγείας του κοινού. Επίσης, πρέπει να υπογραμμιστεί πως τα επίπεδα αναφοράς που χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό της έκθεσης προέρχονται από τους βασικούς περιορισμούς, υπό συνθήκες μέγιστης σύζευξης του πεδίου με το εκτιθέμενο σε αυτό άτομο, παρέχοντας έτσι το μέγιστο βαθμό προστασίας.

Ταυτόχρονη έκθεση σε πολλαπλά πεδία συχνοτήτων

Η μέχρι τώρα ανάλυση που έγινε αφορούσε την έκθεση ατόμων σε πεδία χαρακτηριζόμενα από μια συγκεκριμένη συχνότητα. Στην προκειμένη εν τούτοις περίπτωση που εξετάζεται, η συνύπαρξη πομπών TETRA και GSM ή άλλων συστημάτων, επιβάλλει την περαιτέρω εξέταση της προσθετικότητας ή μη των συνεπειών τους. Είναι σημαντικό δηλαδή να καθοριστεί εάν, σε καταστάσεις πολλαπλής έκθεσης σε πεδία διαφορετικών συχνοτήτων, οι εκθέσεις αυτές προστίθενται ως προς τα αποτελέσματά τους.

Σύμφωνα με το δημοσίευμα ‘’Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields’’ η προσθετικότητα πρέπει να εξεταστεί ξεχωριστά για τα αποτελέσματα θερμικής ή ηλεκτρικής διέγερσης και οι βασικοί παρακάτω περιορισμοί πρέπει να ικανοποιούνται. Ο παρακάτω τύπος εφαρμόζεται σε σχετικές συχνότητες υπό πρακτικές καταστάσεις έκθεσης.

Για ηλεκτρική διέγερση, για συχνότητες μέχρι 10 MHz, οι επαγόμενες εντάσεις ρεύματος θα πρέπει να προστεθούν σύμφωνα με τον τύπο:

$$\sum_{i=1\ \mathrm{Hz}}^{10\ \mathrm{MHz}} \frac{J_i}{J_{L,i}} \leq 1.$$

Για θερμικά αποτελέσματα, για συχνότητες πάνω από 100 kHz, ο SAR και η ένταση ισχύος θα πρέπει να προστεθούν ως εξής:

$$\sum_{i=100\ \mathrm{kHz}}^{10\ \mathrm{GHz}} \frac{SAR_i}{SAR_L} + \sum_{i>10\ \mathrm{GHz}}^{300\ \mathrm{GHz}} \frac{S_i}{S_L} \leq 1,$$

J_i = η ένταση του ρεύματος επαγόμενη σε συχνότητα i

$J_{L,i}$ = ο περιορισμός για την ένταση ρεύματος στη συχνότητα i από πίνακα

SAR_i = ο SAR λόγω έκθεσης στη συχνότητα i

SAR_L = το όριο SAR από τον πίνακα

S_L = το όριο έντασης ισχύος από πίνακα

S_i = ένταση ισχύος στη συχνότητα i

Για πρακτικές εφαρμογές των βασικών περιορισμών τα ακόλουθα κριτήρια λαμβάνοντας υπόψη τα επίπεδα αναφοράς των ισχύων του πεδίου πρέπει να εφαρμοστούν.

Για επαγόμενη ένταση ρεύματος και για αποτελέσματα ηλεκτρικής διέγερσης, για συχνότητες μέχρι 10 Mz, οι ακόλουθες δύο απαιτήσεις πρέπει να εφαρμοστούν στα επίπεδα των πεδίων:

$$\sum_{i=1\ \mathrm{Hz}}^{1\ \mathrm{MHz}} \frac{E_i}{E_{L,i}} + \sum_{i>1\ \mathrm{MHz}}^{10\ \mathrm{MHz}} \frac{E_i}{a} \leq 1,$$

$$\sum_{j=1\ \mathrm{Hz}}^{65\ \mathrm{kHz}} \frac{H_j}{H_{L,j}} + \sum_{j>65\ \mathrm{kHz}}^{10\ \mathrm{MHz}} \frac{H_j}{b} \leq 1,$$

Όπου

E_i = η ένταση του ηλεκτρικό πεδίου σε συχνότητα i

$E_{L,i}$ = το επίπεδο αναφοράς ηλεκτρικού πεδίου από πίνακες 7 και 8

H_j = η ένταση μαγνητικού πεδίου σε συχνότητα j

$H_{L,j}$ = το επίπεδο αναφοράς μαγνητικού πεδίου από πίνακες 7 και 8

a = 610 $(V\,m^{-1})$ για επαγγελματική έκθεση και 87 $(V\,m^{-1})$ για έκθεση γενικού πληθυσμού και

b = 24.4 $(A\,m^{-1})$ ή 30.7 μT για επαγγελματική έκθεση και 5 $(A\,m^{-1})$ ή 6.25 μT για έκθεση γενικού πληθυσμού.

Οι σταθερές τιμές a και b χρησιμοποιούνται για συχνότητες πάνω από 1 MHz για το ηλεκτρικό πεδίο και πάνω από 65 kHz για το μαγνητικό πεδίο

γιατί το άθροισμα βασίζεται σε επαγόμενες ρευματικές εντάσεις και δε πρέπει να συγχέεται με θερμικές μελέτες.

Για θερμικές μελέτες, με συχνότητες πάνω από 100kHz, οι ακόλουθοι δύο περιορισμοί θα πρέπει να εφαρμοστούν στα επίπεδα των πεδίων.

$$\sum_{i=100\ \mathrm{kHz}}^{1\ \mathrm{MHz}} \left(\frac{E_i}{c}\right)^2 + \sum_{i>1\ \mathrm{MHz}}^{300\ \mathrm{GHz}} \left(\frac{E_i}{E_{L,i}}\right)^2 \leq 1,$$

$$\sum_{j=100\ \mathrm{kHz}}^{1\ \mathrm{MHz}} \left(\frac{H_j}{d}\right)^2 + \sum_{j>1\ \mathrm{MHz}}^{300\ \mathrm{GHz}} \left(\frac{H_j}{H_{L,j}}\right)^2 \leq 1,$$

Όπου

E_i = η ένταση του ηλεκτρικό πεδίου σε συχνότητα i

$E_{L,i}$ = το επίπεδο αναφοράς ηλεκτρικού πεδίου από πίνακες 7 και 8

H_j = η ένταση μαγνητικού πεδίου σε συχνότητα j

$H_{L,j}$ = το επίπεδο αναφοράς μαγνητικού πεδίου από πίνακες 7 και 8

a = 610 $(V\,m^{-1})$ για επαγγελματική έκθεση και 87/ $f^{1/2}$ $(V\,m^{-1})$ για έκθεση γενικού πληθυσμού και

b = 1.6/f $(A\,m^{-1})$ για επαγγελματική έκθεση και 0.73/f για έκθεση γενικού πληθυσμού.

2

Συστήματα Ασύρματων Επικοινωνιών

Τα συστήματα ασυρμάτων επικοινωνιών με τα οποία θα καταπιαστούμε στα πλαίσια της διπλωματικής μας αφορούν τα κλασσικά κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών (GSM, DCS, UMTS) καθώς και τα συστήματα για εφαρμογές έκτακτης ανάγκης (TETRA) ενώ θα κάνουμε αναφορά και στη νέα γενιά ασύρματων επικοινωνιών με τα δίκτυα WiMax. Αναλυτικότερα:

2.1 Global System for Mobile communications

Το παγκόσμιο σύστημα κινητών τηλεπικοινωνιών (GSM) είναι το πιο δημοφιλές πρότυπο για τα κινητά τηλέφωνα στον κόσμο. Τόσο το κανάλι ομιλίας όσο και αυτό της σηματοδοσίας είναι ψηφιακά το οποίο σημαίνει ότι θεωρείται ένα σύστημα κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς (2G). Το GSM είναι ένα κυψελωτό σύστημα, τα κινητά τηλέφωνα δηλαδή συνδέονται μαζί του ψάχνοντας για κυψέλες στη πιο κοντινή απόσταση. Λειτουργεί σε διάφορες ραδιοσυχνότητες. Το πιο σύνηθες είναι να λειτουργεί στα 900 MHz ή στα 1800 MHz (λέγεται DCS).Εκτός από τη ψηφιακή μετάδοση, το GSM ενσωματώνει πολλές προηγμένες υπηρεσίες και χαρακτηριστικά γνωρίσματα, συμπεριλαμβανομένης της συμβατότητας ISDN και παγκόσμια περιήγηση σε άλλα δίκτυα GSM. Το DCS 1800 είναι ένα παγκόσμιο σύστημα για τις κινητές επικοινωνίες, βασισμένο σε δίκτυο PCS που χρησιμοποιείται έξω από τις ΗΠΑ. Αυτό το σύστημα λειτουργεί στην περιοχή 1800MHz του φάσματος συχνότητας. Το ταξινομημένο κατά ζεύγος φάσμα βρίσκεται μεταξύ 1710MHz και 1785MHz για τη συχνότητα λειτουργίας άνω ζεύξης και 1805MHz και 1880MHz για τη συχνότητα λειτουργίας κάτω ζεύξης. Το διπλό διάστημα είναι 95MHz. Αυτό το φάσμα υποστηρίζει 374 κανάλια.

Υπηρεσίες που παρέχονται από το GSM

Το GSM σχεδιάστηκε έχοντας σαν στόχο τη διαλειτουργικότητα με το ISDN και έτσι οι υπηρεσίες που παρέχονται από το GSM είναι υποσύνολο των τυποποιημένων υπηρεσιών που παρέχονται από το ISDN. Η ομιλία είναι η πιο βασική, και η περισσότερο σημαντική, τηλεξυπηρέτηση που παρέχεται από το GSM. Επιπλέον, οι διάφορες υπηρεσίες δεδομένων υποστηρίζονται με ρυθμό μετάδοσης δυαδικών ψηφίων χρηστών μέχρι 9600bps. Επίσης υποστηρίζονται υπηρεσίες βιντεοτέξ και τελετέξ. Άλλες υπηρεσίες GSM περιλαμβάνουν μια υπηρεσία ραδιοφωνικής μετάδοσης κυψελών, όπου τα μηνύματα όπως οι εκθέσεις κυκλοφορίας, μεταδίδονται ραδιοφωνικά σε χρήστες σε συγκεκριμένες κυψέλες. Μια υπηρεσία μοναδική στο GSM είναι η υπηρεσία σύντομων μηνυμάτων που επιτρέπει στους χρήστες να λαμβάνουν και να στέλνουν αλφαριθμητικά μηνύματα μέχρι μερικές δεκάδες bytes. Είναι παρόμοια με τη σελιδοποίηση υπηρεσιών, αλλά περιεκτικότερη, επιτρέποντας αμφίδρομα μηνύματα, παράδοση μέσω αποθήκευσης και μεταβίβασης, και αναγνώριση επιτυχούς παράδοσης. Οι συμπληρωματικές υπηρεσίες ενισχύουν το σύνολο των βασικών τηλεξυπηρετήσεων. Κάποιες από αυτές είναι παραλλαγές της προώθησης κλήσεων ή της φραγής κλήσεων. Επίσης η ταυτόχρονη κλήση σε πολλούς χρήστες, η ενημέρωση για το κόστος κάθε κλήσης, η αναμονή κλήσης και η αναγνώριση κλήσεων.

Αρχιτεκτονική συστημάτων

Η λειτουργική αρχιτεκτονική ενός συστήματος GSM διαιρείται στο κινητό σταθμό, το υποσύστημα σταθμών βάσης, και το υποσύστημα δικτύων. Κάθε υποσύστημα αποτελείται από λειτουργικές οντότητες που επικοινωνούν μέσω διάφορων διασυνδέσεων χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα πρωτόκολλα.

Ο κινητός σταθμός στο GSM είναι πραγματικά δύο ευδιάκριτες οντότητες. Το υλικό είναι ο κινητός εξοπλισμός, ο οποίος είναι ανώνυμος. Οι πληροφορίες συνδρομητών, οι οποίες περιλαμβάνουν ένα μοναδικό προσδιοριστικό, αποκαλούμενο 'διεθνή κινητή ταυτότητα συνδρομητών' (IMSI), αποθηκεύονται στην ενότητα ταυτότητας συνδρομητών (SIM),

εφαρμοσμένη ως έξυπνη κάρτα. Με το να εισάγει την κάρτα SIM μέσα σε οποιοδήποτε κινητό εξοπλισμό GSM, ο χρήστης είναι σε θέση να πραγματοποιήσει και να λάβει κλήσεις στο τερματικό καθώς και να κάνει χρήση άλλων υπηρεσιών.

Το υποσύστημα σταθμών βάσης αποτελείται από δύο μέρη, το σταθμό πομποδεκτών βάσης (BTS) και τον ελεγκτή σταθμών βάσης (BCS). Το BTS στεγάζει τους ραδιοπομποδέκτες που καθορίζουν μια κυψέλη και χειρίζονται τα ραδιο-πρωτόκολλα διεπαφών (Um) με το κινητό σταθμό. Λόγω του ενδεχομένως μεγάλου αριθμού των BTS, οι απαιτήσεις για ένα BTS είναι η τραχύτητα, η αξιοπιστία, η φορητότητα, και το ελάχιστο κόστος. Ο ελεγκτής σταθμών βάσεων (BSC) διαχειρίζεται τους πόρους για ένα ή περισσότερα BTS. Αυτός διαχειρίζεται τα κανάλια διεπαφών καθώς επίσης και τις παραδόσεις.

Το κεντρικό συστατικό του υποσυστήματος δικτύων είναι το κινητό κέντρο εναλλαγής υπηρεσιών(MSC). Ενεργεί όπως ένας κανονικός κόμβος μετατροπής του PSTN ή του ISDN, ενώ παρέχει επιπλέον όλη την απαιτούμενη λειτουργία για το χειρισμό ενός κινητού συνδρομητή, συμπεριλαμβανομένου της εγγραφής, επικύρωσης, ενημέρωσης θέσης, παραδόσεων μέσω MSC, και δρομολόγησης κλήσης σε ένα περιπλανώμενο συνδρομητή. Αυτές οι υπηρεσίες παρέχονται μαζί με τέσσερις ευφυείς βάσεις δεδομένων, οι οποίες μαζί με το MSC αποτελούν το υποσύστημα δικτύων. Το MSC παρέχει επίσης σύνδεση στα δημόσια σταθερά δίκτυα. Ο καταχωρητής εγχώριας θέσης (HLR) περιέχει όλες τις διοικητικού χαρακτήρα πληροφορίες κάθε συνδρομητή που εγγράφεται στο GSM δίκτυο, μαζί με την τρέχουσα θέση του συνδρομητή. Η θέση βοηθά στη δρομολόγηση εισερχόμενων κλήσεων στο κινητό, και είναι χαρακτηριστικά η SS7 διεύθυνση του επισκεπτόμενου MSC. Υπάρχει λογικά ένα HLR ανά δίκτυο GSM, αν και μπορεί να εφαρμοστεί ως διανεμημένη βάση δεδομένων. Ο καταχωρητής θέσης επισκεπτών περιέχει επιλεγμένες διοικητικές πληροφορίες από τον HLR απαραίτητες για τον έλεγχο κλήσεων και παροχή προσυπογραμμένων υπηρεσιών, για κάθε κινητό προσωρινά τοποθετημένο στη γεωγραφική περιοχή ελεγχόμενη από το VLR. Αν και το VLR μπορεί να εφαρμοστεί σαν ανεξάρτητη μονάδα, μέχρι σήμερα όλοι οι

κατασκευαστές του εξοπλισμού μετατροπής εφαρμόζουν το VLR μαζί με το MSC, έτσι ώστε η γεωγραφική περιοχή που ελέγχεται από το MSC να αντιστοιχεί σε αυτήν που ελέγχεται από το VLR. Η εγγύτητα των πληροφοριών VLR στο MSC επιταχύνει την πρόσβαση στις πληροφορίες που το MSC απαιτεί κατά τη διάρκεια μιας κλήσης. Οι άλλοι δύο καταχωρητές χρησιμοποιούνται για την επικύρωση και για λόγους ασφάλειας. Ο καταχωρητής ταυτότητας εξοπλισμού (EIR) είναι μια βάση δεδομένων που περιέχει έναν κατάλογο όλου του έγκυρου κινητού εξοπλισμού στο δίκτυο, όπου κάθε κινητός εξοπλισμός προσδιορίζεται από τη Διεθνή Ταυτότητα Κινητού Εξοπλισμού (IMEI). Ένας IMEI χαρακτηρίζεται ως άκυρος εάν έχει αναφερθεί κλεμμένος ή δεν είναι τύπος εγκεκριμένος. Το κέντρο επικύρωσης (AuC) είναι μια προστατευμένη βάση δεδομένων που αποθηκεύει ένα αντίγραφο του μυστικού κλειδιού που αποθηκεύεται σε κάθε μια κάρτα SIM του συνδρομητή, που χρησιμοποιείται για την επικύρωση στο ράδιο-κανάλι.

Ραδιοφάσμα

Το ραδιοφάσμα για τα κινητά δίκτυα στην Ευρώπη έχει κρατηθεί στις ζώνες 890-915 MHz για την άνω ζεύξη και 935-960 MHz για τη κάτω ζεύξη. Τουλάχιστον 10 MHz σε κάθε ζώνη είχαν κρατηθεί για το GSM. Αυτό το φάσμα των 2x25 MHz διαιρείται σε συχνότητες φέροντος των 200 kHz που χρησιμοποιούν FDMA. Μία ή περισσότερες συχνότητες φέροντος ορίζονται σε μεμονωμένους σταθμούς βάσεων, και κάθε φέρον διαιρείται σε οκτώ χρονοσχισμές που χρησιμοποιούν TDMA. Ομάδες από οκτώ διαδοχικές χρονοσχισμές σχηματίζουν πλαίσια TDMA διάρκειας 4.615ms. Ένα κανάλι μετάδοσης καταλαμβάνει μία θέση χρονοσχισμής μέσα σε ένα πλαίσιο TDMA. Πλαίσια TDMA μίας συγκεκριμένης συχνότητας φέροντος αριθμούνται, και έτσι τόσο ο κινητός σταθμός όσο και ο σταθμός βάσης είναι συγχρονισμένοι σε αυτό τον αριθμό. Τα μεγαλύτερα πλαίσια διαμορφώνονται από ομάδες των 26 και 51 πλαισίων TDMA (υπάρχουν επίσης μεγαλύτερες ομάδες), και η θέση μέσα σε τέτοια πλαίσια καθορίζει τον τύπο και τη λειτουργία του κάθε καναλιού.

Κωδικοποίηση ομιλίας και καναλιών

Η ομιλία στο GSM κωδικοποιείται ψηφιακά με ρυθμό 13 kbps. Αυτό είναι αρκετά αποδοτικό συγκρινόμενο με το τυποποιημένο ρυθμό για το ISDN που είναι 64 kbps. Μία από τις σημαντικότερες προσθήκες θα είναι η εισαγωγή ενός half-rate λεκτικού κωδικοποιητή που λειτουργεί περίπου στα 7 kbps, που οδηγεί αποτελεσματικά σε διπλασιασμό της ικανότητας ενός δικτύου. Η ψηφιακή TDMA φύση του σήματος επιτρέπει αρκετές διαδικασίες που στοχεύουν στη βελτίωση της ποιότητας μετάδοσης, στην αύξηση της ζωής της μπαταρίας του κινητού, και στη βελτίωση της αποδοτικότητας φάσματος. Αυτές περιλαμβάνουν την ασυνεχή μετάδοση, το hopping συχνότητας και την ασυνεχή υποδοχή κατά το έλεγχο του καναλιού σελιδοποίησης. Ένα άλλο χαρακτηριστικό γνώρισμα που χρησιμοποιείται από το GSM είναι ο έλεγχος ισχύος, ο οποίος προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει την ισχύ μετάδοσης των κινητών και τους BTS, και έτσι ελαχιστοποιεί το ποσό των διακαναλικών παρεμβολών που παράγονται. Η διαμόρφωση που χρησιμοποιείται στο GSM είναι γκαουσσιανή διαμόρφωση ελάχιστης μετατόπισης (GMSK), ένα είδος διαμόρφωσης μετατόπισης συχνότητας συνεχούς φάσης. Στη GMSK, το σήμα που διαμορφώνεται επάνω στο μεταφορέα ομαλοποιείται αρχικά με ένα γκαουσσιανό βαθυπερατό φίλτρο πριν τοποθετηθεί σε έναν διαμορφωτή συχνότητας, ο οποίος μειώνει πολύ την παρεμβολή στα γειτονικά κανάλια.

Ισχύς εκπομπής

Η ισχύς εκπομπής στο ακουστικό του τηλεφώνου περιορίζεται στα 2 Watt το μέγιστο για το GSM 850/900 και 1 Watt το μέγιστο για το GSM1800/1900. Υπάρχουν τέσσερα διαφορετικά μεγέθη κυψελών σε ένα δίκτυο GSM – μακροκυψέλες, μικροκυψέλες , πικοκυψέλες και κυψέλες ομπρελών. Η περιοχή κάλυψης κάθε κυψέλης ποικίλλει σύμφωνα με το περιβάλλον εφαρμογής. Οι μακροκυψέλες μπορούν να θεωρηθούν ως κυψέλες όπου η κεραία του σταθμού βάσης εγκαθίσταται σε έναν ιστό ή ένα κτίριο επάνω από τη μέση στάθμη οροφής. Οι μικροκυψέλες είναι κυψέλες των οποίων το ύψος κεραιών είναι κάτω από τη μέση στάθμη οροφής και χρησιμοποιούνται χαρακτηριστικά στις αστικές περιοχές. Οι πικοκυψέλες είναι μικρές κυψέλες η διάμετρος των οποίων είναι μερικές

δωδεκάδες μέτρα και χρησιμοποιούνται κυρίως στο εσωτερικό ενός χώρου. Από την άλλη μεριά, τα κύτταρα ομπρελών χρησιμοποιούνται για να καλύψουν τις σκιαγμένες περιοχές των μικρότερων κυττάρων και να καλύψουν τα χάσματα στην κάλυψη μεταξύ εκείνων των κυψελών. Η ακτίνα κυψελών ποικίλλει ανάλογα με το ύψος κεραιών, το κέρδος κεραιών και τις συνθήκες διάδοσης από μερικές εκατοντάδες μέτρα σε μερικές δεκάδες χιλιόμετρα. Η μεγαλύτερη απόσταση που η προδιαγραφή GSM υποστηρίζει σε πρακτική χρήση είναι 35 χιλιόμετρα ή 22 μίλια.

2.2 Universal Mobile Telecommunications System

Ο όρος UMTS προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων "Universal Mobile Telecommunications System" (Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών). Πρόκειται για την εξέλιξη σε σχέση με την χωρητικότητα, την ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων και την ύπαρξη νέων υπηρεσιών, των κινητών δικτύων δεύτερης γενιάς. Σήμερα, περισσότερα από εξήντα 3G/UMTS δίκτυα που χρησιμοποιούν την WCDMA τεχνολογία λειτουργούν σε 25 χώρες. Για την οργάνωση του όλου εγχειρήματος έχει θεσπιστεί ειδικός μη κερδοσκοπικός οργανισμός με την ονομασία Third Generation Partnership Project (3GPP) του οποίου μέλημα είναι η παρακολούθηση και η καθοδήγηση των εξελίξεων στη συγκεκριμένη τεχνολογική περιοχή. Ανάμεσα στα πλεονεκτήματα των UMTS δικτύων ξεχωρίζουμε τους αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης των δεδομένων και την ταυτόχρονη υποστήριξη μεγαλύτερου όγκου δεδομένων και φωνής. Πιο συγκεκριμένα, το UMTS δίκτυο στην αρχική του φάση, θεωρητικά προσφέρει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως και 384 kbps σε περιπτώσεις όπου παρατηρείται αυξημένη κινητικότητα του χρήστη. Αντίθετα, όταν ο χρήστης παραμένει ακίνητος οι ρυθμοί μετάδοσης αυξάνουν κατά πολύ φθάνοντας την τιμή των 2 Mbps.

Εκτιμάται ότι στο μέλλον θα υπάρξει περαιτέρω αύξηση των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων. Ήδη, ο 3GPP έχει θέσει σαν standard δύο νέες τεχνολογίες. Πρόκειται για το High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) και το High Speed Uplink Packet Access (HSUPA) αντίστοιχα. Οι συγκεκριμένες τεχνολογίες ουσιαστικά αποτελούν εξέλιξη του UMTS, αφού

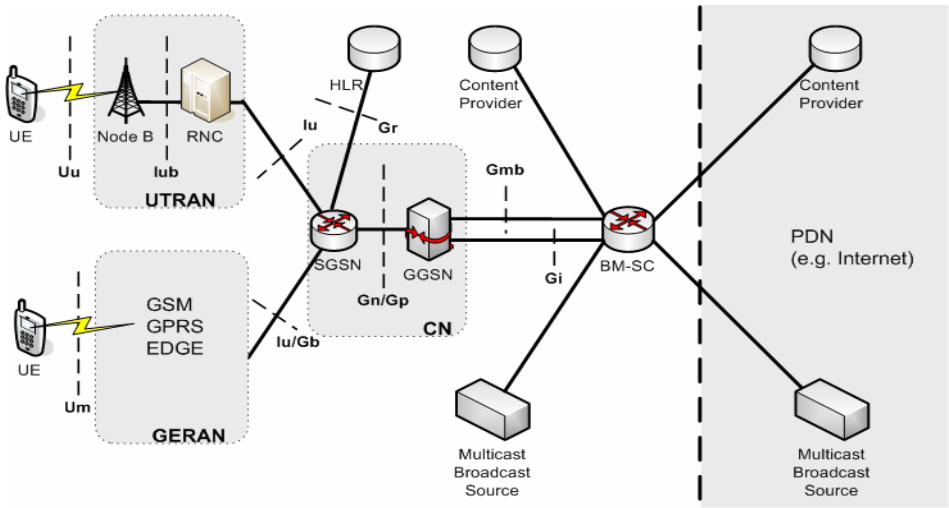
υπόσχονται ρυθμούς μετάδοσης των δεδομένων έως και 14,4 Mbps στο downlink και 5.8 Mbps στο uplink.

Αρχιτεκτονική

Ένα δίκτυο UMTS αποτελείται από δύο βασικές οντότητες:
i) το δίκτυο κορμού (CN - core network) και
ii) το δίκτυο επίγειας ασύρματης πρόσβασης (UTRAN - UMTS terrestrial radio-access network). Το δίκτυο κορμού είναι υπεύθυνο για την δρομολόγηση των τηλεφωνημάτων καθώς και για τις συνδέσεις για μεταφορά δεδομένων με εξωτερικά δίκτυα. Αντίθετα, το UTRAN είναι υπεύθυνο για οτιδήποτε σχετίζεται με το ασύρματο μέρος του δικτύου.

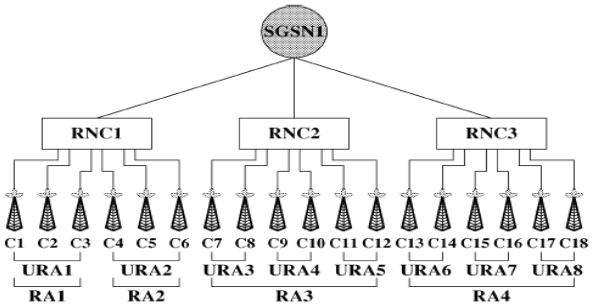
Το CN αποτελείται από δύο domain:
α) circuit -switched (CS - μεταγωγή κυκλώματος) και
β) packet-switched (PS - μεταγωγή πακέτου).

Το CS domain παρέχει πρόσβαση στο PSTN/ISDN , ενώ το PS domain παρέχει πρόσβαση στα IP δίκτυα. Το PS μέρος του UMTS δικτύου αποτελείται από δύο GPRS κόμβους υποστήριξης: τον gateway GPRS support node (GGSN) και τον serving GPRS support node (SGSN). Ο GGSN συνδέεται με τον SGSN μέσω της διεπαφής Gn και με το UTRAN μέσω της διεπαφής Iu. Το UTRAN αποτελείται από τον ελεγκτή ασύρματης πρόσβασης (RNC - radio network controller) και το Node B το οποίο αποτελεί την βάση που προσφέρει κάλυψη στο αντίστοιχο κελί. Το Node B συνδέεται με τον εξοπλισμό του χρήστη (user equipment - UE) μέσω της διεπαφής Uu (βασισμένο στην τεχνολογία W-CDMA) και με το RNC μέσω της διεπαφής Gi . Επιπλέον, υπάρχει και ένας άλλος κόμβος σχετιζόμενος με τις υπηρεσίες broadcast/multicast (BM-SC - broadcast/multicast service center), ο οποίος λειτουργεί σαν το σημείο εισόδου για την παραλαβή των δεδομένων για εσωτερικές πηγές. Τα παραπάνω παρουσιάζονται καλύτερα στο σχήμα που ακολουθεί:



Προτού ένας χρήστης είναι σε θέση να ανταλλάξει δεδομένα με ένα εξωτερικό PDN (Public Data Network), πρέπει να εγκαθιδρύσει μία εικονική σύνδεση με αυτό το PDN. Από την στιγμή που ο συγκεκριμένος κινητός χρήστης γίνει γνωστός στο δίκτυο, τα πακέτα μεταφέρονται μεταξύ αυτού και του δικτύου, βασισμένα στο packet data protocol (PDP), το οποίο αποτελεί το πρωτόκολλο του επιπέδου δικτύου του UMTS. Ένα στιγμιότυπο του PDP ονομάζεται PDP context και περιέχει όλες τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν τη σύνδεση με το εξωτερικό δίκτυο όπως τις διευθύνσεις αποστολέα και παραλήπτη καθώς και την ποιότητα της υπηρεσίας. Ένα PDP context εγκαθιδρύεται για όλες τις εφαρμογές που κατευθύνονται προς ή προέρχονται από μία IP διεύθυνση. Μία ενεργοποίηση ενός PDP context ουσιαστικά αποτελεί μία διαδικασία αίτησης - απάντησης μεταξύ του κινητού χρήστη (UE) και του GGSN. Μία επιτυχής PDP context ενεργοποίηση οδηγεί στην δημιουργία δύο GPRS tunneling protocol (GTP) συνόδων για τον εκάστοτε χρήστη. Η πρώτη GTP σύνοδος δημιουργείται μεταξύ του GGSN και του SGSN πάνω από την διεπαφή Gn, ενώ η δεύτερη δημιουργείται μεταξύ του SGSN και του RNC πάνω από την διεπαφή Iu. Τα IP πακέτα τα οποία προορίζονται για μία εφαρμογή, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα GTP contexts, προσαρτώνται σε αυτά και μέσω του PDP μεταφέρονται στο αντίστοιχο SGSN. Το SGSN ανακτά τα IP πακέτα, ζητά το κατάλληλο PDP context βασισμένο στο UE και στο PDP και προωθεί τα πακέτα στο κατάλληλο RNC. Παράλληλα, το RNC διατηρεί έναν φορέα ασύρματης πρόσβασης (RAB - radio access bearer). Αντίστοιχα με τα PDP context, ένα RAB context επιτρέπει στο RNC να ανακτήσει την ταυτότητα

του αποστολέα που έχει συσχετιστεί με ένα GTP. Αφού πλέον, το RNC έχει ανακτήσει το πακέτο, το προωθεί στο κατάλληλο Node B. Τέλος, χρησιμοποιείται ένας tunnel endpoint identifier (TEID) στις διεπαφές Gn και Iu έτσι ώστε να μπορεί να αναγνωριστεί το τέλος του tunnel στον κόμβο που δέχεται τα πακέτα.



Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η διαχείριση της κινητικότητας των UE παρουσιάζεται στο αντίστοιχο σχήμα. Έτσι λοιπόν, στο PS domain του UMTS, τα κελιά ομαδοποιούνται σε περιοχές δρομολόγησης (RAs - routing areas), ενώ τα κελιά σε μία περιοχή δρομολόγησης χωρίζονται περαιτέρω σε UTRAN registration areas (URAs). Επιπλέον, η διαχείριση της κινητικότητας (MM - mobility management) των κινητών χρηστών χαρακτηρίζεται από δύο μηχανές πεπερασμένων καταστάσεων: την μηχανή διαχείρισης της κινητικότητας (MM) και την radio resource control (RRC). Η μηχανή packet MM (PMM) του PS domain του UMTS εκτελείται μεταξύ του SGSN και του UE και είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο στο επίπεδο του CN, ενώ η μηχανή RRC εκτελείται μεταξύ του UTRAN και του UE και είναι υπεύθυνη για τον σχετικό έλεγχο στο επίπεδο του UTRAN. Πιο συγκεκριμένα λοιπόν, αφότου ένα UE συνδεθεί στο PS domain, η μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων PMM βρίσκεται σε μία από τις εξής δύο καταστάσεις: PMM idle ή PMM connected. Αντίστοιχα η μηχανή RRC μπορεί να βρίσκεται σε μία από τις εξής τρεις καταστάσεις: RRC idle, RRC cell - connected και RRC URA connected. Σημειώνεται ότι όταν δεν υπάρχει ροή δεδομένων μεταξύ του UE και του CN, το UE βρίσκεται στις καταστάσεις PMM idle και RRC idle αντίστοιχα. Στην περίπτωση αυτή το UTRAN δεν έχει καμία πληροφορία για το UE και το UE παρακολουθείται μόνο από το αντίστοιχο SGSN στο επίπεδο RA. Όταν ύστερα ξεκινήσει μία σύνδεση μεταξύ του UE και του SGSN, το UE μεταβαίνει στην κατάσταση PMM

connected. Από την στιγμή που η σύνδεση στο PS λάβει χώρα, αυτόματα ξεκινά και μία RRC σύνδεση μεταξύ του UE και του αντίστοιχου RNC που το εξυπηρετεί. Σε αυτή την περίπτωση η RRC μηχανή για το συγκεκριμένο UE μεταβαίνει στην κατάσταση RRC cell - connected. Όταν κάτι τέτοιο συμβεί, το SGSN παρακολουθεί το UE με ακρίβεια μέσω του αντίστοιχου RNC που εξυπηρετεί το UE. Το συγκεκριμένο RNC είναι υπεύθυνο να παρακολουθεί το κελί όπου το UE βρίσκεται κάθε στιγμή. Σημειώνεται ότι τα πακέτα μπορούν να ληφθούν από το UE μόνο όταν βρίσκεται σε αυτή την κατάσταση. Στην PMM connected/RRC cell - connected κατάσταση, αν το UE δεν έχει μεταδώσει/λάβει πακέτα για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, η RRC μηχανή μεταβαίνει στην κατάσταση RRC URA connected. Σε αυτή την περίπτωση, η RCC σύνδεση διατηρείται ακόμη, ενώ το UE παρακολουθείται από το RNC που το εξυπηρετεί. Η συγκεκριμένη μετάβαση δεν επηρεάζει καθόλου την κατάσταση της PMM μηχανής για το συγκεκριμένο UE. Στην PMM connected / RRC URA connected κατάσταση, αν το UE μεταδώσει/λάβει ένα πακέτο, η RRC μηχανή μεταβαίνει πάλι στην κατάσταση RRC cell - connected. Αντίθετα, αν οι πόροι για τις συνδέσεις στο PS και RRC επίπεδο αποδεσμευτούν (για παράδειγμα όταν μία σύνοδος επικοινωνίας ολοκληρωθεί) ή αν κανένα πακέτο δεν έχει μεταδοθεί για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, η RRC μηχανή αρχικά μεταβαίνει στην RRC cell - connected κατάσταση και μετά στην RRC idle κατάσταση. Σε αυτή την περίπτωση, η PMM μηχανή αντίστοιχα μεταβαίνει στην PMM idle κατάσταση. Τέλος, όταν ένα UE δεν μπορεί να εντοπιστεί από το δίκτυο, η κατάστασή του χαρακτηρίζεται σαν PMM detached.

2.3 TErrestial Trunked RAdio

Το TETRA είναι ένα ανοικτό πρότυπο ψηφιακού συγκαναλικού ραδιοσυστήματος το οποίο προδιαγράφεται από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακής Τυποποίησης (ETSI) για να ικανοποιήσει τους πιο απαιτητικούς επαγγελματίες χρήστες κινητών ραδιοσυστημάτων.

Το TETRA αποτελεί την πιο σύγχρονη λύση στα επίγεια συγκαναλικά ραδιοσυστήματα για χρήση ως Κινητό Ραδιοσύστημα Δημόσιας Πρόσβασης (PAMR) ή Κινητό Ραδιοσύστημα Ιδιωτικής Χρήσης (PMR) προσφέροντας περισσότερα χαρακτηριστικά από ότι έχει ποτέ προσφερθεί στον τομέα των

PAMR και PMR και πολλά σημαντικά χαρακτηριστικά που δεν μπορούν να υποστηριχθούν από άλλα κυψελωτά δίκτυα, όπως Ομαδική κλήση (ένας προς πολλούς), δυνατότητες Διεκπεραιωτή, κρυπτοφώνηση / κρυπτογράφηση στη ραδιοεπαφή, κρυπτοφώνηση / κρυπτογράφηση από άκρο σε άκρο, ταυτόχρονη ραδιοεπικοινωνία φωνής και δεδομένων, Αμεσότροπη λειτουργία (Walkie - Talkie), όπως και δυνατότητες διαχείρισης δικτύου και τιμολόγησης. Το σύστημα TETRA έρχεται έτσι ουσιαστικά να εξυπηρετήσει όσους επιθυμούν απρόσκοπτη επικοινωνία, ανεπηρέαστη από φυσικούς παράγοντες και από τις συνθήκες φόρτου του δικτύου. Η τεχνολογία της κινητής τηλεφωνίας GSM μας έδειξε ότι ο μεγάλος φόρτος τηλεφωνικών κλήσεων οδηγεί τις χωρητικότητες του δικτύου στα άκρα, με αποτέλεσμα πάρα πολλοί συνδρομητές να μένουν «εκτός» σε συνθήκες αυξημένης χρήσης. Το σύστημα επικοινωνίας TETRA έρχεται λοιπόν να καλύψει τα κενά του δικτύου GSM, προσφέροντας αδιάκοπη επικοινωνία, κάτω από οποιεσδήποτε περιστάσεις.

Το TETRA περιλαμβάνει εκτεταμένη σειρά προϊόντων, όπως σταθμούς βάσης, κέντρα μεταγωγής, εργαλεία διαχείρισης και λειτουργίας, κινητά, φορητά τερματικά και διακομιστές. Όλα έχουν την ικανότητα να επαναπρογραμματιστούν απλά και εύκολα όποτε υπάρχει αναβάθμιση του συστήματος ή για ικανοποίηση μελλοντικών απαιτήσεων καθώς αναπτύσσεται νέα τεχνολογία. Η μελλοντική αναβάθμιση και επέκταση του συστήματος γίνεται χωρίς να διακοπεί η λειτουργία του δικτύου, καθώς οι λειτουργίες του συστήματος εκτελούνται από software.

Ένα σύστημα TETRA μπορεί να διαβαθμιστεί από ένα Κέντρο Μεταγωγής το οποίο καλύπτει μια μεγάλη περιοχή μέχρι πολλαπλά Κέντρα Μεταγωγής με εθνική κάλυψη. Μπορεί εύκολα να επεκταθεί με επιπρόσθετα Κέντρα Μεταγωγής, Σταθμούς Βάσης, επιπρόσθετα κανάλια, Διακομιστές και άλλους πόρους, όπου χρειάζονται. Τα συστήματα TETRA μπορούν να εξυπηρετήσουν διαφορετικές ομάδες χρηστών με τους ίδιους πόρους. Αυτές οι ομάδες μπορούν να έχουν το δικό τους Ιδεατό Ιδιωτικό Δίκτυο - Virtual Network- με δικό τους διακομιστή και λειτουργίες διαχείρισης δικτύου. Κατά αυτόν τον τρόπο επιτρέπεται σε κάθε οργάνωση-χρήστη να λειτουργεί το δίκτυο ανεξάρτητα, έχοντας τη δυνατότητα να επικαλείται

όλα τα πλεονεκτήματα ενός μεγάλου δικτύου με όλες τις υπηρεσίες. Καθώς θα καταλαμβάνουν μέρη του ίδιου φυσικού δικτύου, τα Ιδεατά Ιδιωτικά Δίκτυα είναι αθέατα και μη προσβάσιμα σε άλλους χρήστες του δικτύου.

Το TETRA παρέχει αφθονία εφαρμογών, βασισμένες στους μηχανισμούς μεταφοράς βραχέων δεδομένων (SDS) και δεδομένων IP (PD), όπως Αυτόματο Εντοπισμό και Διαχείριση Στόλου Οχημάτων με την ταυτόχρονη χρήση GPS, Ασύρματη Πρόσβαση σε Βάσεις Δεδομένων, Ασύρματο Internet, εφαρμογές SCADA, που ήδη εφαρμόζονται και χρησιμοποιούνται από τους περισσότερους διαχειριστές δικτύων TETRA.

Το TETRA είναι το μοναδικό πρότυπο του ETSI για ψηφιακές συγκαναλικές ραδιοεπικοινωνίες. Ικανοποιεί τις πιο απαιτητικές ανάγκες διαλειτουργικότητας του χρήστη, σε ένα πραγματικά αυτόνομο περιβάλλον αρκετών κατασκευαστών τερματικών και υποδομής δικτύου με πολλαπλά οφέλη τόσο για το χρήστη όσο και για την ανάπτυξη και ωρίμανση της τεχνολογίας.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Το TETRA χρησιμοποιεί Πολλαπλή Προσπέλαση Διαίρεσης Χρόνου (TDMA) με τέσσερα κανάλια διεμπλεγμένα σε ένα φορέα με 25 kHz διαπόσταση. Εξαιτίας του διεμπλέγματος έχουμε εξοικονόμηση κόστους διότι απαιτείται μόνο μια ραδιοκυματική μονάδα για κάθε τέσσερα κανάλια. Η πλαισιοδομή του TETRA έχει τέσσερις χρονοθυρίδες σε κάθε TDMA πλαίσιο. Κάθε πολυπλαίσιο περιέχει 18 TDMA πλαίσια. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μεταφορά τόσο point-to-point όσο και point-to-multipoint. Η μετάδοση ψηφιακών δεδομένων, αν και με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης, περιλαμβάνεται επίσης στο πρότυπο του TETRA.

Οι Κινητοί Σταθμοί του TETRA μπορούν να επικοινωνήσουν με απευθείας τρόπο ή χρησιμοποιώντας υποδομή φτιαγμένη από τους σταθμούς βάσης του TETRA. Παρέχεται η δυνατότητα όχι μόνο απευθείας επικοινωνίας σε καταστάσεις όπου η κάλυψη δικτύου έχει χαθεί αλλά και χρήσης ενός (ή μιας αλυσίδας) τερματικών TETRA για αναμετάδοση σήματος. Σε καταστάσεις διάσωσης αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να επιτρέψει

απευθείας επικοινωνίες κάτω από το έδαφος ή σε περιοχές με κακή κάλυψη.

Στην Ευρώπη το TETRA χρησιμοποιεί τις ακόλουθες συχνότητες:

Civil Systems			**Emergency Systems**		
Number	**Frequency Pair (MHz)**		**Number**	**Frequency Pair (MHz)**	
	Band 1	Band 2		Band 1	Band 2
1	410-420	420-430	1	380-383	390-393
2	870-876	915-921	2	383-385	393-395
3	450-460	460-470			
4	385-390	395-399.9			

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του TETRA επομένως μπορούν να συνοψισθούν στα ακόλουθα:
Διαφορά συχνότητας : 10 MHz
Διαυλοποίηση : 25 kHz
Διαμόρφωση : P1/4DQPSK
Ρυθμός μετάδοσης φωνής και δεδομένων χωρίς προστασία : 7,2 kbps/ts
Ρυθμός μετάδοσης φωνής και δεδομένων με χαμηλή προστασία : 4,8 kbps/ts
Ρυθμός μετάδοσης φωνής και δεδομένων με υψηλή προστασία : 2,4 kbps/ts
Πολυπλεξία ραδιοσυστήματος : TDMA, 4time slots
Χρόνος αποκατασκευής κλήσεως : <300 msec
Ισχύς εξόδου Σταθμού Βάσης (antenna port) : μέχρι 25W (44dBm) ανά πομποδέκτη
Ευαισθησία δέκτη σταθμού βάσης : -116 dBm (στατικά)-107 dBm (δυναμικά)
Το TETRA απευθύνεται κυρίως σε παροχείς Δημόσιων Υπηρεσιών, σε Οργανισμούς Δημόσιας Ασφάλειας (Αστυνομία, Νοσοκομειακά, Πυροσβεστική, Λιμενικό, Τελωνεία κ.α.), σε Μεταφορικά Μέσα (Αεροδρόμια, Σιδηροδρομικοί Σταθμοί, Αστικές Μεταφορές κ.α.) καθώς και Εμπορικά Δίκτυα (Μεταφορικές Εταιρείες, Ταξί, Δήμους, Βιομηχανίες, Πετρελαιαγωγούς, Αγωγούς Φυσικού Αερίου κ.α.)

Υπηρεσίες

Το σύστημα TETRA περιλαμβάνει πλήθος υπηρεσιών φωνής και δεδομένων και συμπληρωματικών υπηρεσιών, όπως:

Υπηρεσίες Φωνής
- Ομαδική κλήση (group call)
- Ευρυεκπομπή (multiselect, multigroup)
- Ατομική κλήση (private call)
- Κλήση επείγουσας ανάγκης (High priority)
- Κλήση από/προς PABX, PSTN, GSM

Υπηρεσίες δεδομένων
- Κλήση κατάστασης (status message)
- Κλήση επείγουσας ανάγκης
- Κλήση βραχέων δεδομένων (SDS)
- Κλήση αλφαριθμητικού κειμένου (ATS)
- Κλήση δεδομένων (Packet Data)

Συμπληρωματικές Υπηρεσίες
- Κλήση προτεραιότητας (Priority call)
- Όψιμη είσοδος (Late Entry)
- Αναγνώριση ομιλούντος (TPI)
- Δυναμική Εκχώρηση Αριθμού Ομάδας (Dynamic Group Number Assignment)
- Φραγή εισερχομένων κλήσεων
- Φραγή εξερχομένων κλήσεων

Συσκευές

Τα περισσότερα τερματικά νέας γενιάς TETRA διαφέρουν ελάχιστα από ένα τυπικό κινητό τηλέφωνο GSM. Στις συσκευές αυτές συναντάμε ένα πλήρες αλφαριθμητικό πληκτρολόγιο, πλήκτρα χειρισμού, πλούσιο μενού λειτουργιών και φυσικά την απαραίτητη οθόνη η οποία μάλιστα σε πολλά τερματικά είναι και έγχρωμη. Επίσης κάποιες συσκευές διαθέτουν ακόμα και ενσωματωμένο δέκτη GPS. Από τις πιο πρωτοπόρες εταιρείες στον

χώρο παραγωγής τέτοιων συσκευών είναι η Nokia και η Motorola. Ένα από τα πιο εξελιγμένα τερματικά TETRA της Motorola είναι το MTH-800. Πρόκειται για μία συσκευή που διαθέτει έγχρωμη οθόνη 130x130 pixels και ποιότητα 65.536 χρωμάτων, ισχυρό ηχείο για την ακρόαση ακόμα και υπό θορυβώδεις συνθήκες, ενώ ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του είναι ο ενσωματωμένος δέκτης GPS, δηλαδή το γνωστό δορυφορικό σύστημα εντοπισμού θέσης. Ενδεικτικά επίσης αναφέρουμε και το THR880 της Nokia που επίσης διαθέτει έγχρωμη οθόνη, λειτουργίες Push-To-Talk και DMO για άμεση επικοινωνία με άλλα τερματικά και είναι συμβατό με όλα τα ευρωπαϊκά πρότυπα. Κοινό χαρακτηριστικό γνώρισμα όλων ανεξαιρέτως των τερματικών TETRA είναι η ανθεκτική κατασκευή, με αδιάβροχα καλύμματα από καουτσούκ, ώστε να μην παθαίνουν ζημιές στις συνθήκες σκληρής χρήσης που συχνά υποβάλλονται

Πλεονεκτήματα

Το σύστημα επικοινωνίας TETRA σχεδιάστηκε με γνώμονα τους δύο παράγοντες που αναφέρθηκαν παραπάνω, δηλαδή την ασφάλεια και τη διαθεσιμότητα.

Όσον αφορά τον τομέα της ασφάλειας, το TETRA χρησιμοποιεί το σύστημα συνεχούς εναλλαγής συχνοτήτων, που λέγεται Frequency Hoping και έχει ήδη αξιοποιηθεί επιτυχώς από την κινητή τηλεφωνία GSM. Ωστόσο οι συχνότητες επικοινωνίας βρίσκονται σε τελείως διαφορετικό φάσμα, καθιστώντας το δίκτυο TETRA τελείως ανεξάρτητο από το GSM.

Όσον αφορά την αδιάλειπτη λειτουργία, το TETRA χαρακτηρίζεται και πάλι ως η βέλτιστη τεχνολογία σήμερα. Η ύπαρξη εναλλακτικών γραμμών επικοινωνίας αλλά και σταθμών βάσης, εξασφαλίζουν ότι το TETRA θα είναι πάντα διαθέσιμο, ακόμα κι αν κάποιος κόμβος ή γραμμή επικοινωνίας του δικτύου υποστεί ζημιές.

Όσον αφορά την υπερφόρτωση, αυτό μάλλον αποτελεί άγνωστη λέξη για το TETRA. Ο φόρτος ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας GSM, δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να επηρεάσει το TETRA, καθώς, όπως ήδη αναφέρθηκε, χρησιμοποιούν εντελώς διαφορετικές συχνότητες επικοινωνίας.

Όσον αφορά τις χωρητικότητες και το κόστος, ο τρόπος αξιοποίησης του φάσματος εξασφαλίζει στο TETRA αισθητά μεγαλύτερες σε σχέση με το GSM, ενώ οι πολύ χαμηλότερες χρησιμοποιούμενες συχνότητες επιτρέπουν πολύ υψηλά ποσοστά γεωγραφικής κάλυψης με μικρότερο αριθμό αναμεταδοτών, ελαττώνοντας έτσι το κόστος υποδομής. Ειδικά αν αναλογιστούμε ότι ο τελικός αποδέκτης της υπηρεσίας δεν θα είναι ο κάθε απλός πολίτης, όπως συμβαίνει με την κινητή τηλεφωνία, είναι εύκολο να αντιληφθούμε ότι είναι εξαιρετικά απίθανο να φτάσει ποτέ το δίκτυο στα όρια της χωρητικότητάς του.

Όσον αφορά την ελαστικότητα το γεγονός ότι η υποδομή του TETRA μπορεί να διαχωριστεί από εκείνη του δημόσιου δικτύου κινητής τηλεφωνίας και το γεγονός ότι οι σταθμοί βάσης μπορεί να είναι σε κάποια απόσταση από την εξυπηρετούμενη περιοχή, του παρέχει αυτή την ελαστικότητα και το διαφοροποιεί.

Όσον αφορά τους τρόπους σύνδεσης, αντίθετα με τις περισσότερες τεχνολογίες κυψελωτών συστημάτων, οι οποίες συνδέουν ένα χρήστη με έναν άλλο χρήστη(έναν προς έναν), το TETRA έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να συνδέει έναν προς έναν, έναν προς πολλούς και πολλούς προς πολλούς. Αυτοί οι τρόποι λειτουργίας είναι άμεσα σχετιζόμενοι με τη δημόσια ασφάλεια και τους επαγγελματίες χρήστες. Στα προαναφερόμενα μπορούν να προστεθούν και οι ενοποιημένες υπηρεσίες φωνής και δεδομένων, η ωφέλιμη χρήση του φάσματος, η αρμονική χρήση φάσματος στην Ε.Ε., η υψηλή χωρητικότητα δεδομένων κατά απαίτηση, η εξαιρετική ηχητική ποιότητα, η παγκόσμια αποδοχή, η πληθώρα προμηθευτών, τα Ιδεατά Ιδιωτικά Δίκτυα

Μειονεκτήματα

Τα κύρια μειονεκτήματά του εστιάζονται στο ότι μπορεί να υποστηρίξει πολύ μικρότερη τηλεπικοινωνιακή πυκνότητα σε μια δοσμένη περιοχή συγκρινόμενο με το GSM και άλλες παρόμοιες τεχνολογίες, στο ότι τα τερματικά του TETRA είναι πιο ακριβά και ότι η μεταφορά δεδομένων που επιτυγχάνει είναι υπερβολικά αργή- στα 7.2 kbit/s per timeslot- .Επιπρόσθετα εξαιτίας της διαμόρφωσης πλάτους, τα τερματικά του TETRA

μπορούν να παρεμβάλλουν με ευαίσθητες ηλεκτρονικές συσκευές όπως είναι οι καρδιακοί βηματοδότες.

Ανησυχίες για την υγεία

Το TETRA λειτουργεί με διαμόρφωση στα 17 Hz και προκαλεί προβλήματα σε αυτούς που μένουν κοντά στους ιστούς γιατί αυτές οι συχνότητες παρεμβάλλουν στη δραστηριότητα του εγκεφάλου. Παρόλα αυτά δεν υπάρχουν μελέτες πάνω σε ανθρώπους που να παρέχουν απευθείας πληροφορίες για τις επιπτώσεις στην υγεία λόγω εκπομπών σε πεδία ραδιοσυχνοτήτων με διαμόρφωση 17 περίπου Hz.

2.4 Wimax

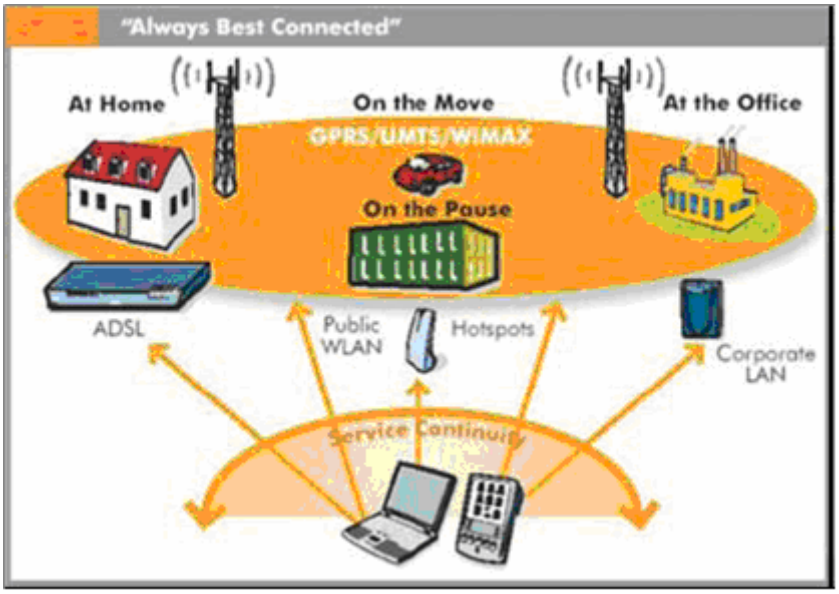
Παράλληλα με τη ταχύτατη ανάπτυξη δικτύων ασύρματης μετάδοσης, όπως τα 2.5G, 3G και Wi-Fi δίκτυα, έχει αρχίσει να κάνει αισθητή την παρουσία του το επόμενο μεγάλο βήμα όσον αφορά την ευρυζωνικότητα και την ασύρματη μετάδοση, το Wimax.

Τα δίκτυα τεχνολογίας Wimax παρέχουν ασύρματη μικροκυματική ευρυζωνική πρόσβαση σε απομακρυσμένους χρήστες, ακόμη και όταν εκείνοι βρίσκονται σε απόσταση 50 χιλιομέτρων από κάποιον σταθμό βάσης, με ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων της τάξης των 700Mbps. Μέσω IP πρωτοκόλλου, υποστηρίζονται εφαρμογές VoIP, Internet υψηλών ταχυτήτων και video.

Ο αρχικός στόχος είναι να κατακτηθεί η αγορά των «σταθερών» χρηστών, επομένως προτείνονται ως εναλλακτικές λύσεις πρόσβασης ως προς τις μισθωμένες γραμμές (Dsl, E1, E3), με απώτερο σκοπό να τις αντικαταστήσουν σταδιακά σε μεγάλο βαθμό. Μελλοντικές Wimax εφαρμογές – η μελέτη των οποίων βρίσκεται ήδη σε προχωρημένο στάδιο – θα καταστήσουν δυνατή την ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση και για τους «κινητούς» χρήστες, π.χ. ένας χρήστης φορητού υπολογιστή ο οποίος μετακινείται διαρκώς εντός ενός ευρύτερου εταιρικού περιβάλλοντος.

Οι συχνότητες λειτουργίας καλύπτουν το φάσμα των 2-11GHz για εμπορικές εφαρμογές. Αδειοδότηση για Wimax εφαρμογές απαιτείται για τη μπάντα συχνοτήτων των 3.5 GHz, ενώ ελεύθερη αδειοδότησης είναι η

μπάντα των 5GHz, κάτι που αναμένεται να ανακοινωθεί και επίσημα στη χώρα μας.

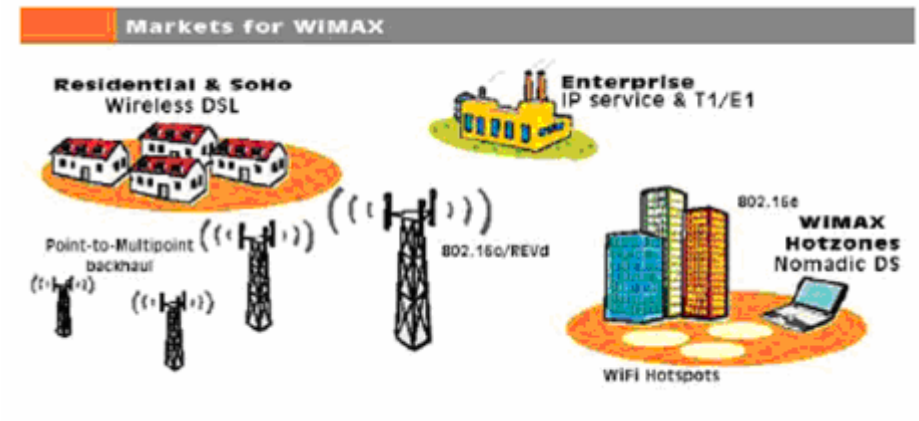


Η χρήση συχνοτήτων όπου απαιτείται σχετική αδειοδότηση μπορεί να αυξάνει το κόστος της συνολικής ανάπτυξης της εφαρμογής, ωστόσο εξασφαλίζει σε μεγάλο βαθμό μεγαλύτερο έλεγχο της εφαρμογής, αξιόπιστη διαχείριση και θωρακίζει τη μετάδοση έναντι των παρεμβολών, φαινόμενο ιδιαίτερα έντονο στην επιβαρυμένη μπάντα συχνοτήτων των 2.4 GHz.

Ο ρυθμός μετάδοσης της πληροφορίας ανέρχεται στα 71 Mbps σε αποστάσεις έως και 50 χιλιομέτρων –έως και 10 χιλιομέτρων για αστικά κέντρα–, ενώ η περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας και η τεχνική διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται, επιτρέπει την επικοινωνία σημείων που δεν έχουν οπτική επαφή μεταξύ τους (Non-Line-of-Sight). Το χαρακτηριστικό αυτό καθιστά την τεχνολογία κατάλληλη για ανάπτυξη και last-mile εφαρμογών, όπου υπάρχουν φυσικά εμπόδια (δένδρα,κτίρια), είτε οι σταθμοί βάσης θα μπορούσαν να εγκατασταθούν σε κτίρια αντί για κάποιο κοντινό βουνό, το οποίο θα εξασφάλιζε την οπτική επαφή με τους χρήστες. Επίσης, ένας και μόνο σταθμός βάσης μπορεί, ταυτόχρονα, να υποστηρίξει επιχειρήσεις με συνδέσεις E1 καθώς και εκατοντάδες οικιακούς χρήστες με DSL επιπέδου συνδέσεις.

Βασικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας Wimax

- Υψηλό Throughput και ευέλικτη διαχείριση καναλιών μετάδοσης
- Υψηλό επίπεδο ραδιοκάλυψης
- Built-in QoS
- Ασφάλεια
- Ευκολία εγκατάστασης/επέκτασης
- Broadband on-demand
- Cellular backhaul
- Residential broadband
- Best-connected wireless service



3

Διάδοση σε περιβάλλον τούνελ

3.1 Εισαγωγικά

Το περιβάλλον τούνελ αποτελεί ένα σύνθετο περιβάλλον στο οποίο η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων οφείλεται σε φαινόμενα όπως η *ανάκλαση*, η *σκέδαση* και η *περίθλαση*. Αυτά τα φαινόμενα και άλλα που απορρέουν από αυτά, όπως η *πολυδιαδρομική διάδοση* (multipath propagation), η *διασπορά καθυστέρησης* και η *διασπορά Doppler*, θα μας απασχολήσουν στη μελέτη μας.

Αρχικά, θα γίνει αναφορά στις αρχές της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στον ελεύθερο χώρο και έπειτα θα παρουσιαστούν τα φαινόμενα που εμφανίζονται σε ένα περιβάλλον τούνελ. Καθώς το περιβάλλον τούνελ μπορεί να μοντελοποιηθεί από το μοντέλο των κυματοδηγών, ορθογωνικών και κυκλικών, θα παρουσιαστούν τα βασικά χαρακτηριστικά διάδοσης σε κυματοδηγούς.

Το βασικό μέγεθος που θα μας απασχολήσει είναι η *εξασθένηση διάδοσης* ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Όπως αναφέραμε, το περιβάλλον τούνελ είναι ένα σύνθετο περιβάλλον και τα φαινόμενα που το χαρακτηρίζουν είτε είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν είτε αποτελούν φαινόμενα στατιστικής φύσεως, οπότε η θεωρητική μελέτη τους δε δύναται να μας δώσει ασφαλή αριθμητικά δεδομένα για την ισχύ του πεδίου σε κάθε σημείο του χώρου. Για αυτό το λόγο, όσες προσπάθειες έγιναν από το παρελθόν μέχρι και σήμερα για τη μελέτη αυτού του προβλήματος αφορούν τη χρήση μοντέλων που προσομοιώνουν περιβάλλοντα πολλαπλών ανακλάσεων για την εκτίμηση των επιπέδων εξασθένησης της ισχύος στο χώρο. Παρακάτω

θα παρουσιαστούν τέτοια μοντέλα. Επίσης, χρησιμοποιώντας τα μοντέλα, θα προσπαθήσουμε να δώσουμε μια εκτίμηση των επιπέδων εξασθένησης διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε ένα δεδομένο τούνελ.

3.2 Διάδοση στον ελεύθερο χώρο

Ο ελεύθερος χώρος είναι ένα ιδανικό-ισοτροπικό μέσο χωρίς απώλειες με γραμμική συμπεριφορά και η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε αυτόν γίνεται μέσω σφαιρικών κυμάτων. Είναι μια περιοχή ελεύθερη από άλλα αντικείμενα που θα μπορούσαν να απορροφήσουν ή να σκεδάσουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Τα χαρακτηριστικά διάδοσης όπως η εξασθένηση διάδοσης, η ισχύς και η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου εξαρτώνται από την απόσταση και όχι από την κατεύθυνση. Η θεώρηση του ελευθέρου χώρου είναι φυσικά ιδανική. Στην πραγματικότητα, προσεγγιστικά θεωρείται ελεύθερος χώρος ο χώρος που περικλείεται μέσα σε μια συγκεκριμένη περιοχή γύρω από την κεραία εκπομπής. Η περιοχή αυτή ονομάζεται πρώτη ζώνη Fresnel (βλ. [1]). Η πρώτη ζώνη Fresnel θεωρείται ελεύθερη από εμπόδια και γενικά σκεδαστές της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Για τον υπολογισμό της εξασθένησης ακτινοβολίας, θεωρούμε δυο ισοτροπικές κεραίες: μια κεραία εκπομπής και μια λήψης.

Η βασική απώλεια μετάδοσης ελευθέρου χώρου L_s ορίζεται ως ο λόγος της εκπεμπόμενης ισχύος στον ελεύθερο χώρο από ένα ισοτροπικό ακτινοβολητή προς τη διαθέσιμη ισχύ που φθάνει στα άκρα της ισοτροπικής κεραίας του δέκτη. Θεωρώντας $P_t(w)$ την εκπεμπόμενη ισχύ από την ισοτροπική κεραία του πομπού, τότε η πυκνότητα ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας $P_a(w/m^2)$ σε απόσταση d από τον πομπό δίνεται από τη σχέση:

$$P_a = \frac{P_t}{4\pi \cdot d^2}$$

Η διαθέσιμη ισχύς P_r στα άκρα της ισοτροπικής κεραίας του δέκτη θα είναι παρόμοια το γινόμενο P_a επί την ενεργό επιφάνεια A_e όπου:

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

Συνδυάζοντας τις δυο παραπάνω σχέσεις καταλήγουμε ότι η *βασική απώλεια μετάδοσης ελευθέρου χώρου* L_s θα είναι:

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

Αν εκφράσουμε την παραπάνω σχέση σε dB έχουμε:

$$L_s(dB) = 32.4 + 20 \cdot \log_{10} d + 20 \cdot \log_{10} f$$

όπου η απόσταση d εκφράζεται σε km και η συχνότητα f σε MHz.

Ονομάζουμε L την *απώλεια μετάδοσης τηλεπικοινωνιακής ζεύξης* που ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος των ραδιοκυμάτων που ακτινοβολούνται από την κεραία εκπομπής προς την ισχύ που λαμβάνεται στην κεραία λήψης κάτω από πραγματικές συνθήκες διάδοσης στην ατμόσφαιρα. *Βασική απώλεια μετάδοσης* L_b ονομάζεται η απώλεια μετάδοσης της ζεύξης που αναφέρεται σε ιδεατές ισοτροπικές κεραίες λήψης και εκπομπής. Η σχέση μεταξύ των δυο μεγεθών είναι:

$$L\ (dB) = L_b - (G_t + G_r - L_d)$$

όπου G_t και G_r είναι τα κέρδη ελευθέρου χώρου των κεραιών εκπομπής και λήψης και L_d είναι η *απώλεια σύζευξης μέσου-ενεργού επιφάνειας κεραίας.* Η τελευταία παράμετρος αναφέρεται στην απώλεια ισχύος (σε dB) που οφείλεται στο γεγονός ότι το λειτουργικό περιβάλλον των δυο κεραιών έχει ως αποτέλεσμα το μέτωπο κύματος στην κεραία λήψης να είναι διαφορετικό από επίπεδο.

Σαν *απόσβεση ζεύξης A (dB)* ορίζουμε την απώλεια ισχύος του διαδιδόμενου κύματος σε σχέση με τη διάδοση του ελευθέρου χώρου και δίνεται από τη σχέση:

$$A^{(dB)} = L_b - L_s = L - L_s + G_t + G_r - L_d$$

Σε μια τηλεπικοινωνιακή ζεύξη που αναφέρεται στην ατμόσφαιρα, η απόσβεση ζεύξης A είναι γενικά το άθροισμα των απωλειών ισχύος που οφείλονται στα φαινόμενα πολυδιαδρομικής διάδοσης, ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων και ατμοσφαιρικών αερίων. Η σπουδαιότητα αυτών των φαινομένων στο τελικό αποτέλεσμα της απόσβεσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων εξαρτάται από τη συχνότητα, τη γεωμετρία της ζεύξης και τις κυρίαρχες ατμοσφαιρικές συνθήκες.

3.3 Χαρακτηριστικά διάδοσης σε κυματοδηγό

Το σύνθετο περιβάλλον τούνελ μπορεί να αναπαρασταθεί από το μοντέλο του κυματοδηγού που είναι σαφώς απλοποιημένο και δε συνυπολογίζει τις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό μιας σήραγγας αλλά αποτελεί μια απλή λύση που μπορεί να μας δώσει μια ιδέα για τον τρόπο με τον οποίο εξασθενούν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε τέτοιο περιβάλλον. Παρακάτω θα αναπτύξουμε δυο περιπτώσεις: την περίπτωση του ορθογωνικού κυματοδηγού που προσεγγίζει τη σήραγγα ορθογώνιας διατομής που χρησιμοποιείται σε τούνελ εξόρυξης και οδικά τούνελ, και την περίπτωση του κυκλικού κυματοδηγού που προσεγγίζει τόσο τα κυκλικά τούνελ (μετρό, υπόγειος σιδηρόδρομος) όσο και τις σήραγγες ελλειπτικής διατομής.

Οι κύριοι λόγοι εξασθένησης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σε κυματοδηγούς (βλ.[2]) είναι:

- Απόσβεση που οφείλεται στο ότι η συχνότητα λειτουργίας είναι μικρότερη από τη συχνότητα αποκοπής. Στην περίπτωση αυτή δεν είναι δυνατή η διάδοση, αφού η σταθερά διάδοσης, αντί καθαρά φανταστικής τιμής που αντιστοιχεί σε κυματοδηγούμενους ρυθμούς, λαμβάνει πραγματική τιμή. Ο συντελεστής απόσβεσης ισχύος είναι:

$$a_p = 2\omega\sqrt{\mu\varepsilon}\sqrt{\left(\left(\frac{f_c}{f}\right)^2 - 1\right)}$$

- Απόσβεση που οφείλεται στις απώλειες διηλεκτρικού του μέσου που καταλαμβάνει το εσωτερικό του κυματοδηγού. Τα υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται για πλήρωση κυματοδηγών έχουν χαμηλή αγωγιμότητα που ικανοποιεί τη σχέση σ<<με. Αποδεικνύεται ότι η ειδική απόσβεση ισχύος που οφείλεται στις απώλειες διηλεκτρικού είναι σε Np/m:

$$a_p = \frac{\sigma\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2\right)}}$$

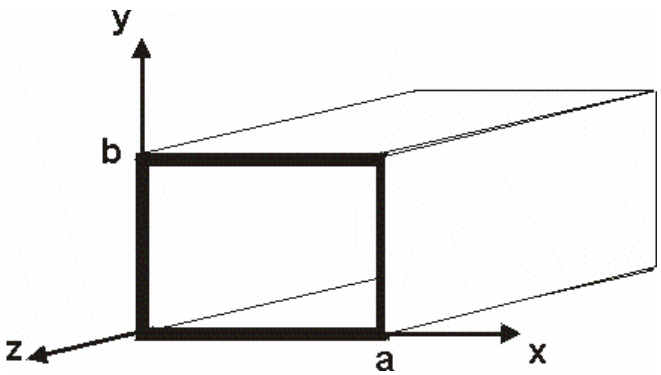
- Απόσβεση που οφείλεται στις θερμικές απώλειες λόγω πεπερασμένης αγωγιμότητας των τοιχωμάτων του κυματοδηγού. Ο ακριβής υπολογισμός της απαιτεί λύση του προβλήματος κυματοδήγησης με τροποποιημένες οριακές συνθήκες. Οι υπολογισμοί γίνονται αρχικά θεωρώντας την, ούτως ή άλλως πολύ μεγάλη, αγωγιμότητα ως άπειρη. Υπολογίζονται έτσι οι πεδιακές συνιστώσες και τα επιφανειακά ρεύματα. Στη συνέχεια, για τον προσδιορισμό του ηλεκτρικού πεδίου επί των τοιχωμάτων του κυματοδηγού θεωρείται η ακριβής τιμή της αγωγιμότητας του υλικού των τοιχωμάτων. Μεταξύ των ρυθμών ενός κυματοδηγού, ο ρυθμός TE_{10} εμφανίζει τις μικρότερες θερμικές απώλειες με συντελεστή απόσβεσης:

$$a_{p10} = \frac{2}{b}\left[\frac{\omega\mu'\varepsilon}{2\mu\sigma'}\right]\frac{1 + \frac{2b}{a}\left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2\right)}}$$

όπου μ′ και σ′ η μαγνητική διαπερατότητα και η ειδική αγωγιμότητα του υλικού των τοιχωμάτων του κυματοδηγού αντίστοιχα. Στην πράξη, η συνολική ειδική απόσβεση που εμφανίζει ένας κυματοδηγός προσδιορίζεται σε dB/m με μέτρηση της ισχύος σε διάφορα σημεία του.

Κυματοδηγός ορθογώνιας διατομής

Θεωρούμε κυματοδηγό με διαστάσεις x=a και y=b του οποίου τα τοιχώματα έχουν άπειρη αγωγιμότητα.



Σύμφωνα με το γενικό ορισμό της κυματοδήγησης (βλ.[4]) πρέπει τα πεδία μέσα στην περιοχή που οριοθετείται από τις **0<x<a** και **0<y<b** να μεταβάλλονται στον άξονα z στη μορφή:

$$E\ (x,y,z) = e\ (x,y)\cdot \exp(\pm\gamma\cdot z)$$
$$H\ (x,y,z) = h\ (x,y)\cdot \exp(\pm\gamma\cdot z)$$

όπου *γ* είναι η μιγαδική σταθερά διάδοσης. Η εξάρτηση των πεδίων από το χρόνο είναι της μορφής *exp(+iωt)* ενώ τα πρόσημα στους εκθετικούς όρους των πεδίων αντιπροσωπεύουν οδεύοντα κύματα κατεύθυνσης παράλληλης στον άξονα z, προς τα θετικά για το πρόσημο (-) και προς τα αρνητικά για το πρόσημο (+) αντίστοιχα. Αντικαθιστώντας τις παραπάνω εξισώσεις στις εξισώσεις του Maxwell:

$$\nabla \times E = -j \cdot \omega \cdot \mu \cdot H$$
$$\nabla \times H = j \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot E$$

καταλήγουμε στο παρακάτω σύστημα διαφορικών εξισώσεων:

$$\frac{\partial e_z}{\partial y} + \gamma \cdot e_y = -j \cdot \omega \cdot \mu \cdot h_x$$
$$\frac{\partial e_z}{\partial x} + \gamma \cdot e_x = j \cdot \omega \cdot \mu \cdot h_y$$
$$\frac{\partial e_y}{\partial x} - \frac{\partial e_x}{\partial y} = -j \cdot \omega \cdot \mu \cdot h_z$$
$$\frac{\partial h_z}{\partial y} + \gamma \cdot h_y = j \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot e_x$$
$$\frac{\partial h_z}{\partial x} + \gamma \cdot h_x = -j \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot e_y$$
$$\frac{\partial h_y}{\partial x} - \frac{\partial h_x}{\partial y} = j \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot e_z$$

Οι εξισώσεις των πεδίων Ε και Η ικανοποιούν επίσης και τις παρακάτω κυματικές εξισώσεις:

$$\left(\nabla^2 + \omega^2 \cdot \varepsilon \cdot \mu\right) E \ (x, y, z) = 0$$
$$\left(\nabla^2 + \omega^2 \cdot \varepsilon \cdot \mu\right) H \ (x, y, z) = 0$$

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις καταλήγουμε στο εξής σύστημα:

$$\left(\nabla^2{}_{x,y} + h^2\right) e \ (x, y) = 0$$
$$\left(\nabla^2{}_{x,y} + h^2\right) h \ (x, y) = 0$$
$$h^2 = \omega^2 \cdot \varepsilon \cdot \mu + \gamma^2$$

Επιλύοντας κατάλληλα το παραπάνω σύστημα με τις οριακές συνθήκες μηδενισμού των εφαπτομενικών συνιστωσών του ηλεκτρικού πεδίου (βλ.[4]) υπολογίζουμε τις εξισώσεις των πεδίων και τις συχνότητες αποκοπής για τους ρυθμούς διάδοσης TM και TE στο εσωτερικό του κυματοδηγού.

Αυτό που μας ενδιαφέρει στη συγκεκριμένη ανάλυση είναι η εξασθένιση που προκαλείται στο πεδίο λόγω πεπερασμένης αγωγιμότητας των τοιχωμάτων του κυματοδηγού. Άλλωστε τα τοιχώματα της σήραγγας του τούνελ είναι, στην περίπτωση που εξετάζουμε, κατασκευασμένα από τσιμέντο, άρα πεπερασμένης αγωγιμότητας.

Με την θεώρηση $\sigma/\omega\varepsilon_0 >> 1$ που μας επιτρέπει τη χρήση προσεγγιστικής μεθόδου για τον υπολογισμό της ισχύος, υπολογίζουμε την *καταναλισκόμενη ισχύ $P_{\alpha\pi}$ στη μονάδα επιφανείας (W/m^2)* ως:

$$P_{\alpha\pi} = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left(E_t J_s^*\right) = \frac{1}{2\sigma\delta_s}\left|J_s\right|^2$$

όπου δ_s είναι το βάθος διείσδυσης, χαρακτηριστικό του υλικού κατασκευής. Υπολογίζουμε την εξασθένηση ισχύος ανά μονάδα μήκους ως το λόγο της καταναλισκόμενης ισχύος $P_{\alpha\pi}$ προς τη συνολική μεταφερόμενη ισχύ P_σ:

$$A_P = \frac{P_{\alpha\pi}}{P_\sigma} = \frac{2\left(1+\frac{2b}{a}\left(\frac{f_{10}}{f}\right)^2\right)}{z\sigma\delta_s\left(1-\left(\frac{f_{10}}{f}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} b}$$

Στον παραπάνω τύπο a, b είναι οι διαστάσεις του κυματοδηγού, $z=(\mu/\varepsilon)^{1/2}$, και f_{10} (=c/2a) η συχνότητα αποκοπής του ρυθμού TE_{10} που είναι ο επικρατέστερος ρυθμός διάδοσης στον ορθογώνιο κυματοδηγό και έχει τη χαμηλότερη συχνότητα αποκοπής.

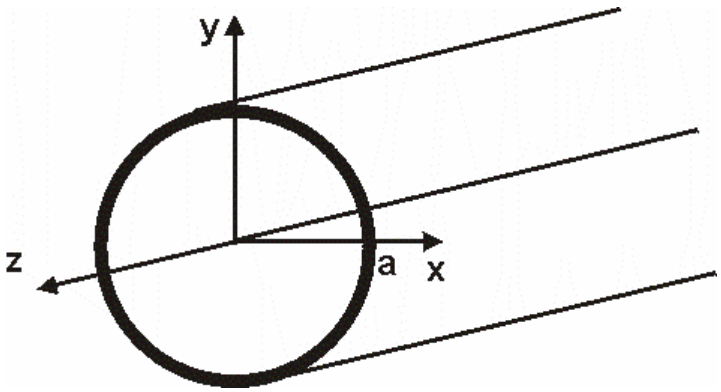
Τελικά, η εξασθένηση ανά μονάδα μήκους σε dB/m δίνεται από τον τύπο (βλ.[4]):

$$A\ (dB/m) = 8.68 \frac{\left(1 + \frac{2b}{a}\left(\frac{f_{10}}{f}\right)^2\right)}{z\sigma\delta_s\left(1 - \left(\frac{f_{10}}{f}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} b}$$

Από τον παραπάνω τύπο μπορούμε να σχεδιάσουμε την εξάρτηση της εξασθένησης συναρτήσει της ανοιγμένης στην f_{10} συχνότητας.

Κυματοδηγός κυκλικής διατομής

Όμοια με την ανάλυση για τους ορθογωνικούς κυματοδηγούς, θεωρούμε κυματοδηγό με ακτίνα ρ=a του οποίου τα τοιχώματα έχουν άπειρη αγωγιμότητα.



Η ανάλυση θα γίνει με χρήση των κυλινδρικών συντεταγμένων. Σύμφωνα με το γενικό ορισμό της κυματοδήγησης (βλ.[4]) πρέπει τα πεδία μέσα στην περιοχή που οριοθετείται από την **0<ρ<a** να μεταβάλλονται στον άξονα z στη μορφή:

$$E\ (\rho,\phi,z) = e\ (\rho,\phi)\cdot \exp(-\gamma\cdot z)$$
$$H\ (\rho,\phi,z) = h\ (\rho,\phi)\cdot \exp(-\gamma\cdot z)$$

όπου *γ* είναι η μιγαδική σταθερά διάδοσης. Η εξάρτηση των πεδίων από το χρόνο είναι της μορφής *exp(+iωt)*. Αντικαθιστώντας τις παραπάνω εξισώσεις στις εξισώσεις του Maxwell:

$$\nabla\times E = -j\cdot\omega\cdot\mu\cdot H$$
$$\nabla\times H = j\cdot\omega\cdot\varepsilon\cdot E$$

καταλήγουμε στο παρακάτω σύστημα διαφορικών εξισώσεων:

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial e_z}{\partial\varphi} + \gamma\cdot e_\varphi = -j\cdot\omega\cdot\mu\cdot h_\rho$$
$$\frac{\partial e_z}{\partial\rho} + \gamma\cdot e_\rho = j\cdot\omega\cdot\mu\cdot h_\varphi$$
$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial(\rho\cdot e_\varphi)}{\partial\rho} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial e_\rho}{\partial\varphi} = -j\cdot\omega\cdot\mu\cdot h_z$$
$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial h_z}{\partial\varphi} + \gamma\cdot h_\varphi = j\cdot\omega\cdot\varepsilon\cdot e_\rho$$
$$\frac{\partial h_z}{\partial\rho} + \gamma\cdot h_\rho = -j\cdot\omega\cdot\varepsilon\cdot e_\varphi$$
$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial(\rho\cdot h_\varphi)}{\partial\rho} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial h_\rho}{\partial\varphi} = j\cdot\omega\cdot\varepsilon\cdot e_z$$

Οι εξισώσεις των πεδίων Ε και Η ικανοποιούν επίσης και τις παρακάτω κυματικές εξισώσεις:

$$\left(\nabla^2 + \omega^2\cdot\varepsilon\cdot\mu\right)E\ (\rho,\varphi,z) = 0$$
$$\left(\nabla^2 + \omega^2\cdot\varepsilon\cdot\mu\right)H\ (\rho,\varphi,z) = 0$$

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις καταλήγουμε στο εξής σύστημα:

$$\left(\nabla^2{}_{\rho,\varphi}+h^2\right)e\ (\rho,\varphi)=0$$
$$\left(\nabla^2{}_{\rho,\varphi}+h^2\right)h\ (\rho,\varphi)=0$$
$$h^2=\omega^2\cdot\varepsilon\cdot\mu+\gamma^2$$

Επιλύοντας κατάλληλα το παραπάνω σύστημα με τις οριακές συνθήκες μηδενισμού των εφαπτομενικών συνιστωσών του ηλεκτρικού πεδίου (βλ.[4]) υπολογίζουμε τις εξισώσεις των πεδίων και τις συχνότητες αποκοπής για τους ρυθμούς διάδοσης TM και TE στο εσωτερικό του κυματοδηγού.

Αυτό που μας ενδιαφέρει και στη συγκεκριμένη ανάλυση είναι η εξασθένιση που προκαλείται στο πεδίο λόγω πεπερασμένης αγωγιμότητας των τοιχωμάτων του κυματοδηγού.

Ρυθμός TE_{11}

Ο συγκεκριμένος ρυθμός θεωρείται ο επικρατέστερος ρυθμός διάδοσης στους κυκλικούς κυματοδηγούς. Έχει συχνότητα αποκοπής:

$$f_{11}=\frac{1.841}{2\cdot\pi\cdot a}\frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

Σε αυτή την περίπτωση η εξασθένηση ανά μονάδα μήκους σε dB/m υπολογίζεται από τον τύπο:

$$A\ (dB/m)=8.68\frac{p_{11}^{'\ 4}+\left(\beta_{11}\alpha\right)^2}{\sigma\cdot\delta_s\cdot a^3\beta_{11}\omega\mu\left(p_{11}^{'\ 2}-1\right)}$$

Στον παραπάνω τύπο a είναι η ακτίνα του κυματοδηγού, p_{11}' είναι η πρώτη ρίζα τάξης 1 της παραγώγου της συνάρτησης Bessel και είναι ίση με 1.841, και β_{11} η σταθερά φάσης που υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\beta_{11} = k_0 \left(1 - \left(\frac{f_{11}}{f} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Από τον παραπάνω τύπο μπορούμε να σχεδιάσουμε την εξάρτηση της εξασθένησης συναρτήσει της ανοιγμένης στην f_{11} συχνότητας.

Ρυθμός TE_{01}

Ο συγκεκριμένος ρυθμός έχει τη χαμηλότερη συχνότητα αποκοπής από τους ρυθμούς που έχουν συμμετρική κατανομή γύρω από τον άξονα διάδοσης. Πιο συγκεκριμένα:

$$f_{01} = \frac{3.832}{2 \cdot \pi \cdot a} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

Σε αυτή την περίπτωση η εξασθένηση ανά μονάδα μήκους σε dB/m υπολογίζεται από τον τύπο:

$$A \ (dB/m) = 8.68 \frac{\left(\frac{f_{01}}{f} \right)^2}{\sigma \cdot \delta_s \cdot a \sqrt{1 - \left(\frac{f_{01}}{f} \right)^2}}$$

Στον παραπάνω τύπο a είναι η ακτίνα του κυματοδηγού.

Από τον παραπάνω τύπο μπορούμε να σχεδιάσουμε την εξάρτηση της εξασθένησης συναρτήσει της ανοιγμένης στην f_{01} συχνότητας.

Μια άλλη προσέγγιση για τη σταθερά εξασθένησης

Σύμφωνα με την προσέγγιση του κυκλικού κυματοδηγού των Marcatili και Schmeltzer (βλ.[10] και [15]) οι σταθερές διάδοσης είναι οι ρίζες της χαρακτηριστικής εξίσωσης για το γενικό κυκλικό κυματοδηγό:

$$\left[\frac{J'_n(k_1 a)}{J_n(k_1 a)} - \frac{k_1}{k_2}\frac{H'^{(1)}_n(k_2 a)}{H^{(1)}_n(k_2 a)}\right]\left[\frac{J'_n(k_1 a)}{J_n(k_1 a)} - \frac{\nu^2 k_1}{k_2}\frac{H'^{(1)}_n(k_2 a)}{H^{(1)}_n(k_2 a)}\right] = \left[\frac{n\lambda}{k k_1 a}\right]^2\left[1-\left(\frac{k_1}{k_2}\right)\right]^2$$

όπου $k_1^2 = k^2 - \gamma^2$, $k_2^2 = v^2k^2 - \gamma^2$ k αναφέρονται στο εσωτερικό και το εξωτερικό του κυματοδηγού αντίστοιχα, k είναι η σταθερά διάδοσης ελευθέρου χώρου, γ η μιγαδική σταθερά διάδοσης και $v = (\varepsilon_2/\varepsilon_0)^{1/2}$. Η σταθερά φάσης και η σταθερά εξασθένησης κάθε ρυθμού είναι το πραγματικό και το φανταστικό μέρος του γ αντίστοιχα.

Η λύση για τον υπολογισμό της σταθεράς εξασθένησης δίνεται με τις προσεγγίσεις: $ka=2\pi a/\lambda >> |v|u_{nm}$ και $k_2a>>1$:

$$a_{nm} = \left(\frac{u_{nm}}{2\pi}\right)^2 \frac{\lambda^2}{\alpha^3}\begin{Bmatrix} \mathrm{Re}\{1/\sqrt{\nu^2-1}\} & \gamma\iota\alpha\ TE_{0m}\ \rho\upsilon\theta\mu o\acute{\upsilon}\varsigma (n=0) \\ \mathrm{Re}\{(1/2)(\nu^2+1)/\sqrt{\nu^2-1}\} & \gamma\iota\alpha\ EH_{nm}\ \rho\upsilon\theta\mu o\acute{\upsilon}\varsigma (n\neq 0) \end{Bmatrix}$$

όπου u_{nm} οι ρίζες της εξίσωσης Bessel $J_{n-1}(u_{nm})=0$. Κάποιες τιμές των u_{nm} δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

n/m	1	2	3	4
1	2,405	5,520	8,654	11,796
2 ή 0	3,832	7,016	10,173	13,324
3 ή -1	5,136	8,417	11,620	14,796
4 ή -1	6,380	9,761	13,015	16,223

Σύμφωνα με τους Marcatili και Schmeltzer (βλ.[10] και [15]) στον κυκλικό κυματοδηγό, αν συγκριθούν οι σταθερές διάδοσης των διαφόρων ρυθμών, παρατηρούμε ότι ο ρυθμός με τη χαμηλότερη εξασθένηση είναι ο TE_{01} αν

ισχύει $v>2.02$ και ο EH_{11} αν ισχύει ότι $v<2.02$. Πειραματικά αποτελέσματα (βλ.[10]) δείχνουν ότι οι σταθερές εξασθένησης πλησιάζουν τις θεωρητικές τιμές των ρυθμών TE_{01} και EH_{11}.

3.4 Χαρακτηριστικά διάδοσης σε περιβάλλον τούνελ

Σε συγκεκριμένες υψηλές συχνότητες στον ελεύθερο χώρο, επιπρόσθετη εξασθένηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μπορεί να προκύψει εξαιτίας της απορρόφησης από συγκεκριμένα μόρια αερίων της ατμόσφαιρας. Σε ένα περιβάλλον σήραγγας όμως, οι ακτίνες των πεδίων επιπλέον συναντούν εμπόδια στην πορεία διάδοσής τους, όπως για παράδειγμα τα τοιχώματα του τούνελ και το έδαφος αλλά και κινούμενα οχήματα, όπως τρένα και αυτοκίνητα, με αποτέλεσμα η ενέργεια των κυμάτων να ανακλάται ή να διασπείρεται σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Αυτά τα φαινόμενα θα παρουσιαστούν στην επόμενη ενότητα.

Ανάκλαση σε λείες επιφάνειες

Η ανάκλαση είναι προφανώς ένας από τους κυρίαρχους μηχανισμούς διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας σε ένα περιβάλλον τούνελ. Η γενική λύση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων πρέπει να ικανοποιεί τις εξισώσεις του Maxwell και τις οριακές συνθήκες. Για την ειδική περίπτωση δυο διαφορετικών ομογενών άπειρων ημιχώρων, που διαχωρίζονται από μια λεία επίπεδη διαχωριστική επιφάνεια, η λύση δίνεται από τους συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης Fresnel. Το ολικό πεδίο αποτελείται από το προσπίπτον πεδίο, το ανακλώμενο και το μεταδιδόμενο στο μέσο πεδίο. Στην περίπτωση των τοιχωμάτων ενός τούνελ, τα πεδία που μας απασχολούν είναι το προσπίπτον και το ανακλώμενο, καθώς το μεταδιδόμενο μέρος της ενέργειας θεωρείται πως απορροφάται πλήρως από το υλικό των τοιχωμάτων και δεν συμμετέχει στους μηχανισμούς διάδοσης.

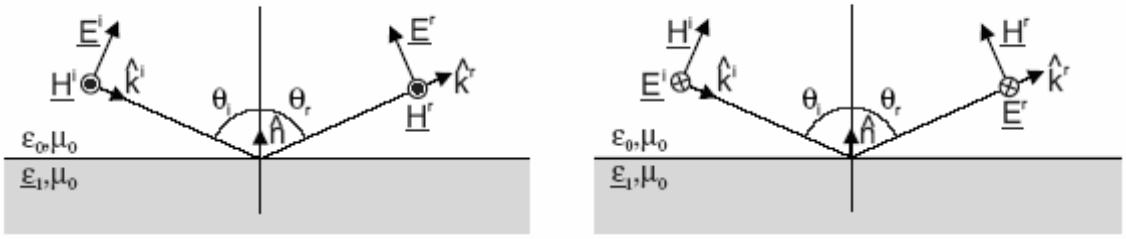
Ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζονται οι συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης δε θα μας απασχολήσουν. Θα εξετάσουμε δυο περιπτώσεις επιφάνειας: της επίπεδης και της καμπύλης.

Επίπεδη επιφάνεια

Σε ένα τούνελ, η ανάκλαση συμβαίνει στα όρια μεταξύ του αέρα και των τοιχωμάτων της σήραγγας ή του εδάφους. Για αυτό το λόγο, το αρχικό πρόβλημα ανάκλασης μεταξύ δυο αυθαίρετων μέσων θα συγκεκριμενοποιηθεί στην ειδική περίπτωση του συνόρου μεταξύ κενού (ή αέρα) και ενός μη μαγνητικού υλικού ($\mu_{r,1}$=1) με σχετική μιγαδική επιτρεπτότητα $\varepsilon_{r,1}$. Το προσπίπτον επίπεδο κύμα πρέπει να διαχωριστεί σε δυο ορθογώνιες πολώσεις που εξετάζονται ξεχωριστά. Σε αυτήν την περίπτωση, το ολικό πεδίο δίνεται από το διανυσματικό άθροισμα των δυο συνιστωσών.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η σύμβαση που χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό των πολώσεων. Η περίπτωση που το ηλεκτρικό πεδίο είναι κάθετο στο επίπεδο πρόσπτωσης (παράλληλο στη διαχωριστική επιφάνεια) αναφέρεται ως *κάθετη πόλωση*. Το σύμβολο που χρησιμοποιείται είναι: $\perp$. Όταν το ηλεκτρικό πεδίο είναι παράλληλο στο επίπεδο πρόσπτωσης, τότε αναφερόμαστε σε *παράλληλη πόλωση*. Το σύμβολο που χρησιμοποιείται είναι: ||.

Το επίπεδο πρόσπτωσης είναι αυτό στο οποίο ανήκουν το διάνυσμα $\vec{n}$ της διαχωριστικής επιφάνειας των δυο μέσων και το μοναδιαίο διάνυσμα προς την κατεύθυνση πρόσπτωσης του επίπεδου κύματος $\vec{k}^{i}$. Οι εκθέτες **i** και **r** αναφέρονται στο προσπίπτον και το ανακλώμενο πεδίο αντίστοιχα.



(a) **Παράλληλη πόλωση** (b) **Κάθετη πόλωση**

Η γωνία ανάκλασης καθορίζεται σύμφωνα με το νόμο του Snell για την ανάκλαση:

$$\theta_r = \theta_i = \arccos(-\vec{k}^{\,i} \cdot \vec{n}) = \arccos(\vec{k}^{\,r} \cdot \vec{n})$$

Οι συντελεστές ανάκλασης $R_{\perp,\|}$ συσχετίζουν τα ανακλώμενα και τα μεταδιδόμενα πεδία σύμφωνα με τη σχέση:

$$R_{\perp,\|} = \frac{E_{\perp,\|}^{\,r}}{E_{\perp,\|}^{\,i}} = \frac{H_{\perp,\|}^{\,r}}{H_{\perp,\|}^{\,i}}$$

και δίνονται από τους τύπους:

$$R_{\|}(\theta_i, \varepsilon_{r,1}) = \frac{\varepsilon_{r,1} \cdot \cos\,\theta_i - \sqrt{\varepsilon_{r,1} - \sin^2\theta_i}}{\varepsilon_{r,1} \cdot \cos\,\theta_i + \sqrt{\varepsilon_{r,1} - \sin^2\theta_i}}$$

$$R_{\perp}(\theta_i, \varepsilon_{r,1}) = \frac{\cos\,\theta_i - \sqrt{\varepsilon_{r,1} - \sin^2\theta_i}}{\cos\,\theta_i + \sqrt{\varepsilon_{r,1} - \sin^2\theta_i}}$$

Αυστηρά, οι προαναφερθέντες τύποι ισχύουν μόνο για ένα επίπεδο κύμα που προσπίπτει σε μια λεία επίπεδη συνοριακή επιφάνεια, αλλά μπορούν να υιοθετηθούν και στην περίπτωση των τοπικά επίπεδων κυμάτων, αν οι διαστάσεις της διαχωριστικής επιφάνειας και κατά συνέπεια και των εμποδίων που συναντά το κύμα είναι πολύ μεγάλες συγκρινόμενες με το μήκος κύματος.

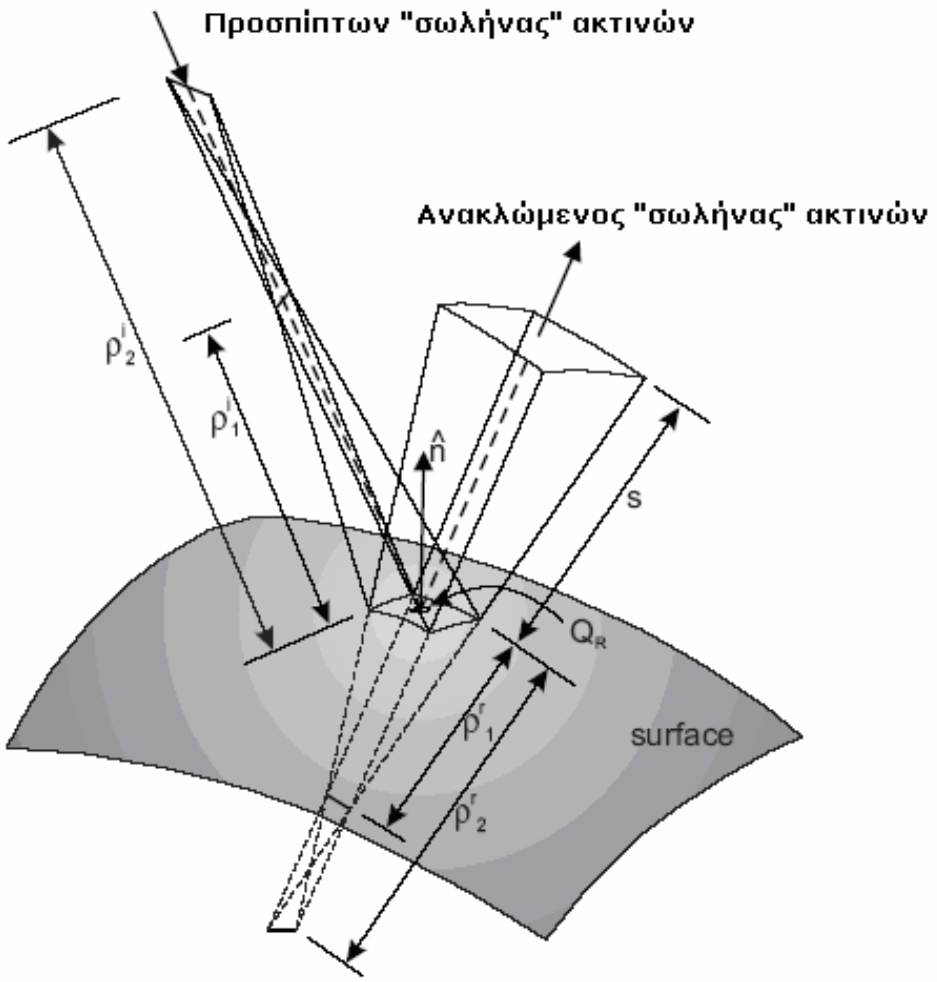
Καμπύλη επιφάνεια

Αν η διαχωριστική επιφάνεια είναι καμπύλη, όπως είναι για παράδειγμα η ελλειπτική διατομή καθώς και οι καμπές (στροφές) των τούνελ, το φαινόμενο της ανάκλασης μπορεί να αντιμετωπιστεί με τις κλασσικές μεθόδους με την προϋπόθεση ότι οι ακτίνες καμπυλότητας της επιφάνειας είναι πολύ μεγάλες συγκρινόμενες με το μήκος κύματος (βλ.[6]). Η

προσπίπτουσα ακτίνα, που αντιπροσωπεύει ένα "σωλήνα" ακτινών ή ένα τοπικά επίπεδο μέτωπο κύματος, ανακλάται απλά στο εφαπτομενικό επίπεδο που καθορίζεται από το σημείο διασταύρωσης της τροχιάς της προσπίπτουσας ακτίνας και της καμπύλης επιφάνειας. Η γωνία ανάκλασης δίνεται και πάλι από το νόμο του Snell για την ανάκλαση και ισούται με τη γωνία πρόσπτωσης που καθορίζεται από το διάνυσμα $\vec{n}$ του εφαπτομενικού επιπέδου της διαχωριστικής επιφάνειας και από την κατεύθυνση διάδοσης της προσπίπτουσας ακτίνας.

Παρόλα αυτά, σε αντίθεση με την ανάκλαση ενός επιπέδου κύματος σε μια επίπεδη διαχωριστική επιφάνεια, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι οι κύριες ακτίνες καμπυλότητας του ανακλώμενου "σωλήνα" ακτινών είναι γενικά διαφορετικές από αυτές του προσπίπτοντος "σωλήνα" εξαιτίας της καμπυλότητας της διαχωριστικής επιφάνειας. Με άλλα λόγια, ο "σωλήνας" ακτινών μπορεί να συγκλίνει (να γίνει πιο "στενός") ή να αποκλίνει (να "απλώσει") και η αιτία είναι η καμπυλότητα της επιφάνειας.

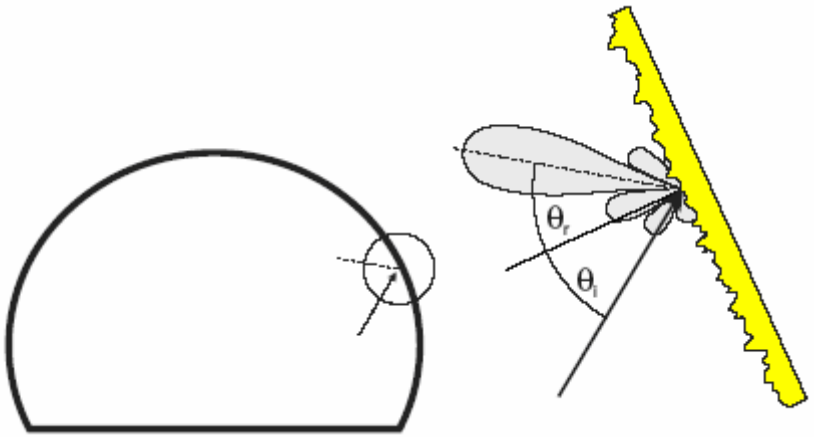
Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η γεωμετρία της ανάκλασης σε μια καμπύλη επιφάνεια, όπου $\rho_{1,2}^{i}$ και $\rho_{1,2}^{r}$ αποτελούν τις κύριες ακτίνες καμπυλότητας του προσπίπτοντος και του ανακλώμενου "σωλήνα" ακτινών αντίστοιχα.


Προσπίπτων "σωλήνας" ακτινών
Ανακλώμενος "σωλήνας" ακτινών
ρ'2
ρ'1
n̂
s
QR
ρ''1
ρ''2
surface

Διασπορά σε αδρές επιφάνειες

Για άπειρες ιδανικά λείες επιφάνειες, η ολική ενέργεια ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος ανακλάται στην κατοπτρική κατεύθυνση που ορίζεται από το νόμο του Snell για την ανάκλαση, όπως είδαμε σε προηγούμενη ενότητα. Σε πραγματικές συνθήκες όμως, κάποιο μέρος της ενέργειας διασπείρεται σε διαφορετικές από την κατοπτρική κατευθύνσεις εξαιτίας της αδρότητας της επιφάνειας.

Η διασπαρμένη ενέργεια διαχωρίζεται γενικά σε σύμφωνη και ασύμφωνη συνιστώσα. Η σύμφωνη συνιστώσα ορίζεται από τη μέση τιμή του διασπαρμένου πεδίου, ενώ η ασύμφωνη συνιστώσα χαρακτηρίζει την απόκλιση από αυτή τη μέση τιμή. Η σύμφωνη συνιστώσα μειώνεται όταν αυξάνεται η αδρότητα της επιφάνειας, ενώ η ασύμφωνη συνιστώσα σε αυτή την περίπτωση γίνεται περισσότερο σημαντική. Πριν επιχειρήσει κανείς να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της διασποράς λοιπόν πρέπει να υπολογίσει ποσοτικά την αδρότητα της επιφάνειας. Δεν θα επεκταθούμε σε αυτό το θέμα. Εκτενής ανάλυση υπάρχει στο [6]. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται το φαινόμενο της διασποράς και είναι εύκολο να παρατηρηθούν ο κύριος λοβός του πεδίου που αποτελεί την κύρια κατεύθυνση ανάκλασης καθώς και οι δευτερεύοντες λοβοί που είναι αποτέλεσμα της διασποράς.

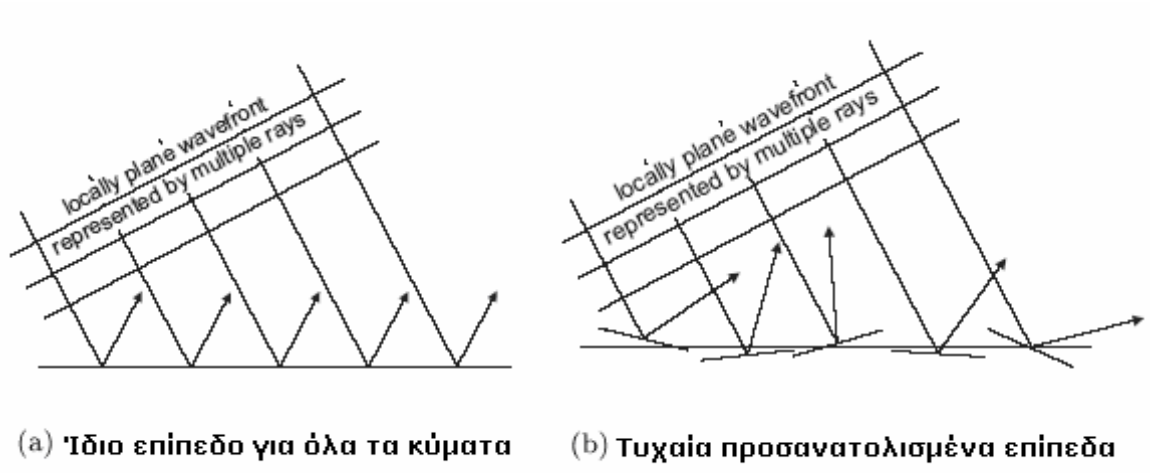


Στοχαστική προσέγγιση της διασποράς

Η πρωτότυπη στοχαστική προσέγγιση της διασποράς βασίζεται στις ίδιες υποθέσεις με τις διατυπώσεις του Kirchhoff ή της γεωμετρικής οπτικής για τη διασπορά λόγω της επιφάνειας (βλ. [6]). Αυτές οι θεωρίες εφαρμόζονται σε επιφάνειες με ήπιες πτυχές, των οποίων οι οριζόντιες διαστάσεις είναι πολύ μεγάλες συγκρινόμενες με το προσπίπτον μήκος κύματος. Ως εκ τούτου, το ολικό πεδίο σε κάθε σημείο της επιφάνειας μπορεί να υπολογιστεί με τη θεώρηση ότι το κύμα προσκρούει στο εφαπτομενικό επίπεδο σε εκείνο το σημείο. Αυτή η προσέγγιση του εφαπτομενικού επιπέδου είναι η βασική υπόθεση για τις μεθόδους του Kirchhoff.

Η διαφορά με την κατοπτρική ανάκλαση, σύμφωνα με την οποία όλα τα στοιχειώδη κύματα ενός προσπίπτοντος ομοιόμορφου επιπέδου κύματος ανακλώνται στην ίδια ιδανικά λεία επίπεδη διαχωριστική επιφάνεια, βρίσκεται στο διαφορετικό προσανατολισμό των εφαπτομενικών επιπέδων στο χώρο και στα μεταβαλλόμενα ύψη στα αντίστοιχα σημεία ανάκλασης για κάθε στοιχειώδες κύμα. Για αυτό το λόγο, σε αυτή την περίπτωση παρατηρούνται και φαινόμενα αποπόλωσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και διασποράς σε διευθύνσεις διαφορετικές από την κατοπτρική.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η διαφορά στην ανάκλαση σε μια λεία και σε μια αδρή διαχωριστική επιφάνεια. Παρατηρούμε την ύπαρξη ενός μετώπου κύματος που ανακλάται στη μια περίπτωση, και την ύπαρξη πολλών μετώπων κυμάτων με τυχαίες διευθύνσεις ανάκλασης στην άλλη περίπτωση.



(a) Ίδιο επίπεδο για όλα τα κύματα (b) Τυχαία προσανατολισμένα επίπεδα

Η στοχαστική προσέγγιση της διασποράς βασίζεται στην ιδέα ότι κάθε τοπικά επίπεδο μέτωπο κύματος στην ουσία αναπαρίσταται από πολλαπλές διακριτές ακτίνες κυμάτων αντί μόλις μιας. Αντί να ανακλώνται όλες αυτές οι διακριτές ακτίνες στο ίδιο επίπεδο της διαχωριστικής επιφάνειας, ο προσανατολισμός του επιπέδου (το κανονικό του διάνυσμα) και η θέση του (το ύψος του) μεταβάλλονται στατιστικά για κάθε διακριτή ακτίνα και κάθε ανάκλαση. Με αυτήν την έννοια, κάθε διακριτή ακτίνα εξετάζεται σαν αντιπρόσωπος ενός στοιχειώδους κύματος για το τοπικά επίπεδο μέτωπο κύματος.

Οι παραλλαγές του τοπικού εφαπτομενικού επιπέδου φυσικά πρέπει να συσχετιστούν με τις ιδιότητες της αδρής επιφάνειας (βλ.[6]).

<u>Πολυδιαδρομική διάδοση</u>

Κάθε κύμα στη διαδρομή του από τον πομπό προς τον δέκτη υφίσταται συγκεκριμένη εξασθένηση, αποπόλωση, μετατόπιση συχνότητας και καθυστέρηση εξαιτίας όλων των προαναφερθέντων φαινομένων διάδοσης. Μετακινούμενα αντικείμενα, όπως αυτοκίνητα και τρένα, ή η κίνηση του πομπού ή του δέκτη, επιπρόσθετα εισάγουν μια μετατόπιση Doppler για κάθε κύμα. Στο σύνθετο περιβάλλον τούνελ, υπάρχουν ορισμένες διαδρομές που μπορεί να ακολουθήσει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα από τον πομπό προς το δέκτη, κάθε μια εκ των οποίων αντιπροσωπεύει μια φυσική διαδρομή διάδοσης για το αντίστοιχο κύμα. Για το συγκεκριμένο φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης, οι διαφορετικές αντικρουόμενες ακτίνες παρεμβάλλουν, συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στο λαμβανόμενο από

το δέκτη πεδίο. Ανάλογα με τη διαδρομή, τα εμπόδια και τα φαινόμενα (αποπόλωση, μετατόπιση συχνότητας) που έχει υποστεί το κάθε κύμα στη διάδοση του από τον πομπό προς το δέκτη συμβάλλει είτε θετικά ενισχύοντας το ολικό λαμβανόμενο πεδίο, είτε συμβάλλει αρνητικά μειώνοντας σημαντικά το ολικό λαμβανόμενο πεδίο, δημιουργώντας παρεμβολές στο επιθυμητό σήμα που μεταδίδεται. Τα παραπάνω ισχύουν στην περίπτωση που ο δέκτης του σήματος είναι ακίνητος. Στην περίπτωση που ο δέκτης κινείται, τότε προκύπτει ένα δυναμικό περιβάλλον με συνεχείς αλλαγές του ηλεκτρικού μήκους κάθε μονοπατιού διάδοσης και μεταβολές των σχετικών ολισθήσεων φάσης μεταξύ των συνιστωσών συναρτήσει της χωρικής θέσης του δέκτη. Η συμβολή των πολυδιαδρομικών συνιστωσών παράγει μια μορφή στάσιμου κύματος σαν συνάρτηση της απόστασης.

Το παραπάνω φαινόμενο ονομάζεται διάλειψη και διακρίνουμε δυο είδη του. Πρώτον, τις *διαλείψεις μεγάλης κλίμακας* (long-term fading) που περιλαμβάνουν τις απώλειες διάδοσης, δηλαδή τη μεταβολή της εξασθένησης συναρτήσει της απόστασης, και τη σκίαση, δηλαδή την τυχαία μεταβολή της εξασθένησης για δεδομένη απόσταση, και δεύτερον, τις *διαλείψεις μικρής κλίμακας* (short-term fading) που περιγράφουν τη μεταβολή των χαρακτηριστικών του σήματος (πλάτους και φάσης) για μετατοπίσεις του κινητού σταθμού της τάξης του λ/2. Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας οφείλονται στη χρονική διασπορά του σήματος λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης και στη χρονική μεταβολή του διαύλου λόγω μετατόπισης του δέκτη αλλά και των σκεδαστών που συμμετέχουν στη διάδοση.

<u>Διασπορά καθυστέρησης</u>

Για να χαρακτηριστεί η επιλεκτική στη συχνότητα συμπεριφορά ενός καναλιού μετάδοσης, σημαντικό ρόλο παίζει η αναπόσπαστη παράμετρος της *διασποράς καθυστέρησης* $\boldsymbol{\sigma_T}$. Είναι ένα εργαλείο μέτρησης της διεύρυνσης του μεταδιδόμενου παλμού ενέργειας εξαιτίας της διασκορπιστικής στο πεδίο του χρόνου επίδρασης του καναλιού. Μαθηματικά, είναι ισοδύναμο με τον ορισμό της "τυπικής απόκλισης" της κατανομής καθυστέρησης ισχύος (*Power Delay Profile*) ενός καναλιού και

για αυτό το λόγο σχετίζεται με το πλάτος του. Το PDP είναι ανάλογο του τετραγώνου της απόλυτης τιμής της απόκρισης βαθυπερατής διέγερσης (βλ.[6]). Η τετραγωνική ρίζα της δεύτερης κεντρικής ροπής του PDP, η οποία είναι η διασπορά καθυστέρησης, μπορεί να υπολογιστεί άμεσα ως εξής:

$$\sigma_\tau = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \tau_i^2 T_i^2}{\sum_{i=1}^{n} T_i^2} - \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} \tau_i T_i^2}{\sum_{i=1}^{n} T_i^2} \right)^2}$$

Το δεξιό μέρος στο υπόριζο είναι η τετραγωνική μέση καθυστέρηση. Ένα κανάλι μη διασκορπιστικό στο πεδίο του χρόνου έχει διασπορά καθυστέρησης ίση με μηδέν. Όσο μεγαλύτερη είναι η διασπορά καθυστέρησης, τόσο πιο ισχυρή είναι η επιλεκτική στη συχνότητα συμπεριφορά του καναλιού.

<u>Διασπορά Doppler</u>

Ακολουθώντας την ίδια προσέγγιση με τη διασπορά καθυστέρησης στο πεδίο της καθυστέρησης, η μεταβαλλόμενη στο χρόνο συμπεριφορά ενός καναλιού μπορεί να χαρακτηριστεί πλήρως από τη διασπορά Doppler στο πεδίο Doppler. Η διασπορά Doppler $\boldsymbol{\sigma_v}$ είναι ένα εργαλείο μέτρησης της διεύρυνσης της θεωρητικά απείρως στενής φασματικής γραμμής μιας αρμονικής διέγερσης εξαιτίας της διασκορπιστικής στο πεδίο της συχνότητας συμπεριφοράς του καναλιού. Μαθηματικά είναι ισοδύναμο με τον ορισμό της τυπικής απόκλισης του φάσματος Doppler επί 2. Το φάσμα Doppler είναι ανάλογο με το τετράγωνο της απόλυτης τιμής της συνάρτησης διασποράς καθυστέρησης Doppler ολοκληρωμένη σε χρόνο τ (βλ.[6]). Για αυτό το λόγο, σύμφωνα με την υπόθεση για τη διασπορά καθυστέρησης, η διασπορά Doppler μπορεί να υπολογιστεί άμεσα ως εξής:

$$\sigma_v = 2\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} v_i^2 T_i^2}{\sum_{i=1}^{n} T_i^2} - \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} v_i T_i^2}{\sum_{i=1}^{n} T_i^2} \right)^2}$$

Και πάλι, το δεξιό μέρος του υπόριζου είναι η τετραγωνική μέση τιμή Doppler (βλ.[6]). Ένα μη διασκορπιστικό στη συχνότητα κανάλι έχει

διασπορά Doppler ίση με μηδέν. Όσο μεγαλύτερη είναι η διασπορά Doppler, τόσο ισχυρότερη είναι η μεταβαλλόμενη χρονικά συμπεριφορά του καναλιού.

3.5 Βασικοί μηχανισμοί διάδοσης σε περιβάλλον τούνελ

Η βασική προϋπόθεση της σχεδίασης ενός συστήματος ραδιοεπικοινωνίας σε περιβάλλον τούνελ είναι η καλή κατανόηση των βασικών μηχανισμών διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Ο συγκεκριμένος τύπος περιβάλλοντος είναι πολύ σύνθετος και απλές δοκιμές και μετρήσεις του πεδίου στο χώρο δεν έχουν νόημα και κέρδος χωρίς την ανάλυση του θεωρητικού υπόβαθρου. Υπάρχει ένας αριθμός μηχανισμών διάδοσης που έχουν προταθεί. Όταν ένας νέος τρόπος προτείνεται, νέα συστήματα που βασίζονται σε αυτό δοκιμάζονται για την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία τους. Άλλωστε η αλληλεπίδραση θεωρίας και πράξης είναι κρίσιμη σε έναν τομέα που οι διαφορές των θεωρητικών μοντέλων και των πρακτικών καταστάσεων είναι σημαντικές.

Η λύση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων που αναφέρονται σε υπόγειες επικοινωνίες όπου πρέπει να ληφθεί υπόψη η πεπερασμένη αγωγιμότητα των τοιχωμάτων της σήραγγας είναι μια δύσκολη υπόθεση που απαιτεί τη χρήση ανώτερων μαθηματικών, ακόμη και στην πιο απλή περίπτωση μιας ευθείας σήραγγας. Οι πρακτικές καταστάσεις εμπεριέχουν μεγαλύτερη ακόμη πολυπλοκότητα λόγω της ποικιλίας των συνθηκών που χρειάζεται σε κάθε περίπτωση να αντιμετωπιστούν. Για αυτό το λόγο πολύ συχνά χρησιμοποιούνται υπεραπλουστευμένα μοντέλα για τα οποία ωστόσο πρέπει να είναι γνωστοί οι περιορισμοί που εισάγουν και να δοκιμαστεί η εγκυρότητά τους.

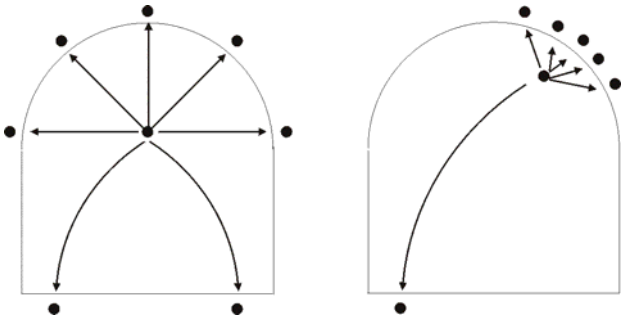
Ένα άδειο τούνελ συμπεριφέρεται σαν ένας κυματοδηγός με συχνότητα αποκοπής μερικών δεκάδων MHz ανάλογα με το σχήμα και το μέγεθος της διατομής του. Όταν η συχνότητα αυξάνεται πάνω από το όριο αποκοπής, ένας ακόμη μεγαλύτερος αριθμός ρυθμών μπορούν να διαδοθούν, αλλά η εξασθένησή τους μειώνεται πολύ αργά και μπορεί να πάρει αποδεκτές τιμές μόνο σε πολύ υψηλές συχνότητες στις οποίες ένας μεγάλος αριθμός ρυθμών διαδίδεται. Φυσικά, σε πραγματικές καταστάσεις τα κύματα

υποφέρουν από όλα τα φαινόμενα που προκύπτουν από τα εμπόδια που συναντούν και εξασθενούν σε μεγάλο βαθμό στις καμπές και τις γωνίες.

Αυτός ο μηχανισμός φυσικής διάδοσης είναι χρήσιμος μόνο για κοντινές αποστάσεις. Έχουν γίνει προσπάθειες για να μειωθούν οι επιδράσεις των εμποδίων και των τοιχωμάτων στη διάδοση. Αυτές οι προσπάθειες βασίζονται στη χρήση ενός τύπου μονωμένου καλωδίου το οποίο διατρέχει κατά μήκος το τούνελ και μπορεί να υποστηρίξει ένα ρυθμό διάδοσης TEM χρησιμοποιώντας το καλώδιο και τα τοιχώματα ως αγωγούς χωρίς να έχει συχνότητα αποκοπής. Ο ρυθμός συναντάται με πολλές ονομασίες – μονονηματικός, απλού καλωδίου και ομοαξονικός (βλ.[9]).

Ομοαξονικός ρυθμός

Στη χρήση αυτού του ρυθμού βασίζεται η ιδέα μονών καλωδίων που χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα ραδιοκάλυψης τούνελ. Οι γραμμές του πεδίου φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Στις περισσότερες των περιπτώσεων, το καλώδιο μπορεί να κρεμαστεί σε πολύ εκκεντρική θέση στην οροφή του τούνελ, με διπλή δυσμενή συνέπεια. Πρώτον, οι γραμμές του πεδίου παραμορφώνονται με τέτοιο τρόπο που ο κινητός δέκτης που κινείται σε φυσιολογική θέση στη διατομή του τούνελ να είναι ασθενώς συζευγμένος με το ρυθμό και το σύστημα. Δεύτερον, το ρεύμα που επιστρέφει συγκεντρώνεται σε ένα περιορισμένο μέρος της περιφέρειας του τούνελ το οποίο οδηγεί σε αύξηση της αντίστασης του αγωγού επιστροφής και σε εξασθένηση του ρυθμού.

Ένας μηχανικός λοιπόν που σχεδιάζει ένα σύστημα πρέπει να λάβει υπόψη του αυτά τα φαινόμενα σαν συνάρτηση του σχήματος του τούνελ, τη θέση του καλωδίου και τη συγκεκριμένη αγωγή του εδάφους. Πρακτικά, θα

διευκόλυνε αν η κατανομή του πεδίου μπορούσε να προσεγγιστεί από την περίπτωση των τοιχωμάτων με άπειρη αγωγιμότητα. Αυτό θα αποτελούσε μια προσέγγιση ρυθμού TEM. Μάλιστα, πειράματα (βλ.[9]) έδειξαν ότι για συχνότητες της HF μπάντας και για αγωγιμότητες εδάφους της τάξης των 10^{-3} και 10^{-1} mho/m, η προσέγγιση του TEM ρυθμού δίνει καλά αποτελέσματα για την παραμόρφωση των γραμμών του πεδίου αλλά δεν δίνει ακριβή στοιχεία για την εξασθένηση του ομοαξονικού ρυθμού, που μπορεί να υπολογιστεί χονδρικά μόνο από διαγράμματα.

Ρυθμοί κυματοδήγησης

Όταν η συχνότητα αυξάνεται πάνω από το όριο αποκοπής, ένας μεγάλος αριθμός ρυθμών κυματοδήγησης μπορεί να διαδοθεί. Στην πρώτη οκτάβα πάνω από την αποκοπή, αυτοί οι ρυθμοί εξασθενούν σημαντικά και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν πρακτικά και σε υψηλότερες συχνότητες, ο αριθμός των κυματοδηγούμενων ρυθμών είναι τόσο μεγάλος που το πρόβλημα διάδοσης δεν μπορεί να αναλυθεί. Μια άλλη προσέγγιση σε αυτή την περίπτωση υποδεικνύει τη χρήση στάσιμων κυμάτων που θεωρούνται το αποτέλεσμα των διαφορετικών ταχυτήτων των ρυθμών διάδοσης ή των ανακλάσεων στα τοιχώματα.

Η εξασθένηση μεταξύ δυο κεραιών που βρίσκονται σε απόσταση d σε ένα ευθύ τούνελ δίνεται από:

$$a = a_0 + s + ad \quad (dB)$$

όπου a_o είναι η περιβάλλουσα του στάσιμου κύματος στο σημείο d=0 και s είναι ένα περιθώριο εμφάνισης των στάσιμων κυμάτων (95% και πάνω). Σε αυτή την εξασθένηση πρέπει να προστεθεί και η εξασθένηση λόγω των καμπών και των γωνιών.

Γραμμές μεταφοράς για αύξηση του χρήσιμου εύρους κάλυψης

Παραπάνω εξηγήθηκε η χρήση του ομοαξονικού ρυθμού για χαμηλές συχνότητες και η χρήση των ρυθμών κυματοδήγησης σε υψηλότερες συχνότητες. Ο ομοαξονικός ρυθμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί με εύρος βέλτιστων συχνοτήτων τα 5 με 10MHz σε απόσταση περίπου 1km. Όταν χρησιμοποιούνται οι ρυθμοί κυματοδήγησης, η βέλτιστη συχνότητα για τούνελ χωρίς καμπές είναι η υψηλότερη δυνατή αλλά όταν υπάρχουν

καμπές και γωνίες, περιορίζεται στη ζώνη των VHF συχνοτήτων για μερικές εκατοντάδες μέτρα. Η βασική διαφορά των δυο μεθόδων είναι ότι ο ομοαξονικός ρυθμός παρέχει κάλυψη μόνο σε τούνελ που έχουν καλώδια κρεμασμένα ενώ οι ρυθμοί κυματοδήγησης απλά διαχέονται σε κοιλότητες και πλευρικές επιφάνειες.

Η λύση για την αύξηση του εύρους συχνοτήτων και κάλυψης είναι η χρήση συστημάτων που ονομάζονται *μετατροπείς ρυθμού* ή *ακτινοβολητές* ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας. Αυτές οι συσκευές διεγείρουν και τον ομοαξονικό ρυθμό και τους ρυθμούς κυματοδήγησης καλύπτοντας τα πλεονεκτήματα των δυο μεθόδων.

3.6 Φυσική διάδοση

Η φυσική διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων δείχνει να είναι η απλούστερη μέθοδος για την εγκαθίδρυση ραδιοεπικοινωνίας σε ένα υπόγειο τούνελ. Σήμερα, το πρόβλημα των ραδιοεπικοινωνιών σε περιβάλλον τούνελ έχει λυθεί με τη χρήση των διαρρεόντων γραμμών μεταφοράς (leaky transmission lines) ως υποστήριξη στη μετάδοση των εγκάρσιων ηλεκτρομαγνητικών ρυθμών. Αυτοί οι ρυθμοί χαρακτηρίζονται από την απουσία συχνότητας αποκοπής και από το γεγονός ότι η εξασθένηση που εμφανίζεται αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας. Παρόλα αυτά, όταν η συχνότητα είναι αρκετά υψηλή, οι φυσικοί ρυθμοί διάδοσης (εγκάρσιοι ηλεκτρικοί ή εγκάρσιοι μαγνητικοί) εμφανίζονται και παρεμβάλλουν με τους εγκάρσιους ηλεκτρομαγνητικούς ρυθμούς που υποστηρίζονται από τη γραμμή μεταφοράς.

Η φυσική διάδοση είναι χρήσιμη για να λύσει κάποια συγκεκριμένα προβλήματα, όπως είναι οι ραδιοεπικοινωνίες σε σήραγγες με εμπόδια, που δεν μπορούν να λυθούν εύκολα με τη βοήθεια της θεωρίας των γραμμών μεταφοράς. Οι φυσικοί ρυθμοί διάδοσης είναι επίσης χρήσιμοι σε επικοινωνίες κοντινής απόστασης, όπως για παράδειγμα σε ένα οδικό τούνελ. Για αποστάσεις μικρότερες των 200m η χρήση αυτών των ρυθμών είναι πιο κατάλληλη από τη χρήση των ρυθμών γραμμών μεταφοράς.

Τα τελευταία χρόνια εμφανίζεται ένα ολοένα και περισσότερο αυξανόμενο ενδιαφέρον στη φυσική διάδοση. Παρόλο που υπάρχουν αρκετές θεωρητικές μελέτες που ασχολούνται με τη φυσική διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε τούνελ που δρουν σαν κυματοδηγοί, τα πειραματικά αποτελέσματα περιορίζονται σε δυο με τρεις συχνότητες. Δεν είναι αριθμητικά αρκετά για την επαλήθευση των θεωρητικών υποθέσεων. Αυτή η μελέτη κάνει ευδιάκριτη τη σχέση μεταξύ των εγκάρσιων διαστάσεων του τούνελ και της εξασθένησης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Θεωρία διάδοσης

Από θεωρητικής άποψης, κάποιος θα μπορούσε να αναπαραστήσει το τούνελ σαν ένα κοίλο αγωγό που δρα σαν κυματοδηγός. Ένας τέτοιος οδηγός κάνει πιθανή την εμφάνιση εγκάρσιων ηλεκτρικών και εγκάρσιων μαγνητικών ρυθμών όταν η συχνότητα είναι υψηλότερη από μια περιοριστική τιμή, τη συχνότητα αποκοπής του συγκεκριμένου ρυθμού. Οι τιμές αυτών των συχνοτήτων αποκοπής εξαρτώνται από το ρυθμό και καθορίζονται από το σχήμα και την εγκάρσια διάσταση του διαδρόμου. Τα μήκη κύματος αποκοπής για έναν ορθογώνιο κυματοδηγό δίνονται από τον τύπο:

$$\lambda_{mn} = \frac{2\sqrt{ab}}{\sqrt{m^2 \frac{b}{a} + n^2 \frac{a}{b}}} \qquad (1)$$

Όπου a είναι το πλάτος του οδηγού και b είναι το ύψος του. Τα m, n παίρνουν τιμές 1, 2, 3... για τους ρυθμούς TM_{mn} και 0, 1, 2, 3... για τους ρυθμούς TE_{mn}. Για ένα κυκλικό κυματοδηγό, για τους ρυθμούς TM_{mn} ισχύει:

$$\lambda_{mn} = \frac{2\pi}{x_{mn}} r \qquad (2)$$

Όπου r είναι η ακτίνα του κυματοδηγού και x_{mn} είναι η n-οστή ρίζα της συνάρτησης Bessel m-οστής σειράς. Για τους ρυθμούς TE_{mn} ισχύει:

$$\lambda_{mn} = \frac{2\pi}{x'_{mn}} r \qquad (3)$$

Όπου x'_{mn} είναι η n-οστή ρίζα της πρώτης παραγώγου της συνάρτησης Bessel m-οστής σειράς.

Κάτω από τη χαμηλότερη συχνότητα αποκοπής, δεν είναι δυνατή η διάδοση. Εκεί, η μείωση του πεδίου είναι συνάρτηση μόνο των εγκάρσιων διαστάσεων του τούνελ. Η εξασθένηση *a* είναι ανεξάρτητη των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του τοίχου. Αυξάνεται προς μια περιοριστική τιμή όσο η συχνότητα μειώνεται σε ακολουθία με την παρακάτω εξίσωση (βλ.[7]):

$$a = \frac{54.6}{\lambda_c}\sqrt{1-\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)^2}\ dB/unit\ length \qquad (4)$$

Όπου λ_c είναι η μεγαλύτερο μήκος κύματος αποκοπής του κυματοδηγού.

Πάνω από τη συχνότητα αποκοπής του, η εξασθένηση κάθε ρυθμού εξαρτάται από τη συχνότητα, το σχήμα, τις εγκάρσιες διαστάσεις και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του κυματοδηγού.

Για ορθογώνιους κυματοδηγούς, αυτή η εξασθένηση δίνεται για τους TM_{mn} ρυθμούς ως (βλ.[7]):

$$a = 8.69\frac{2R}{\zeta a}\left(\frac{m^2+n^2\frac{a^3}{b^3}}{m^2+n^2\frac{a^2}{b^2}}\right)\frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{\lambda_{mn}}\right)^2}}\ dB/m \qquad (5)$$

Όπου
ζ η αντίσταση του μέσου διάδοσης $=\sqrt{\mu/\varepsilon}$
R $=10.88\times10^{-3}\sqrt{\left(10^7/\sigma\right)(1/\lambda)}\ ohms$
σ η αγωγιμότητα των τοίχων του οδηγού σε mho/m
μ η διαπερατότητα του μέσου διάδοσης σε henry/m
ε η επιτρεπτότητα του μέσου διάδοσης σε farad/m

Για τους TE_{mn} ρυθμούς η εξασθένηση *a* δίνεται από τον τύπο (βλ.[7]):

$$a = 8.69\frac{2R}{\zeta b}\left(\frac{\varepsilon_n m^2\frac{b}{a}+\varepsilon_m n^2}{m^2\frac{b}{a}+n^2\frac{a}{b}}\sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{\lambda_{mn}}\right)^2}+\frac{\left(\varepsilon_n+\varepsilon_m\frac{b}{a}\right)\left(\frac{\lambda}{\lambda_{mn}}\right)^2}{\sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{\lambda_{mn}}\right)^2}}\right)\ dB/m \quad (6)$$

Όπου ε_m = 1 αν m = 0 και ε_m = 2 σε άλλη περίπτωση.

Για κυκλικούς κυματοδηγούς, η εξασθένηση *a* για τους TM_{mn} ρυθμούς δίνεται από τον τύπο (βλ.[7]):

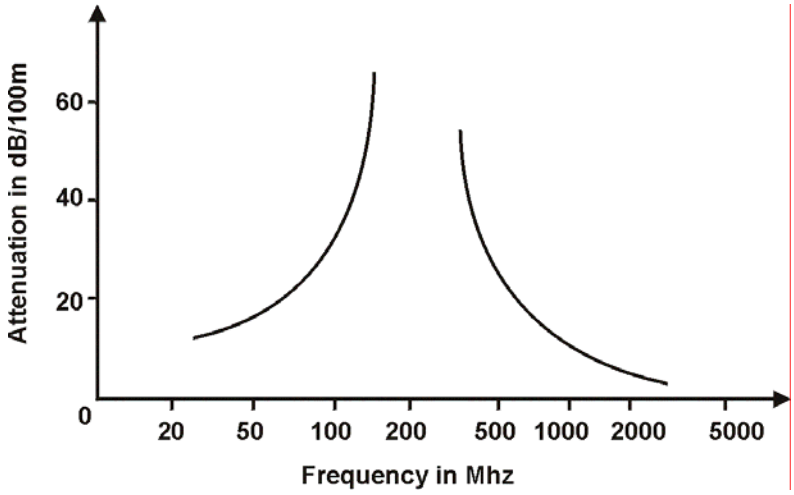
$$a = 8.69\frac{R}{\zeta r}\frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{\lambda_{mn}}\right)^2}}\ dB/m \quad (7)$$

Και για τους TE_{mn} ρυθμούς (βλ.[7]):

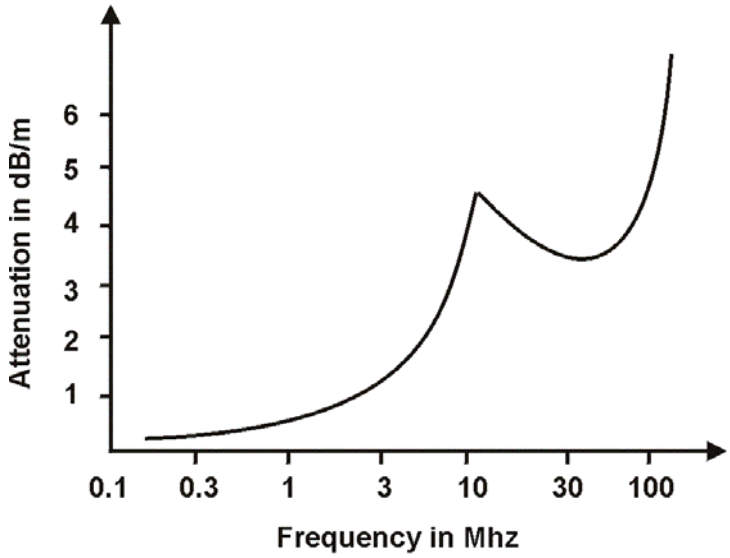
$$a = 8.69\frac{R}{\zeta r}\left[\frac{m^2}{x'^2_{mn}-m^2}+\left(\frac{\lambda}{\lambda_{mn}}\right)^2\right]\frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{\lambda_{mn}}\right)^2}}\ dB/m \quad (8)$$

<u>*Αναφορές σε πειραματικά δεδομένα*</u>

Η θεωρητική ανάπτυξη που περιγράφηκε παραπάνω είναι εφαρμόσιμη μόνο σε έναν υψηλής αγωγιμότητας κοίλο αγωγό. Τα πραγματικά τούνελ απέχουν πολύ από το να χαρακτηριστούν ιδανικά. Αν αναλυθούν παλαιότερα πειραματικά αποτελέσματα, όπως για παράδειγμα αυτά των Monk και Winbigler σε σιδηροδρομικό τούνελ ή αυτά των Ivanov, Sakalov και Puskar σε εξορυκτικά τούνελ, η συμπεριφορά του κυματοδηγού δεν γίνεται σαφής. Φαίνεται στο σχήμα 2 ότι όταν η συχνότητα μειώνεται, η εξασθένηση δεν φτάνει στην ασυμπτωτική τιμή που προβλέπεται από την εξίσωση (4). Επιπλέον, η συχνότητα αποκοπής δεν γίνεται εμφανής στα σχήματα 1 και 2.



Σχήμα 1 – Εξασθένηση συναρτήσει της συχνότητας σύμφωνα με τους Monk και Winbigler



Σχήμα 2 – Εξασθένηση συναρτήσει της συχνότητας σύμφωνα με τους Ivanov, Sakalo και Puskar

Η κύρια διαφορά μεταξύ ενός μοντέλου κυματοδηγού και ενός πραγματικού τούνελ είναι ότι η αγωγιμότητα του τούνελ είναι πολύ μικρή. Σαν συμπέρασμα, υπάρχουν δυο όρια σε αυτό το μοντέλο κυματοδηγού. Πρώτον, όταν αυξάνεται η συχνότητα, οι τοίχοι δρουν περισσότερο σαν διηλεκτρικό μέσο παρά σαν αγώγιμο μέσο. Σε αρκετά υψηλές συχνότητες, η απώλεια οφείλεται ουσιαστικά στο ότι όποιο μέρος του κύματος προσπίπτει στον τοίχο του τούνελ μερικώς διαθλάται στο εσωτερικό του τοίχου και μερικώς ανακλάται πίσω στο τούνελ.

Μια καλή προσέγγιση αυτού του προβλήματος γίνεται με τη χρήση γεωμετρικής οπτικής μεθόδου από τους Mahmoud και Wait. Έδειξαν ότι

παρόλο που η αύξηση της εξασθένησης ρυθμού που οφείλεται στην τυπική τραχύτητα των εξορυκτικών τούνελ αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας, η ολική εξασθένηση είναι πάντοτε μια φθίνουσα συνάρτηση της συχνότητας. Αυτό το συμπέρασμα είναι έγκυρο υπό την προϋπόθεση ότι το μήκος κύματος είναι μικρό σε σύγκριση με τις εγκάρσιες διαστάσεις του τούνελ.

Το δεύτερο όριο είναι ότι κάτω από τη συχνότητα αποκοπής του τούνελ, αν η συχνότητα είναι αρκετά μικρή, το ηλεκτρομαγνητικό κύμα μπορεί να διαδοθεί μέσα στο βράχο με τον ίδιο τρόπο σαν να μην υπήρχε τούνελ. Τότε η εξασθένηση *a* στο τούνελ είναι η ίδια όπως μέσα στο βράχο. Δίνεται από τη σχέση:

$$a = 8.69\sqrt{\frac{2\pi\sigma\mu}{2} f}\ dB/m \quad (9)$$

Όπου f είναι η συχνότητα σε Hz, μ η διαπερατότητα σε henry/m και σ η αγωγιμότητα του βράχου σε mho/m.

Αυτό εξηγεί γιατί σε ορισμένα τούνελ η συχνότητα αποκοπής δεν υπάρχει. Πράγματι, η εξασθένηση όπως υπολογίζεται στην (9) μπορεί να είναι χαμηλότερη από την εξασθένηση που δίνεται από την (4).

Από τις δοκιμές (βλ.[7]) εξήχθησαν και τα παρακάτω συμπεράσματα (για ορθογώνιο τούνελ): φαίνεται ότι κάτω από τα 40MHz, η πόλωση δεν έχει καμία επίδραση στη διάδοση. Μάλιστα, ο μόνος ρυθμός που μπορεί να διαδοθεί με χαμηλή εξασθένηση σε αυτές τις συχνότητες είναι ο TE_{10} ρυθμός. Όταν και οι δυο ρυθμοί μπορούν να διαδοθούν με χαμηλή εξασθένηση, διαφορές παρουσιάζονται στην εξασθένηση με βάση την πόλωση. Αυτές οι διαφορές παύουν να παρατηρούνται στις υψηλότερες συχνότητες ως αποτέλεσμα της υψηλής εξασθένησης του TE_{10} ρυθμού.

Επιπλέον, στις υψηλότερες συχνότητες, ένας μεγάλος αριθμός ρυθμών μπορεί να εμφανιστεί. Οι θεωρητικές υποθέσεις των Wait και Mahmoud δείχνουν ότι η εξασθένηση μειώνεται όταν αυξάνεται η συχνότητα.

Το πιο δύσκολο πρόβλημα που αφορά το συσχετισμό των πειραματικών αποτελεσμάτων και των θεωρητικών υποθέσεων είναι ότι οι ρυθμοί TEM μπορεί να εμφανίζονται ταυτόχρονα με τους ρυθμούς του κυματοδηγού και επίσης ότι δεν υπάρχουν γενικά πληροφορίες σχετικά με τις ηλεκτρικές ιδιότητες των τοίχων του τούνελ. Οι ρυθμοί TEM οφείλονται στην παρουσία στα περισσότερα τούνελ διαμηκών αγωγών όπως σωλήνες, σιδηροδρομικές τροχιές, καλώδια κλπ.

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του βράχου που βρίσκουμε σε διάφορους πίνακες είναι άχρηστα για την παρούσα εφαρμογή. Πράγματι, η αγωγιμότητα και η επιτρεπτότητα ποικίλουν ανάλογα με τη συχνότητα, την ανισοτροπικότητα των βράχων και τις τοπικές συνθήκες όπως η περιεκτικότητα νερού.

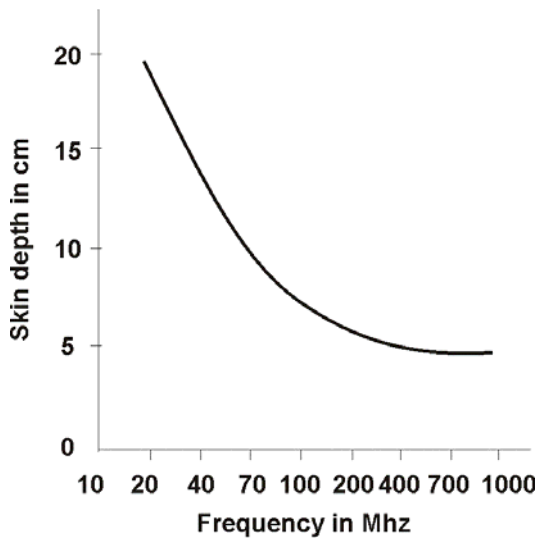
Επίδραση των εγκάρσιων διαστάσεων του τούνελ

Μοιάζει δύσκολο να προβλεφθεί η εξασθένηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε ένα τούνελ χωρίς να καθορισθεί η αγωγιμότητα των τοιχωμάτων, εκτός από την περίπτωση η συχνότητα να είναι κάτω από τη συχνότητα αποκοπής, οπότε και η εξασθένηση είναι ανεξάρτητη της αγωγιμότητας των τοιχωμάτων.

Δυστυχώς, η εξασθένηση είναι πάντοτε απαγορευτική κάτω από τη συχνότητα αποκοπής. Συνεπώς, η φυσική διάδοση δεν είναι χρήσιμη σε αυτή την περίπτωση.

Πάνω από τη συχνότητα αποκοπής, αν η εξασθένηση αυξάνεται ανάλογα της τετραγωνικής ρίζας της ειδικής αντίστασης των τοιχωμάτων του τούνελ, τότε είναι ισχυρά εξαρτημένη από τις εγκάρσιες διαστάσεις του τούνελ, σύμφωνα με τις (5) ως (8). Για αυτό το λόγο, το κατά πόσο είναι εφικτή η ραδιοεπικοινωνία σε ένα τούνελ εξαρτάται περισσότερο από τις εγκάρσιες διαστάσεις του παρά από την αγωγιμότητα των τοιχωμάτων του.

Βάθος διείσδυσης



$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sqrt{\left(\omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_2^* \mu_2\right)^2 + \left(\omega\ \mu_2 \sigma_2\right)^2} - \omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_2^* \mu_2}}$$

Σε πραγματικές συνθήκες, τα τοιχώματα του τούνελ από τσιμέντο είναι πεπερασμένου πάχους. Σε αρκετά χαμηλές συχνότητες (κάτω από τις συχνότητες αποκοπής) το βάθος διείσδυσης μπορεί να υπερβαίνει αυτό το πάχος, οπότε σε αυτή την περίπτωση το πεδίο διαπερνά το τοίχωμα και διαδίδεται στο εξωτερικό μέρος. Παρόλα αυτά, αυτό το πρόβλημα δε μας απασχολεί αφού μας ενδιαφέρουν μόνο οι δυνατότητες ραδιοεπικοινωνίας στη σήραγγα. Ευτυχώς είναι δυνατό να κάνουμε προσεγγίσεις σε πρακτικά προβλήματα που αφορούν την αγωγιμότητα των τοιχωμάτων που απλοποιούν το συγκεκριμένο πρόβλημα.

Όταν η συχνότητα μετάδοσης είναι μεγαλύτερη από τη συχνότητα αποκοπής, το βάθος διείσδυσης είναι αναλογικά μικρό αν συγκριθεί με το πάχος του τσιμεντένιου τοιχώματος, και ως εκ τούτου μπορεί να θεωρηθεί ότι δε χρειάζεται να ληφθεί υπόψη σε θεωρητικούς υπολογισμούς. Υιοθετώντας την παραπάνω θεώρηση, το τούνελ μπορεί να αντικατασταθεί από ένα κυκλικό κυματοδηγό με την ίδια κάθετη διατομή με αυτή του τούνελ και να μελετηθεί πειραματικά η διάδοση των πεδίων και η εξασθένηση.

3.7 Εξοπλισμός μετάδοσης

Μέχρι τώρα, οι μελέτες και πειραματικές έρευνες που είναι διαθέσιμες σε τεχνική βιβλιογραφία σχετικά με το θέμα του εξοπλισμού βρίσκουν εφαρμογή κυρίως σε σιδηροδρομικά τούνελ. Σε αυτές στις περιπτώσεις, το κινητό όχημα είναι υποχρεωμένο να ακολουθεί μια σταθερή τροχιά και για το συγκεκριμένο σκοπό είναι δυνατό να κατασκευαστεί μια κατάλληλα διαμορφωμένη κεραία για το όχημα. Αντίθετα, σε οδικά τούνελ, το σύστημα της κεραίας δέκτη δε μπορεί να βελτιστοποιηθεί διότι, για πρακτικούς σκοπούς (βλ.[8]), πρέπει να χρησιμοποιηθεί η κοινή κεραία λ/4. Για αυτό το λόγο, είναι απαραίτητη η έρευνα του ποσού της ενέργειας που μπορεί να φτάσει σε ένα όχημα από ένα σύστημα που ακτινοβολεί για να μεταβιβάσει σήματα ραδιοεπικοινωνιών μέσα σε ένα τούνελ.

Ένα ραδιοσήμα μπορεί να μεταδοθεί σε ένα τούνελ χρησιμοποιώντας ένα από τα παρακάτω συστήματα ακτινοβολίας:

1) *Κεραίες*: Σε αυτή την περίπτωση, το σήμα που μεταδίδεται από ένα σταθερό σταθμό λαμβάνεται από μια κεραία που είναι τοποθετημένη εκτός τούνελ και, αφού υποστεί ενίσχυση, μεταδίδεται ξανά μέσα στο τούνελ από μια κεραία που είναι τοποθετημένη στην είσοδο της σήραγγας.

2) *Ακτινοβολούσες γραμμές* είτε μη ισορροπημένες (slotted ομοαξονικό καλώδιο) είτε ισορροπημένες (ή συμμετρικές) (ισορροπημένες γραμμές δυο καλωδίων).

Στη περίπτωση των ακτινοβολουσών γραμμών, το σήμα που λαμβάνεται από τις κεραίες που είναι τοποθετημένες στο εξωτερικό μέρος του τούνελ, ενισχύεται κατάλληλα και μεταδίδεται από ένα καλώδιο ή από σύρματα που είναι απλωμένα κατά μήκος των τοιχωμάτων του τούνελ.

Η ολική εξασθένηση της ενέργειας στην έξοδο του ενισχυτή που τροφοδοτεί τη γραμμή και της ενέργειας που λαμβάνεται από την κεραία του οχήματος οφείλεται πρώτον στην *απώλεια μετάδοσης* μεταξύ του σημείου τροφοδοσίας και του σημείου του οχήματος κατά μήκος της

γραμμής, και δεύτερον στην *απώλεια σύζευξης* μεταξύ γραμμής και κεραίας του οχήματος.

Η *απώλεια μετάδοσης*, η οποία εξαρτάται από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της γραμμής, ποικίλλει ανάλογα με το διάστημα από την επιφάνεια των τοιχωμάτων του τούνελ, κατά μήκος των οποίων εκτείνεται. Η *απώλεια σύζευξης* εξαρτάται μόνο από την αμοιβαία θέση γραμμής και κεραίας στην εγκάρσια τομή του τούνελ. Αυτός είναι επίσης και ο κυρίαρχος και πλέον ενδιαφέρων παράγοντας από πειραματική άποψη.

Τα πειραματικά αποτελέσματα (βλ.[8]) προτείνουν ότι οι κεραίες δεν είναι κατάλληλες για αποστάσεις μεγαλύτερες των 200 και 250m. Πέρα από τα 300m και όσον αφορά τις ακτινοβολούσες γραμμές, η απώλεια μετάδοσης αυξάνεται γραμμικά με την απόσταση ενώ η απώλεια σύζευξης δεν αλλάζει.

Τέλος, μεταξύ των ακτινοβολουσών γραμμών, η ισορροπημένη προσφέρει το πλεονέκτημα του πολύ χαμηλού κόστους αλλά απαιτεί συσκευές προσαρμογής αντίστασης και είναι περισσότερο ευαίσθητη από το ομοαξονικό καλώδιο στην υγρασία. Επιπλέον, ακόμη και αν η διαφορά στην απώλεια σύζευξης μεταξύ των δυο τύπων γραμμών είναι αμελητέα, η ισορροπημένη γραμμή παρουσιάζει απώλεια μετάδοσης μεγαλύτερη από αυτή του ομοαξονικού καλωδίου. Για αυτό το λόγο είναι λιγότερο ανταγωνιστική για μακρινές αποστάσεις.

3.8 Στατιστική ανάλυση διάδοσης

Όπως είδαμε, για να επιτευχθεί ραδιοκάλυψη σε μακριά τούνελ, έχουν αναπτυχθεί δυο συστήματα: το πρώτο βασίζεται στη χρήση καλωδίων που ακτινοβολούν και είναι τοποθετημένα σε απόσταση 10-20cm μακριά από τα τοιχώματα της σήραγγας. Το δεύτερο βασίζεται στη χρήση κεραιών και στον μηχανισμό της φυσικής διάδοσης που μελετήσαμε παραπάνω. Αν η συχνότητα του φέροντος είναι αρκετά υψηλή ώστε τα μήκη κύματος να είναι πολύ μικρότερα από τις κάθετες διαστάσεις του τούνελ, η σήραγγα συμπεριφέρεται σαν ένας υπερμεγέθης κυματοδηγός και η εξασθένηση ανά μονάδα μήκους είναι χαμηλή αρκετά ώστε να επιτρέψει τη διάδοση σε αποστάσεις της τάξης του χιλιομέτρου.

Όταν συγκεκριμενοποιούμε τη μελέτη σε περιπτώσεις που τα τούνελ χρησιμοποιούνται από γρήγορα τρένα, όπως στην περίπτωση του μετρό, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτών των τούνελ είναι σχετικά ειδικής περίπτωσης αφού, για αεροδυναμικούς λόγους, οι επιφάνειες ευθείας κοπής είναι αρκετές, φθάνουν την τάξη των $100m^2$, και οι ακτίνες καμπυλότητας είναι πολύ μεγάλες, σχεδόν σαν να μην υφίστανται. Επιπροσθέτως, τέτοια τούνελ έχουν συνήθως κάθετη διατομή που προσεγγίζει σχεδόν το ορθογωνικό σχήμα, και ο αριθμός των εμποδίων, όπως καλώδια, λαμπτήρες και σήματα κυκλοφορίας, μειώνεται στο ελάχιστο δυνατό.

Υπό τέτοιες συνθήκες και λαμβάνοντας υπόψη ότι η περιοχή ενδιαφέροντος είναι η ζώνη των 400 ως 2500MHz, η φυσική διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μοιάζει να είναι ο πιο αποτελεσματικός και λιγότερο ακριβός τρόπος να διασφαλιστεί η αδιάκοπη επικοινωνία της κεραίας πομπού και του τρένου. Παρακάτω θα μελετήσουμε στατιστικά το θέμα της διάδοσης σε περιβάλλον τούνελ και θα προσπαθήσουμε να καθορίσουμε την συνάρτηση κατανομής που ακολουθείται από την περιβάλλουσα του σήματος.

Κατανομή διαλείψεων

Πειράματα και μετρήσεις που έχουν γίνει πάνω σε αυτό το θέμα (βλ.[14]) δείχνουν ότι οι γρήγορες παλινδρομήσεις του πλάτους του σήματος εξαρτώνται ισχυρά από την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Κοντά στο πομπό ένας σχετικά μεγάλος αριθμός ρυθμών διεγείρεται και αφού ο κάθε ένας από αυτούς έχει διαφορετική ταχύτητα φάσης, οι παρεμβολές μεταξύ τους συμβαίνουν γρήγορα. Αντίθετα, σε μεγάλη απόσταση από τον πομπό, οι ακτίνες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τείνουν να γίνουν παράλληλες και η σχετική αλλαγή της φάσης μεταξύ τους συμβαίνει σε μεγαλύτερη κλίμακα με άμεση συνέπεια να διαδίδονται οι ρυθμοί με τη λιγότερη εξασθένηση.

Για τον παραπάνω λόγο, η οποιαδήποτε στατιστική ανάλυση πρέπει να γίνεται κατά βάση σε μεγάλα διαστήματα απόστασης από τον πομπό. Αν

ακολουθήσουμε την τακτική της ανάλυσης με δειγματικό μέσο τα 40λ, η θεωρητική προσέγγιση θα απαιτούσε την εμφάνιση της λογαριθμοκανονικής κατανομής για τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας και μιας κατανομής Rice για τις διαλείψεις μικρής κλίμακας. Όμως τα πειραματικά αποτελέσματα (βλ.[14]) δείχνουν ασυμφωνία με τις παραπάνω προβλέψεις.

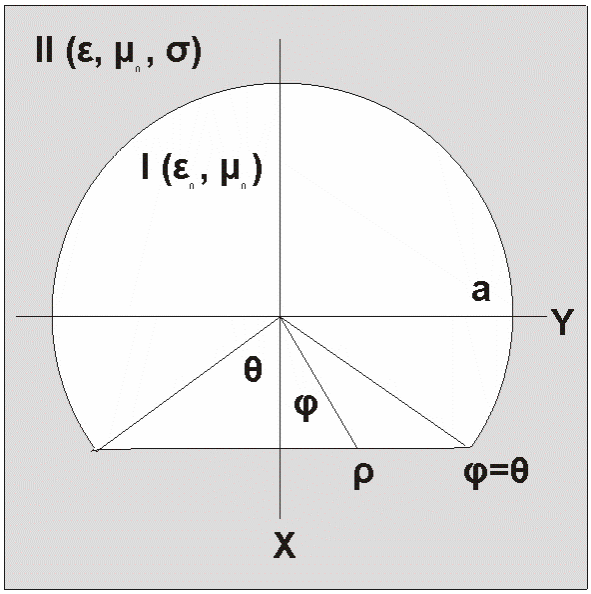
Αντίθετα, αν η ανάλυση γίνει γύρω από την γραμμή παλινδρόμησης των τιμών του πεδίου, τα αποτελέσματα δείχνουν συμφωνία των πειραματικών τιμών με κατανομές Rayleigh για τις διαλείψεις τόσο μεγάλης όσο και μικρής κλίμακας. Η κλίση της γραμμής παλινδρόμησης για κάθε διάστημα μελέτης αποτελεί τη μέση εξασθένηση του πεδίου ανά μονάδα μήκους.

3.9 Αριθμητική μέθοδος μοντελοποίησης – Point-matching τεχνική

Όπως διαπιστώνουμε από τα παραπάνω, στην περίπτωση που η κάθετη διατομή του τούνελ δεν είναι ορθογώνια αλλά κυκλική ή ελλειπτική, η θεωρητική αντιμετώπιση του προβλήματος γίνεται δύσκολη εξαιτίας του ορίου που δε συμφωνεί με το ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων. Για αυτό το λόγο, αυτής της διατομής τα τούνελ προσεγγίζονται θεωρητικά από ένα κυκλικό κυματοδηγό που έχει την ίδια επιφάνεια διατομής. Τα πειραματικά αποτελέσματα ερευνών που έχουν γίνει σε τούνελ σε όλη την Ευρώπη δείχνουν να συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με αυτή την προσέγγιση. Παρόλα αυτά δεν έχει αποδειχτεί αν αυτή η ιδέα είναι όντως σωστή και πρέπει να επαληθευτεί και με μια άλλη μέθοδο. Παρακάτω παρουσιάζεται η ιδέα της *point-matching τεχνικής* που αποτελεί μια αριθμητική μέθοδο μοντελοποίησης ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων (βλ.[12]). Δεν θα δοθεί εκτενής περιγραφή της χρήσης της μεθόδου αλλά θα δοθεί η τελική εξίσωση που εξάγεται από τη μέθοδο για τον υπολογισμό της εξασθένησης σε τοξοειδή τούνελ και θα συγκριθεί με τις αντίστοιχες εξισώσεις που έχουμε ήδη εξάγει από τη χρήση του μοντέλου του κυκλικού κυματοδηγού.

Point-matching τεχνική

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κάθετη διατομή ενός τοξοειδούς τούνελ το οποίο θεωρείται ως πρότυπο για την τεχνική.



Η συνοριακή γραμμή διαιρείται σε δυο μέρη: το κυκλικό (θ<|φ|<π) και το ευθύ (|φ|<θ). Η εσωτερική περιοχή του ορίου είναι ο ελεύθερος χώρος με επιτρεπτότητα ε_0 και διαπερατότητα μ_0, ενώ η εξωτερική περιοχή αποτελείται από ένα διηλεκτρικό μέσο με απώλειες και επιτρεπτότητα ε ($\varepsilon_r=\varepsilon/\varepsilon_0$ η σχετική διηλεκτρική σταθερά), διαπερατότητα μ_0 και αγωγιμότητα σ.

Εδώ παρουσιάζουμε μια σύντομη περιγραφή της point-matching τεχνικής. Για τον E_{11}^h ρυθμό, που αποτελεί τον κυρίαρχο ρυθμό με οριζόντια πόλωση (το εγκάρσιο ηλεκτρικό πεδίο είναι παράλληλο στον y-άξονα του παραπάνω σχήματος), οι z-συνιστώσες του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου γράφονται ως εξής:

$$E_z = \sum_{n=0}^{\infty} A_n J_n(u\rho/a)\sin(n\phi)\exp[j(\omega t - hz)]$$

$$H_z = \sum_{n=0}^{\infty} B_n J_n(u\rho/a)\cos(n\phi)\exp[j(\omega t - hz)]$$

στον εσωτερικό χώρο και

$$E_z = \sum_{n=0}^{\infty} C_n H_n^{(2)}(\upsilon\rho / a)\sin(n\phi)\exp[j(\omega t - hz)]$$

$$H_z = \sum_{n=0}^{\infty} D_n H_n^{(2)}(\upsilon\rho / a)\cos(n\phi)\exp[j(\omega t - hz)]$$

στον εξωτερικό χώρο, όπου

$$u^2 = (k_1^2 - h^2)a^2$$
$$\upsilon^2 = (k_2^2 - h^2)a^2$$
$$k_1^2 = \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0$$
$$k_2^2 = \omega^2 \varepsilon \ \mu_0 - j \ \omega \ \mu_0 \sigma \ = k_1^2 \varepsilon_r^*$$
$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_r - j \ \sigma \ / \ \omega \ \varepsilon_0$$

h = β – ja είναι η σταθερά διάδοσης, α είναι η σταθερά εξασθένησης και β η σταθερά φάσης. Επίσης τα A_n, B_n, C_n, D_n είναι άγνωστοι συντελεστές, J_n η συνάρτηση Bessel n-ιοστής τάξης και $H_n^{(2)}$ η συνάρτηση Henkel n-ιοστής τάξης δευτέρου είδους. Η παραπάνω ανάλυση μπορεί να μην είναι η πλήρης αναπαράσταση των πεδίων καθώς θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε 3 περιοχές: πρώτη περιοχή τον μεγάλο κύκλο που καλύπτει όλη τη διατομή του τούνελ, δεύτερη περιοχή το μικρό κύκλο που περιγράφει τη διατομή, και τρίτη περιοχή το χώρο μεταξύ των δυο κύκλων. Παρόλα αυτά αφού η συνοριακή γραμμή είναι κυρτή και αφού τα τελικά αποτελέσματα είναι αποδεκτά, η αναπαράσταση που χρησιμοποιείται παραπάνω θεωρείται αποδεκτή (βλ.[12]).

Τα matching points της μεθόδου επιλέγονται συμμετρικά πάνω στον x-άξονα διότι η διατομή είναι συμμετρική υπό αυτόν τον άξονα. Τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για να πάρουμε τα τελικά αποτελέσματα υπολογίστηκαν ως εξής:

$$\phi_n = \frac{\left(n - \frac{1}{2}\right)}{N}\pi \quad n = 1,2,3,...,N$$

Όπου N είναι ο αριθμός των matching points. Ταιριάζοντας τις εγκάρσιες συνιστώσες του πεδίου κατά μήκος της συνοριακής γραμμής στα ισογώνια

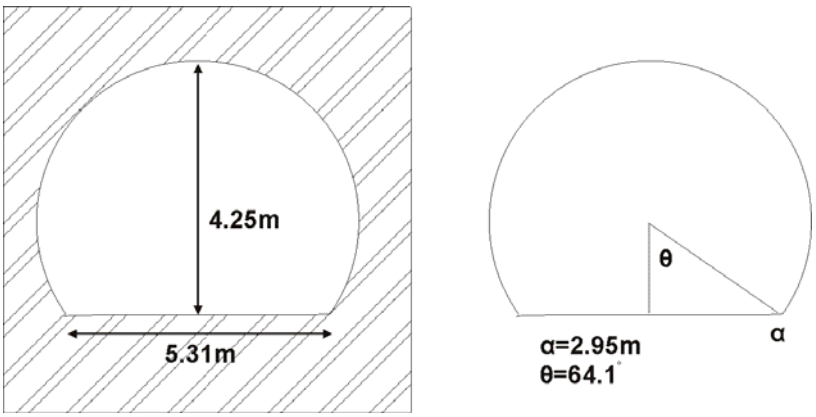
σημεία, προέκυψαν 4N-2 ομογενείς γραμμικές εξισώσεις σε μορφή πίνακα ως εξής:

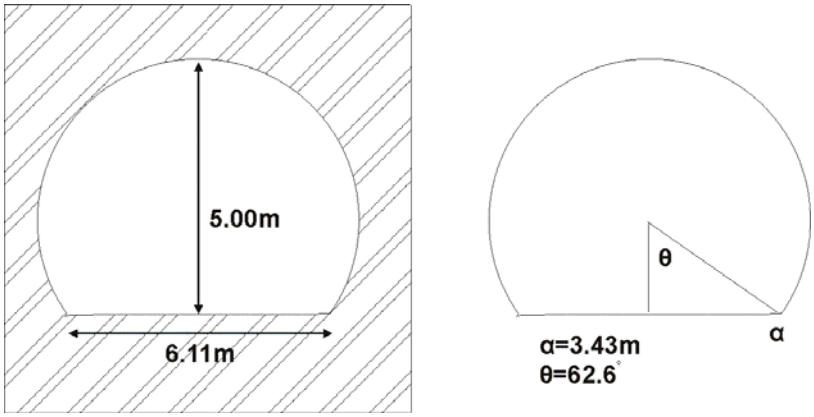
$$[Q]\,[T] = 0$$

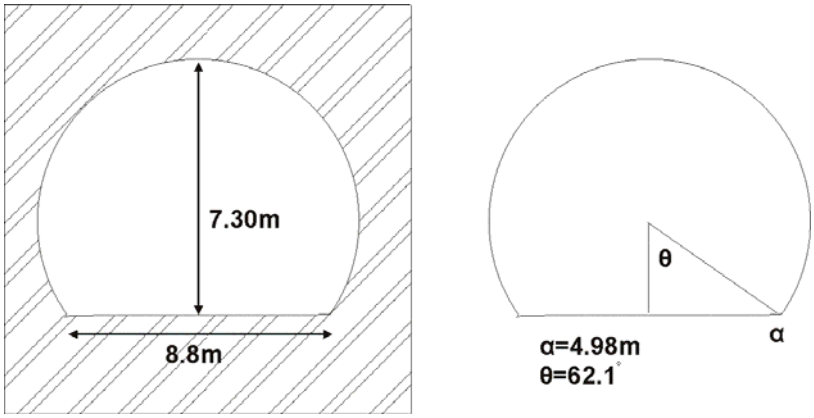
όπου [T] είναι ο πίνακας στήλη των συντελεστών A_n, B_n, C_n, D_n. Οι σταθερές διάδοσης μπορούν να βρεθούν αν ψάξουμε τα μηδενικά της det[Q]. Με παρόμοιο τρόπο, η det[Q] για τον E_{11}^{υ} ρυθμό που αντιστοιχεί σε κάθετη πόλωση (το εγκάρσιο ηλεκτρικό πεδίο είναι παράλληλο στον x-άξονα του παραπάνω σχήματος) μπορεί να υπολογιστεί ανταλλάσσοντας τα sin(nφ) και cos(nφ) μεταξύ τους στις εξισώσεις του πεδίου.

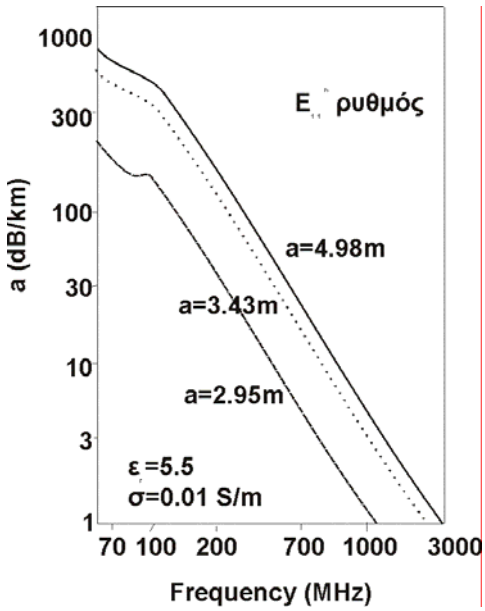
Έπειτα από δοκιμές (βλ.[12]) καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο κατάλληλος αριθμός σημείων είναι N=6 ώστε να μπορέσουμε να κάνουμε τους υπολογισμούς μας. Επιπλέον, η επίλυση των συστημάτων γίνεται με άγνωστη ποσότητα τη μιγαδική μεταβλητή u και όχι την κανονικοποιημένη σταθερά διάδοσης (βλ.[12]).

Τα θεωρητικά αποτελέσματα της μεθόδου αν εφαρμοστεί σε περιπτώσεις όπου η διατομή πλησιάζει πραγματικές περιπτώσεις τούνελ φαίνονται στο παρακάτω σχήμα, όπως και οι αντίστοιχες διατομές:









Φυσικά, όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και όπως ήταν αναμενόμενο άλλωστε, η εξασθένηση είναι αντιστρόφως ανάλογη της συχνότητας.

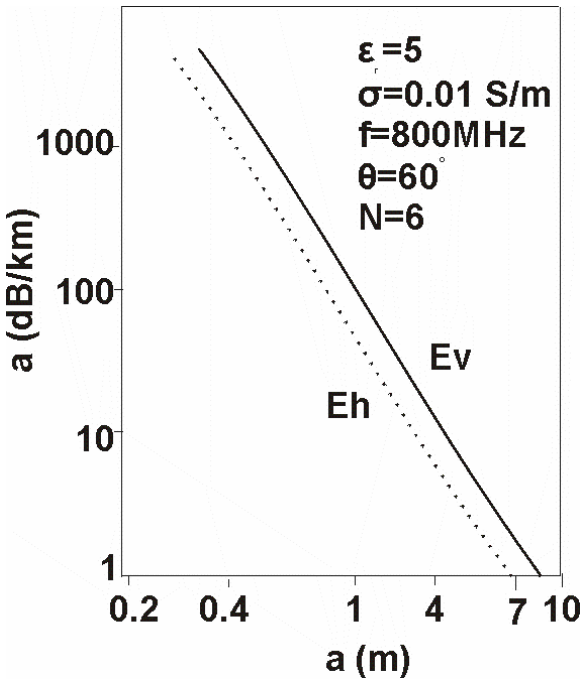
Σύγκριση με θεωρία κυματοδηγών

Αν μοντελοποιήσουμε το τούνελ θεωρώντας κυκλικό κυματοδηγό του οποίου η ακτίνα επιλέγεται έτσι ώστε το εμβαδόν της διατομής του κυματοδηγού και αυτό του τούνελ να είναι ίδια, η εξίσωση της σταθεράς εξασθένησης, τουλάχιστον για το εύρος συχνοτήτων 150-800MHz, μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής:

$$a = 1460\frac{\lambda^2}{r^3} \quad (dB/km)$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος ελευθέρου χώρου και r η ισοδύναμη ακτίνα της κυκλικής περιοχής (2.65m<r<4.2m).

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, η σταθερά εξασθένησης είναι ανάλογη του τετραγώνου του μήκους κύματος λ και αντιστρόφως ανάλογη του κύβου της ακτίνας r. Η ακρίβεια της εξίσωσης μπορεί να επιβεβαιωθεί με τη point-matching μέθοδο. Η εξάρτηση από το μήκος κύματος επιβεβαιώνεται από το παραπάνω σχήμα της εξασθένησης συναρτήσει της συχνότητας. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει την εξάρτηση της σταθεράς εξασθένησης από την ακτίνα.



Η εξάρτηση από τη διάσταση είναι ορατή. Άρα επιβεβαιώνεται η εξίσωση.

Παρόλα αυτά, η παραπάνω εξίσωση δε μας δίνει καμία πληροφορία για την πόλωση. Υπάρχουν δυο κυρίαρχοι ρυθμοί σε τοξοειδή τούνελ που αντιστοιχούν σε οριζόντια και κάθετη πόλωση.

Προσεγγιστική εξίσωση

Η σταθερά εξασθένησης είναι γενικά μια συνάρτηση των διαστάσεων του τούνελ, της συχνότητας (του μήκους κύματος), της πόλωσης, της διηλεκτρικής σταθεράς και της αγωγιμότητας του εξωτερικού μέσου. Για κύματα UHF σε περιβάλλον τούνελ, η διάσταση του τούνελ είναι μεγαλύτερη από το μήκος κύματος ελευθέρου χώρου. Υπό αυτή τη συνθήκη (και θεωρώντας ότι το φανταστικό μέρος της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς μπορεί να αμεληθεί) μπορούμε να καθορίσουμε τα χαρακτηριστικά διάδοσης σε ορθογώνιο τούνελ όπου η προσεγγιστική εξίσωση για την σταθερά εξασθένησης δίνεται ως εξής:

Για τον κυρίαρχο E_{11}^{h} ρυθμό με οριζόντια πόλωση

$$a_h = 4.343\,\lambda^2 \left(\frac{\varepsilon_{r1}}{d_1^3 \sqrt{\varepsilon_{r1} - 1}} + \frac{1}{d_2^3 \sqrt{\varepsilon_{r2} - 1}} \right) \quad (dB/m)$$

και για τον κυρίαρχο E_{11}^{υ} ρυθμό με κάθετη πόλωση

$$a_\upsilon = 4.343\,\lambda^2 \left(\frac{1}{d_1^3 \sqrt{\varepsilon_{r1} - 1}} + \frac{\varepsilon_{r2}}{d_2^3 \sqrt{\varepsilon_{r2} - 1}} \right) \quad (dB/m)$$

όπου ε_{r1} είναι η σχετική διηλεκτρική σταθερά των πλαϊνών τοιχωμάτων, ε_{r2} η σχετική διηλεκτρική σταθερά του πατώματος και της οροφής και d_1, d_2 το πλάτος και το ύψος του τούνελ αντίστοιχα.

Ένα παρόμοιο αποτέλεσμα έχει παρουσιαστεί (βλ.[12]) σε αναλύσεις κυκλικών διηλεκτρικών κυματοδηγών στην οπτική περιοχή του φάσματος:

$$a = 5.09\lambda^2\left(\frac{\varepsilon_r}{d^3\sqrt{\varepsilon_r - 1}} + \frac{1}{d^3\sqrt{\varepsilon_r - 1}}\right) \quad (dB/m)$$

όπου d=2a η διάμετρος του κυκλικού κυματοδηγού.

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι παραπάνω εξισώσεις έχουν την ίδια μορφή αν εξαιρέσουμε τους αριθμητικούς συντελεστές, παρόλο που η διατομή είναι διαφορετικής μορφής. Για αυτό το λόγο, υποθέτουμε ότι η εξασθένηση σε τοξοειδή τούνελ θα έχει την ίδια μορφή μόνο που αντί να χρησιμοποιήσουμε αριθμητικούς συντελεστές, χρησιμοποιούμε τα K_h και K_υ.

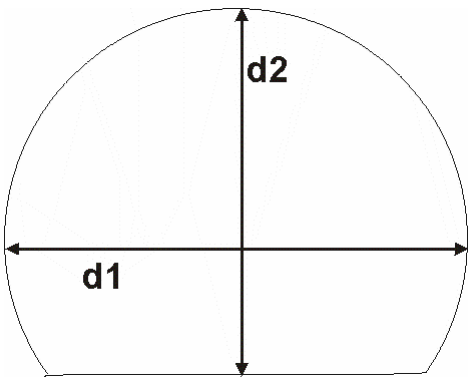
Για τον E_{11}^h ρυθμό έχουμε:

$$a_h = K_h\lambda^2\left(\frac{\varepsilon_r}{d_1^3\sqrt{\varepsilon_r - 1}} + \frac{1}{d_2^3\sqrt{\varepsilon_r - 1}}\right) \quad (dB/m)$$

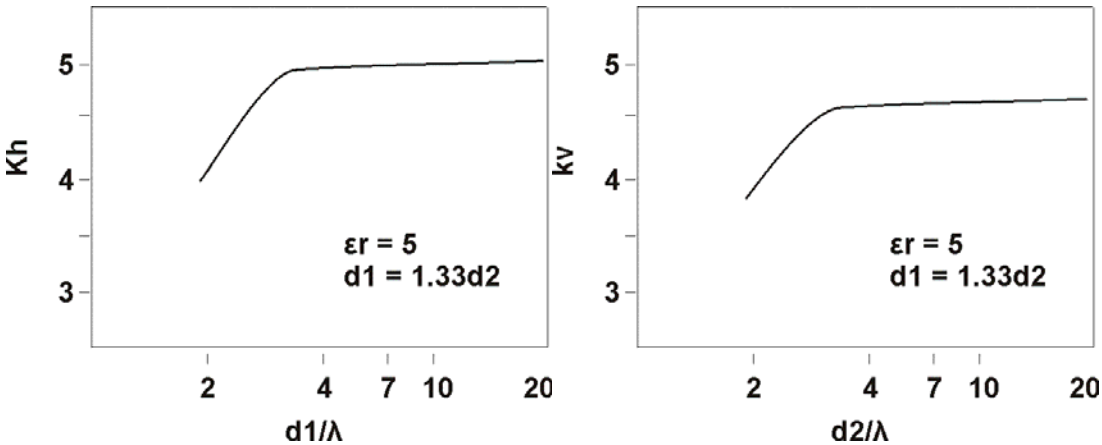
και για τον E_{11}^υ ρυθμό έχουμε:

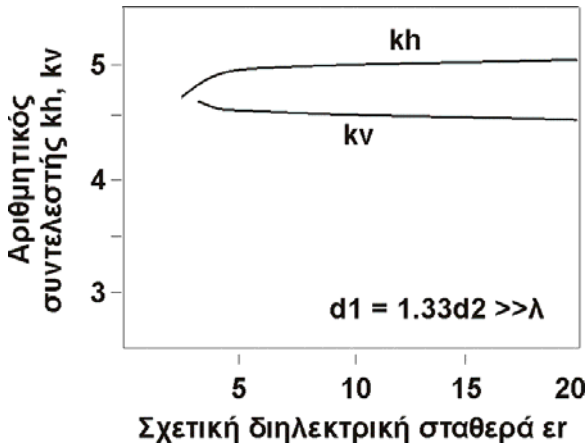
$$a_\upsilon = K_\upsilon\lambda^2\left(\frac{1}{d_1^3\sqrt{\varepsilon_r - 1}} + \frac{\varepsilon_r}{d_2^3\sqrt{\varepsilon_r - 1}}\right) \quad (dB/m)$$

όπου d_1 και d_2 είναι το μέγιστο πλάτος και ύψος αντίστοιχα όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



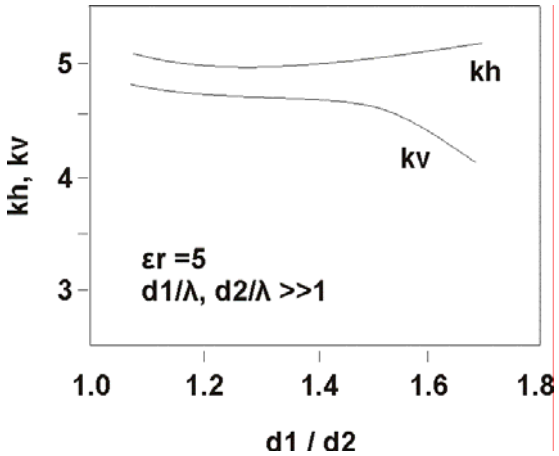
Στις παραπάνω εξισώσεις, οι αριθμητικοί συντελεστές K_h και $K_υ$ πρέπει να είναι σταθεροί και ανεξάρτητοι από τα μεγέθη d_1, d_2, λ και $ε_r$. Για αυτό το λόγο, υπολογίζουμε με την point-matching μέθοδο τα K_h και $K_υ$ σαν συναρτήσεις των $d_1/λ$, $d_2/λ$ και $ε_r$. Αυτές οι τιμές φαίνονται στα δυο παρακάτω σχήματα.





Σε αυτά τα σχήματα φαίνεται ότι οι συντελεστές K_h και $K_υ$ τείνουν σε σταθερές τιμές όταν τα $d_1/λ$ ή $d_2/λ$ αυξάνονται και ότι είναι ανεξάρτητοι του $ε_r$ ($ε_r$>5). Αυτό σημαίνει ότι η εξίσωση ισχύει υπό την προϋπόθεση ότι το πλάτος και το ύψος του τούνελ είναι μεγαλύτερα από 4 φορές το μήκος κύματος ελευθέρου χώρου.

Από την άλλη πλευρά, οι K_h και $K_υ$ εξαρτώνται από το σχήμα της διατομής ή, πιο συγκεκριμένα, από το λόγο d_1/d_2. Για τα περισσότερα τοξοειδή τούνελ, αυτός ο λόγος παίρνει τιμές μεταξύ 1.3 και 1.6. Οι τιμές των συντελεστών ανάλογα με το λόγο d_1/d_2 δίνονται στο παρακάτω σχήμα.



3.10 Διαχωρισμός κοντινής – μακρινής περιοχής

Υπάρχουν δύο περιοχές χωρισμένες από ένα *breakpoint* για τη διάδοση ραδιοσημάτων κατά μήκος ενός line-of-sight (LOS) μονοπατιού σε αγροτικά, προαστιακά ή αστικά περιβάλλοντα. Η διάδοση στις δύο αυτές περιοχές έχει αρκετά διαφορετικά χαρακτηριστικά. Πριν από το *breakpoint* είναι η κοντινή περιοχή όπου η απώλειες διάδοσης είναι μικρότερες. Μετά από το *breakpoint* είναι η μακρινή περιοχή όπου οι απώλειες διάδοσης είναι μεγαλύτερες. Ένας τύπος υπολογισμού της θέσης του *breakpoint* είναι διαθέσιμος και εκφράζεται σαν μια απλή συνάρτηση του μήκους κύματος και του ύψους των κεραιών. Ο τύπος είναι χρήσιμος για τον καθορισμό του μεγέθους μιας μικροκυψέλης και για το σχεδιασμό γρήγορης μεταγωγής. Ομοίως, δύο περιοχές διάδοσης χωρισμένες από ένα *breakpoint* παρατηρούνται επίσης κατά μήκος ενός LOS μονοπατιού σε τούνελ. Αντίθετα με την προηγούμενη περίπτωση, στην περίπτωση του περιβάλλοντος τούνελ, οι απώλειες διάδοσης είναι μεγαλύτερες στην κοντινή περιοχή και μικρότερες στη μακρινή περιοχή. Αυτό υποδηλώνει ότι ο υπάρχων τύπος για εύρεση του *breakpoint* είναι μη εφαρμόσιμος στην περίπτωση του τούνελ. Γι' αυτό το λόγο, είναι απαραίτητο να μελετηθεί ο τρόπος διαχωρισμού των δυο περιοχών και πρόβλεψης των αντίστοιχων απωλειών διάδοσης στο τούνελ. Οι διάφορες μελέτες που έχουν γίνει πάνω σε αυτό το θέμα (βλ.[13]) δείχνουν ότι ο τρόπος προσδιορισμού του *breakpoint* ποικίλει ανάλογα με τη μέθοδο που ακολουθεί ο κάθε μελετητής. Παρακάτω θα παρουσιαστεί ο ορισμός του *breakpoint* και ένας

καινούριος τρόπος προσδιορισμού του στην περίπτωση του απλού περιβάλλοντος διάδοσης.

Προσδιορισμός breakpoint

Αρχικά, θα ορίσουμε τις απώλειες διάδοσης χρησιμοποιώντας το απλό οπτικό μοντέλο ακτίνας. Το τούνελ πλάτους w μέτρων και ύψους h μέτρων περιβάλλεται από μη μαγνητικό ομογενές μέσο με απώλειες, με σχετική επιτρεπτότητα ε_r και αγωγιμότητα σ. Μέσα στο τούνελ είναι τοποθετημένη η κεραία πομπός T_x στη θέση (x_t, y_t, z_0) και η κεραία δέκτης R_x στο σημείο (x_r, y_r, z). Για ένα τούνελ που η διαστάσεις της διατομής του είναι αρκετά μεγαλύτερες από το μήκος κύματος ελευθέρου χώρου λ, έχει αναπτυχθεί το βασικό οπτικό μοντέλο ακτίνας που προβλέπει την απώλεια διάδοσης ως εξής:

$$PL\ (dB) = 10\log_{10}\left(\frac{P_t}{P_r}\right)$$
$$= 10\log_{10}\left(\left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2\left|\frac{G_d}{r}+\sum_{i=1}^{\infty}\frac{G_i R_i \exp(j\frac{2\pi}{\lambda}(r_i - r))}{r_i}\right|^2\right)$$

όπου G_d και G_i είναι τα κέρδη των διαγραμμάτων ακτινοβολίας του πλάτους των πεδίων των κεραιών εκπομπής και λήψης που αντιστοιχούν στο απευθείας μονοπάτι και στην i-ιοστή ακτίνα που ανακλάται. R_i είναι το γινόμενο όλων των συντελεστών ανάκλασης των τοιχωμάτων που η i-ιοστή ακτίνα υφίσταται ανάκλαση. Τέλος, τα r και r_i είναι τα μήκη των μονοπατιών της απευθείας ακτίνας και της i-ιοστής ανακλώμενης ακτίνας αντίστοιχα. Αυτό το μοντέλο μπορεί να υπολογίσει την διακύμανση της απώλειας διάδοσης σε κλίμακα του μήκους κύματος. Οι απώλειες διάδοσης της κοντινής και της μακρινής περιοχής του τούνελ μπορούν να προβλεφθούν επακριβώς (βλ.[13]).

Το αναλυτικό οπτικό μοντέλο ακτίνας υπολογίζει την απώλεια διάδοσης ως εξής:

$$PL_f(dB) = 10\log_{10}\left(\frac{P_t}{P_r}\right)$$
$$= 5\lambda \cdot r\left(\frac{1}{w^2}\log_{10}\frac{1}{|R_1|^2} + \frac{1}{h^2}\log_{10}\frac{1}{|R_2|^2}\right) + CL_t + CL_r$$

όπου R_1 κι R_2 είναι οι συντελεστές ανάκλασης των κάθετων και οριζόντιων τοιχωμάτων του τούνελ αντίστοιχα στις γωνίες $\varphi_1=\lambda/2w$ και $\varphi_2=\lambda/2h$ και CL_t και CL_r είναι οι απώλειες σύζευξης των κεραιών εκπομπής και λήψης αντίστοιχα. Οι απώλειες σύζευξης υπολογίζονται με βάση τον τύπο (βλ.[13]):

$$CL\ (dB) = 10\log_{10}\left(\frac{2\pi \cdot wh}{G\lambda^2}\cos^{-2}\left(\frac{\pi \cdot x}{w}\right)\cos^{-2}\left(\frac{\pi \cdot y}{h}\right)\right)$$

όπου G είναι το κέρδος της κεραίας. Αυτό το μοντέλο είναι απλό στη χρήση αλλά αποδίδει μόνο την αποδεκτή πρόβλεψη για τις απώλειες διάδοσης στη μακρινή περιοχή του τούνελ. Επιπλέον, το σημείο από το οποίο ξεκινάει η μακρινή περιοχή δεν λαμβάνεται υπόψη στο μοντέλο.

Για αυτό το λόγο, επιθυμούμε να εισάγουμε ένα μοντέλο που διατηρεί τα πλεονεκτήματα του προηγούμενου και απορρίπτει τα μειονεκτήματά του. Θα γράψουμε το απλό μοντέλο διάδοσης ελευθέρου χώρου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπως είναι γνωστό και σε περιπτώσεις όπου απλά είναι καθαρή η πρώτη ζώνη Fresnel:

$$PL_n(dB) = 10\log_{10}\left(\frac{P_t}{P_r}\right) = 10\log_{10}\left(\left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2\left|\frac{G_d}{r}\right|^2\right)$$

Το μοντέλο που προτείνεται (βλ.[13]) ορίζει το breakpoint ως το σημείο όπου οι απώλειες διάδοσης των δυο οπτικών μοντέλων ακτίνας (το βασικό και το αναλυτικό) είναι ίσες. Είναι δηλαδή η πρώτη λύση της εξίσωσης:

$$PL_n(dB) = PL_f(dB)$$

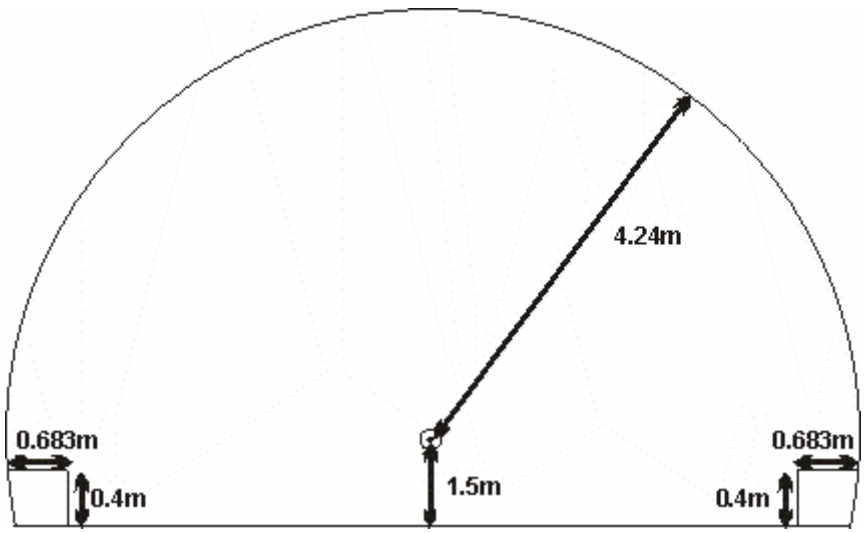
Πριν το breakpoint, οι απώλειες διάδοσης υπολογίζονται με τον τύπο του απλού μοντέλου διάδοσης ελευθέρου χώρου αφού θεωρείται ότι είναι περιοχή με καθαρότητα πρώτης ζώνης Fresnel. Μετά το breakpoint, όπου ορίζεται η μακρινή περιοχή, οι εποικοδομητικές παρεμβολές κυριαρχούν. Η διάδοση γίνεται στο τούνελ όπως συμβαίνει στο εσωτερικό ενός κυματοδηγού και ο υπολογισμός των απωλειών γίνεται με τη χρήση του αναλυτικού μοντέλου.

Η παραπάνω περιγραφή του μοντέλου αφορά τα ορθογώνια τούνελ. Μπορεί όμως εύκολα να εφαρμοστεί σε τούνελ οποιουδήποτε σχήματος με την κατάλληλη μετατροπή: Απλά θεωρούμε το ισοδύναμο ορθογώνιο τούνελ που έχει το ίδιο εμβαδόν διατομής με το τούνελ υπό μελέτη και το πλάτος του ισοδύναμου ορθογώνιου τούνελ είναι ίσο με το πάτωμα του υπό μελέτη τούνελ.

4

Θεωρητική εκτίμηση επιπέδων εξασθένησης

Στο προηγούμενο κεφάλαιο μελετήσαμε τα θεωρητικά μοντέλα που μπορούν να προσεγγίσουν το περιβάλλον τούνελ και μέσω αυτών να υπολογίσουμε θεωρητικά την εξασθένηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε κάθε περίπτωση. Παρακάτω θα χρησιμοποιήσουμε αυτά τα θεωρητικά μοντέλα για να προσεγγίσουμε ένα συγκεκριμένο τούνελ το οποίο είναι το αντικείμενο της μελέτης μας. Θα προσεγγίσουμε το πρότυπο τούνελ του μετρό της Αττικής. Η βασική διατομή του φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Τα θεωρητικά μοντέλα που θα χρησιμοποιήσουμε απαιτούν τον υπολογισμό του εμβαδού της ισοδύναμης διατομής για τη σήραγγα που μελετάται. Χρησιμοποιώντας γνωστούς από τη γεωμετρία τύπους, υπολογίζουμε το εμβαδόν διατομής του υπό μελέτη τούνελ ως εξής:

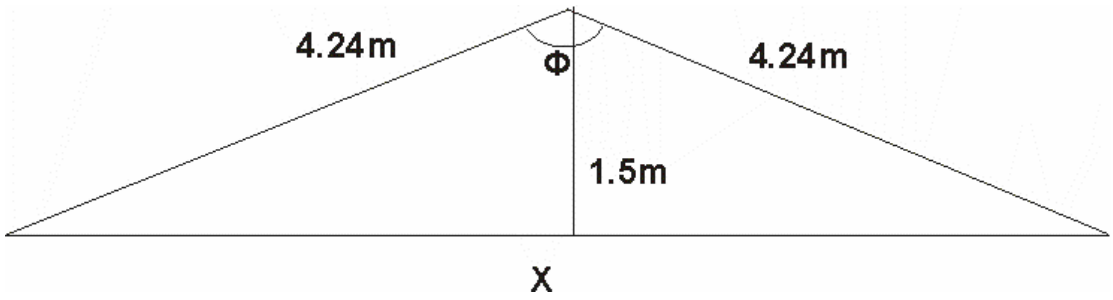
$$E = E_{circle} - E_{section} - 2 \cdot E_{box}$$

όπου Ε το ζητούμενο εμβαδόν, E_{circle} το εμβαδόν του κύκλου, $E_{section}$ το εμβαδόν του κυκλικού τομέα που δεν περιλαμβάνεται στη διατομή και E_{box} το εμβαδόν του walking path, του διαδρόμου που εφάπτεται στα τοιχώματα της σήραγγας. Το τελευταίο εμβαδόν θα υπολογιστεί σαν να πρόκειται για ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο για τους εξής λόγους: το μήκος του τόξου που αποτελεί τη μια πλευρά του σχήματος ισούται με 0.3998m ενώ το μήκος της χορδής που αντιστοιχεί σε αυτό το τόξο ισούται με 0.3996m, οπότε η διαφορά τους είναι αμελητέα και μπορούμε να θεωρήσουμε το συγκεκριμένο τμήμα σαν ευθύ. Σε σύγκριση με την ακτίνα του κύκλου που είναι 4.24m, η διαφορά αυτού του ευθύγραμμου τμήματος σε σχέση με την απέναντι πλευρά του σχήματος είναι μόλις 1mm, οπότε μπορούμε χωρίς μεγάλο σφάλμα να τα θεωρήσουμε ίσα. Όσον αφορά τις δυο άλλες πλευρές του σχήματος, η διαφορά τους είναι 0.5mm, οπότε και πάλι χωρίς μεγάλο σφάλμα σε σύγκριση με την ακτίνα του κύκλου μπορούμε να θεωρήσουμε τις δυο πλευρές ίσες με 0.683m. Συνεπώς έχουμε:

$$\begin{aligned} E &= E_{circle} - E_{section} - 2 \cdot E_{box} \\ &= \pi \cdot R^2 - \pi \cdot R^2 \cdot \frac{\phi}{360} - 2 \cdot a \cdot b \\ &= \pi \cdot 4.24^2 - \pi \cdot 4.24^2 \cdot \frac{138.6}{360} - 2 \cdot 0.4 \cdot 0.683 \\ &= 56.4766 - 21.7435 - 0.5464 \end{aligned}$$

$$E = 34.1867\, m^2$$

Στους παραπάνω τύπους, R είναι η ακτίνα του κύκλου, a,b οι διαστάσεις του walking path και φ η γωνία σε μοίρες του κυκλικού τομέα που δεν περιλαμβάνεται στον κύκλο και υπολογίζεται ως εξής:



$$\left(\frac{X}{2}\right)^2 = (4.24)^2 - (1.5)^2 \Rightarrow X = 7.932\,m$$

$$\sin\frac{\phi}{2} = \frac{X}{2\cdot 4.24} = \frac{7.932}{2\cdot 4.24} = 0.93537 \Rightarrow \phi = 138.6°$$

Έχοντας υπολογίσει το εμβαδόν της διατομής του υπό μελέτη τούνελ, μένει να υπολογίσουμε την ακτίνα της διατομής του κυκλικού κυματοδηγού που έχει το ίδιο εμβαδόν με τη διατομή του υπό εξέταση τούνελ. Αυτή η ισοδύναμη ακτίνα είναι ο όρος που χρειαζόμαστε για να συμπληρώσουμε τους τύπους της εξασθένησης στα θεωρητικά μοντέλα.

$$E_{equal} = 34.1867\,m^2 \Rightarrow \pi\cdot r^2 = 34.1867 \Rightarrow r = 3.2988\,m$$

Οπότε η ακτίνα του κυματοδηγού που προσεγγίζει το τούνελ που μελετάμε είναι **r = 3.2988m** και θα χρησιμοποιηθεί παρακάτω.

4.1 ΜΟΝΤΕΛΟ 1

Το πρώτο μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε για προσέγγιση του τούνελ είναι αυτό του κυκλικού κυματοδηγού. Όπως έχει αναφερθεί στο σχετικό κεφάλαιο, η περίπτωση του κυκλικού κυματοδηγού με τοιχώματα από διηλεκτρικό και κενό εσωτερικό χρησιμοποιείται πολύ συχνά στην πράξη για την προσέγγιση τούνελ όχι μόνο κυκλικής διατομής αλλά γενικά τοξοειδούς διατομής. Η τεχνική που ακολουθείται πάντα είναι ο υπολογισμός της ισοδύναμης σε εμβαδόν διατομής του κυματοδηγού. Την ίδια τεχνική θα εφαρμόσουμε και εμείς. Έχουμε ήδη υπολογίσει την ισοδύναμη ακτίνα του κυκλικού κυματοδηγού. Θα μελετήσουμε τις περιπτώσεις των ρυθμών TE_{11} και TE_{01}.

Ο ρυθμός TE_{11} θεωρείται ο επικρατέστερος ρυθμός διάδοσης στους κυκλικούς κυματοδηγούς. Στην περίπτωση που εξετάζουμε, για ακτίνα ρ=3.2988m, η συχνότητα αποκοπής είναι **f_{11} = 26.65MHz**. Αφού οι συχνότητες που μας ενδιαφέρουν για τις ασύρματες επικοινωνίες είναι μεγαλύτερες των 100MHz, συμπεραίνουμε ότι στις συγκεκριμένες συχνότητες θα έχουμε διάδοση του ρυθμού αυτού.

Σε αυτή την περίπτωση η εξασθένηση ανά μονάδα μήκους σε dB/m υπολογίζεται όπως είδαμε από τον τύπο:

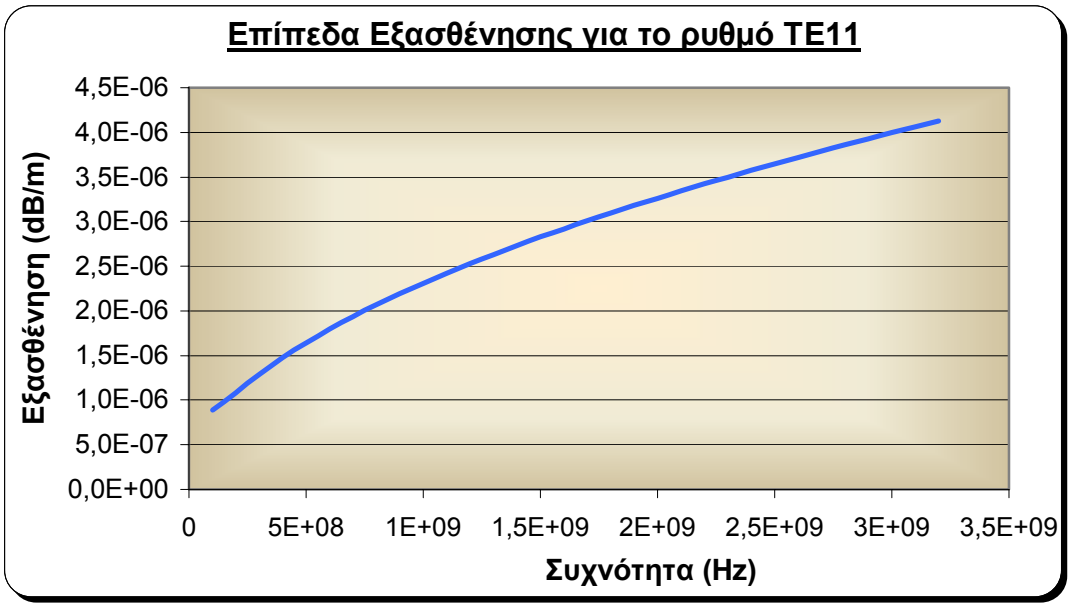
$$A\ (dB/m) = 8.68 \frac{p_{11}^{'\ 4} + (\beta_{11}\alpha)^2}{\sigma \cdot \delta_s \cdot a^3 \beta_{11} \omega\mu \left(p_{11}^{'\ 2} - 1 \right)}$$

Στον παραπάνω τύπο a είναι η ακτίνα του κυματοδηγού (3.2988m), p_{11}' είναι η πρώτη ρίζα τάξης 1 της παραγώγου της συνάρτησης Bessel και είναι ίση με 1.841, και β_{11} η σταθερά φάσης που υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\beta_{11} = k_0 \left(1 - \left(\frac{f_{11}}{f} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Το βάθος διείσδυσης δ_s και η σταθερά K_0 μεταβάλλονται συναρτήσει της συχνότητας. Όσον αφορά τις σταθερές του υλικού των τοιχωμάτων, θεωρούμε τις τιμές που αντιστοιχούν στο τσιμέντο, δηλαδή $\mu=\mu_0=4\pi10^{-7}$ (H/m) $\varepsilon_r=5.5$ και $\sigma=0.01$S/m. Από τον παραπάνω τύπο υπολογίζουμε τις τιμές της εξασθένησης στον παρακάτω πίνακα και σχεδιάζουμε την εξάρτηση της εξασθένησης συναρτήσει της συχνότητας.

f (Hz)	A (dB/m)
100000000	8,850E-07
200000000	1,085E-06
300000000	1,292E-06
400000000	1,477E-06
500000000	1,644E-06
600000000	1,797E-06
700000000	1,938E-06
800000000	2,069E-06
900000000	2,193E-06
1000000000	2,311E-06
1100000000	2,423E-06
1200000000	2,530E-06
1300000000	2,633E-06
1400000000	2,732E-06
1500000000	2,827E-06
1600000000	2,919E-06
1700000000	3,009E-06
1800000000	3,096E-06
1900000000	3,181E-06
2000000000	3,263E-06
2100000000	3,343E-06
2200000000	3,422E-06
2300000000	3,499E-06
2400000000	3,574E-06
2500000000	3,648E-06
2600000000	3,720E-06
2700000000	3,790E-06
2800000000	3,860E-06
2900000000	3,928E-06
3000000000	3,995E-06
3100000000	4,061E-06
3200000000	4,126E-06



Ο ρυθμός TE_{01} έχει τη χαμηλότερη συχνότητα αποκοπής από τους ρυθμούς που έχουν συμμετρική κατανομή γύρω από τον άξονα διάδοσης. Στην περίπτωση που εξετάζουμε, για ακτίνα ρ=3.2988m, η συχνότητα αποκοπής είναι $\mathbf{f_{01}}$ **= 55.47MHz**. Αφού οι συχνότητες που μας ενδιαφέρουν για τις ασύρματες επικοινωνίες είναι μεγαλύτερες των 100MHz, συμπεραίνουμε ότι στις συγκεκριμένες συχνότητες θα έχουμε διάδοση του ρυθμού αυτού.

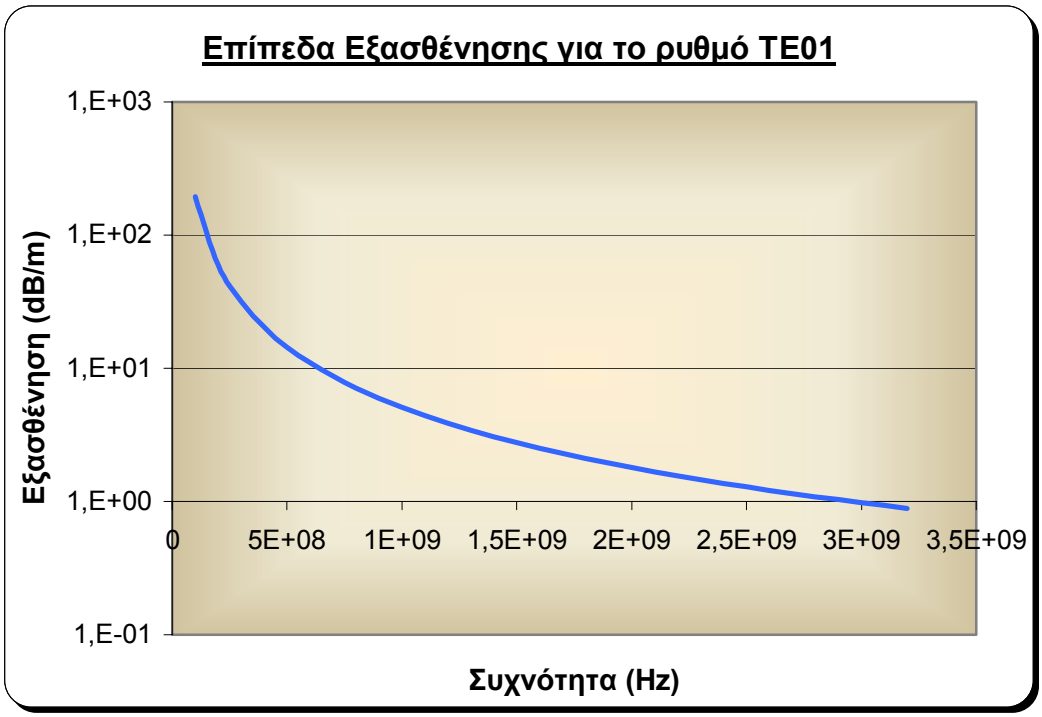
Σε αυτή την περίπτωση η εξασθένηση ανά μονάδα μήκους σε dB/m υπολογίζεται όπως είδαμε από τον τύπο:

$$A\ (dB/m) = 8.68 \frac{\left(\frac{f_{01}}{f}\right)^2}{\sigma \cdot \delta_s \cdot a \sqrt{1-\left(\frac{f_{01}}{f}\right)^2}}$$

Στον παραπάνω τύπο a είναι η ακτίνα του κυματοδηγού. Το βάθος διείσδυσης δ_s μεταβάλλεται συναρτήσει της συχνότητας. Όσον αφορά τις σταθερές του υλικού των τοιχωμάτων, θεωρούμε τις τιμές που αντιστοιχούν στο τσιμέντο, δηλαδή $\mu=\mu_0=4\pi 10^{-7}$ (H/m) $\varepsilon_r=5.5$ και σ=0.01S/m. Από τον παραπάνω τύπο υπολογίζουμε τις τιμές της

εξασθένησης στον παρακάτω πίνακα και σχεδιάζουμε την εξάρτηση της εξασθένησης συναρτήσει της συχνότητας.

f (Hz)	A (dB/m)
100000000	1,933E+02
200000000	5,919E+01
300000000	3,150E+01
400000000	2,030E+01
500000000	1,448E+01
600000000	1,099E+01
700000000	8,713E+00
800000000	7,126E+00
900000000	5,969E+00
1000000000	5,095E+00
1100000000	4,415E+00
1200000000	3,874E+00
1300000000	3,435E+00
1400000000	3,073E+00
1500000000	2,771E+00
1600000000	2,515E+00
1700000000	2,296E+00
1800000000	2,107E+00
1900000000	1,943E+00
2000000000	1,799E+00
2100000000	1,672E+00
2200000000	1,559E+00
2300000000	1,459E+00
2400000000	1,369E+00
2500000000	1,287E+00
2600000000	1,214E+00
2700000000	1,147E+00
2800000000	1,086E+00
2900000000	1,030E+00
3000000000	9,791E-01
3100000000	9,321E-01
3200000000	8,888E-01



4.2 ΜΟΝΤΕΛΟ 2

Το δεύτερο μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε είναι η προσέγγιση των Marcatili και Schmeltzer (βλ.[10] και [15]). Η λύση για τον υπολογισμό της σταθεράς εξασθένησης δίνεται, όπως είδαμε, με τις προσεγγίσεις: $ka=2\pi a/\lambda >> |v| u_{nm}$ και $k_2 a >> 1$:

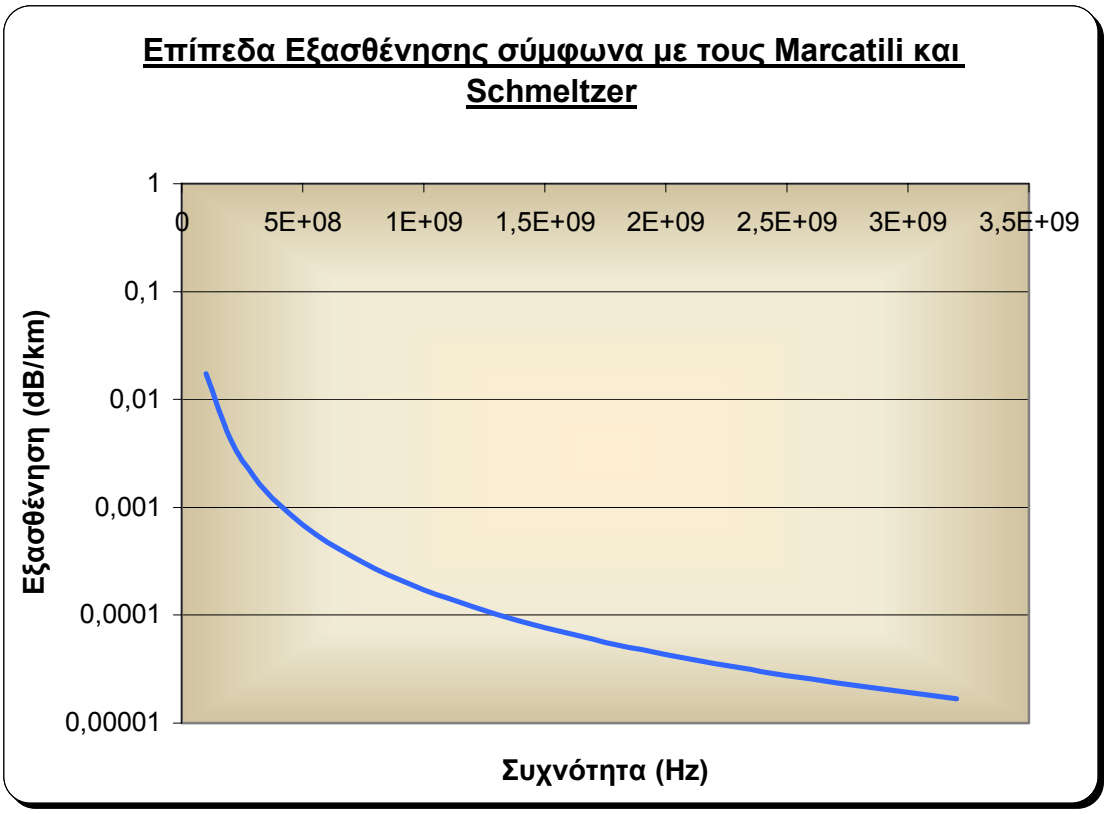
$$a_{nm} = \left(\frac{u_{nm}}{2\pi}\right)^2 \frac{\lambda^2}{\alpha^3} \begin{Bmatrix} \mathrm{Re}\{1/\sqrt{v^2-1}\} & \gamma\iota\alpha \quad TE_{0m} \quad \rho\upsilon\theta\mu o\acute{\upsilon}\varsigma (n=0) \\ \mathrm{Re}\{(1/2)(v^2+1)/\sqrt{v^2-1}\} & \gamma\iota\alpha \quad EH_{nm} \quad \rho\upsilon\theta\mu o\acute{\upsilon}\varsigma (n \neq 0) \end{Bmatrix}$$

όπου u_{nm} οι ρίζες της εξίσωσης Bessel $J_{n-1}(u_{nm})=0$.

Σύμφωνα με τους Marcatili και Schmeltzer (βλ.[10] και [15]) στον κυκλικό κυματοδηγό, αν συγκριθούν οι σταθερές διάδοσης των διαφόρων ρυθμών, παρατηρούμε ότι ο ρυθμός με τη χαμηλότερη εξασθένηση είναι ο TE_{01} αν ισχύει $v>2.02$ και ο EH_{11} αν ισχύει ότι $v<2.02$, όπου $v = (\varepsilon_2/\varepsilon_0)^{1/2}$. Στην περίπτωση που εξετάζουμε το ε_{r2} ισούται με 5.5 (τιμή που αντιστοιχεί στο υλικό του τσιμέντου) οπότε θα είναι $v = (5.5)^{1/2} = 2.35>2.02$. Άρα ο ρυθμός που μας ενδιαφέρει να εξετάσουμε είναι ο TE_{01}. Το $u_{nm}=3.832$ στην συγκεκριμένη περίπτωση και $a=3.2988$m η ισοδύναμη ακτίνα που θα

χρησιμοποιήσουμε και σε αυτήν την εκτίμηση. Παρακάτω δίνεται ο πίνακας με τις τιμές της εξασθένησης καθώς και το αντίστοιχο διάγραμμα.

f (Hz)	A (db/km)
100000000	0,017244
200000000	0,004311
300000000	0,001916
400000000	0,001078
500000000	0,00069
600000000	0,000479
700000000	0,000352
800000000	0,000269
900000000	0,000213
1000000000	0,000172
1100000000	0,000143
1200000000	0,00012
1300000000	0,000102
1400000000	8,8E-05
1500000000	7,66E-05
1600000000	6,74E-05
1700000000	5,97E-05
1800000000	5,32E-05
1900000000	4,78E-05
2000000000	4,31E-05
2100000000	3,91E-05
2200000000	3,56E-05
2300000000	3,26E-05
2400000000	2,99E-05
2500000000	2,76E-05
2600000000	2,55E-05
2700000000	2,37E-05
2800000000	2,2E-05
2900000000	2,05E-05
3000000000	1,92E-05
3100000000	1,79E-05
3200000000	1,68E-05



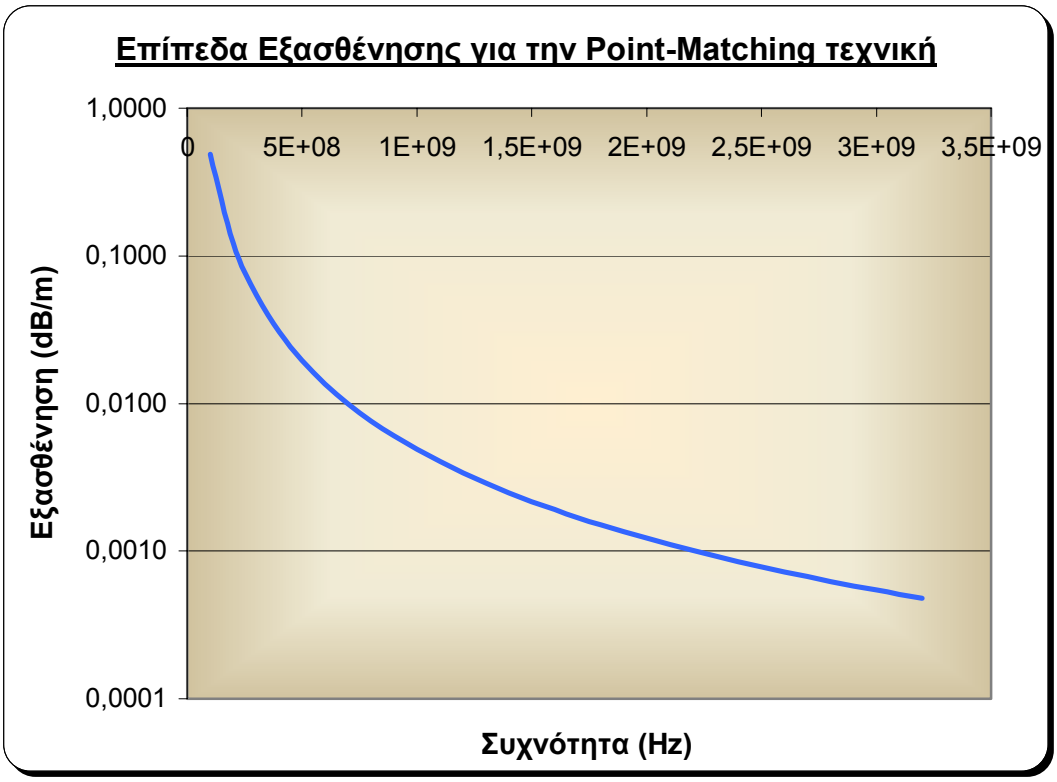
4.3 ΜΟΝΤΕΛΟ 3

Το τρίτο μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε είναι η χρήση της προσεγγιστικής εξίσωσης που εκτιμάται από την point-matching τεχνική. Η εξίσωση που θα χρησιμοποιήσουμε για να εκτιμήσουμε την τιμή της εξασθένησης αναφέρεται σε αναλύσεις κυκλικών διηλεκτρικών κυματοδηγών στην οπτική περιοχή του φάσματος και είναι:

$$a = 5.09\,\lambda^2 \left(\frac{\varepsilon_r}{d^3\sqrt{\varepsilon_r - 1}} + \frac{1}{d^3\sqrt{\varepsilon_r - 1}} \right) \quad (dB/m)$$

όπου d=2a η διάμετρος του κυκλικού κυματοδηγού. Παρακάτω δίνεται ο πίνακας με τις τιμές της εξασθένησης καθώς και το αντίστοιχο διάγραμμα.

f (Hz)	λ (m)	A (db/m)
100000000	3,000	0,48878037
200000000	1,500	0,12219509
300000000	1,000	0,05430893
400000000	0,750	0,03054877
500000000	0,600	0,01955121
600000000	0,500	0,01357723
700000000	0,429	0,00997511
800000000	0,375	0,00763719
900000000	0,333	0,00603433
1000000000	0,300	0,00488780
1100000000	0,273	0,00403951
1200000000	0,250	0,00339431
1300000000	0,231	0,00289219
1400000000	0,214	0,00249378
1500000000	0,200	0,00217236
1600000000	0,188	0,00190930
1700000000	0,176	0,00169128
1800000000	0,167	0,00150858
1900000000	0,158	0,00135396
2000000000	0,150	0,00122195
2100000000	0,143	0,00110835
2200000000	0,136	0,00100988
2300000000	0,130	0,00092397
2400000000	0,125	0,00084858
2500000000	0,120	0,00078205
2600000000	0,115	0,00072305
2700000000	0,111	0,00067048
2800000000	0,107	0,00062344
2900000000	0,103	0,00058119
3000000000	0,100	0,00054309
3100000000	0,097	0,00050862
3200000000	0,094	0,00047732



4.4 ΜΟΝΤΕΛΟ 4

Το τέταρτο μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε για να εκτιμήσουμε τα επίπεδα εξασθένησης σε περιβάλλον τούνελ είναι οι τύποι της φυσικής διάδοσης.

Για έναν κυκλικό κυματοδηγό, για τους ρυθμούς TM_{mn} ισχύει ότι το μήκος κύματος αποκοπής είναι:

$$\lambda_{mn} = \frac{2\pi}{x_{mn}} r$$

όπου r είναι η ακτίνα του κυματοδηγού και x_{mn} είναι η n-οστή ρίζα της συνάρτησης Bessel m-οστής σειράς. Για τους ρυθμούς TE_{mn} ισχύει:

$$\lambda_{mn} = \frac{2\pi}{x'_{mn}} r$$

όπου x'_{mn} είναι η n-οστή ρίζα της πρώτης παραγώγου της συνάρτησης Bessel m-οστής σειράς.

Κάτω από τη χαμηλότερη συχνότητα αποκοπής, δεν είναι δυνατή η διάδοση. Εκεί, η μείωση του πεδίου είναι συνάρτηση μόνο των εγκάρσιων

διαστάσεων του τούνελ. Η εξασθένηση *a* είναι ανεξάρτητη των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του τοίχου. Αυξάνεται προς μια περιοριστική τιμή όσο η συχνότητα μειώνεται σε ακολουθία με την παρακάτω εξίσωση:

$$a = \frac{54.6}{\lambda_c}\sqrt{1-\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)^2}\ dB/unit\ length$$

Όπου λ_c είναι το μεγαλύτερο μήκος κύματος αποκοπής του κυματοδηγού.

Πάνω από τη συχνότητα αποκοπής του, η εξασθένηση κάθε ρυθμού εξαρτάται από τη συχνότητα, το σχήμα, τις εγκάρσιες διαστάσεις και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του κυματοδηγού.

Για κυκλικούς κυματοδηγούς, η εξασθένηση *a* για τους TM_{mn} ρυθμούς δίνεται από τον τύπο:

$$a = 8.69\frac{R}{\zeta r}\frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{\lambda_{mn}}\right)^2}}\ dB/m$$

Όπου
ζ η αντίσταση του μέσου διάδοσης $=\sqrt{\mu/\varepsilon}$
R $=10.88\times10^{-3}\sqrt{\left(10^7/\sigma\right)(1/\lambda)}\ ohms$
σ η αγωγιμότητα των τοίχων του οδηγού σε mho/m
μ η διαπερατότητα του μέσου διάδοσης σε henry/m
ε η επιτρεπτότητα του μέσου διάδοσης σε farad/m

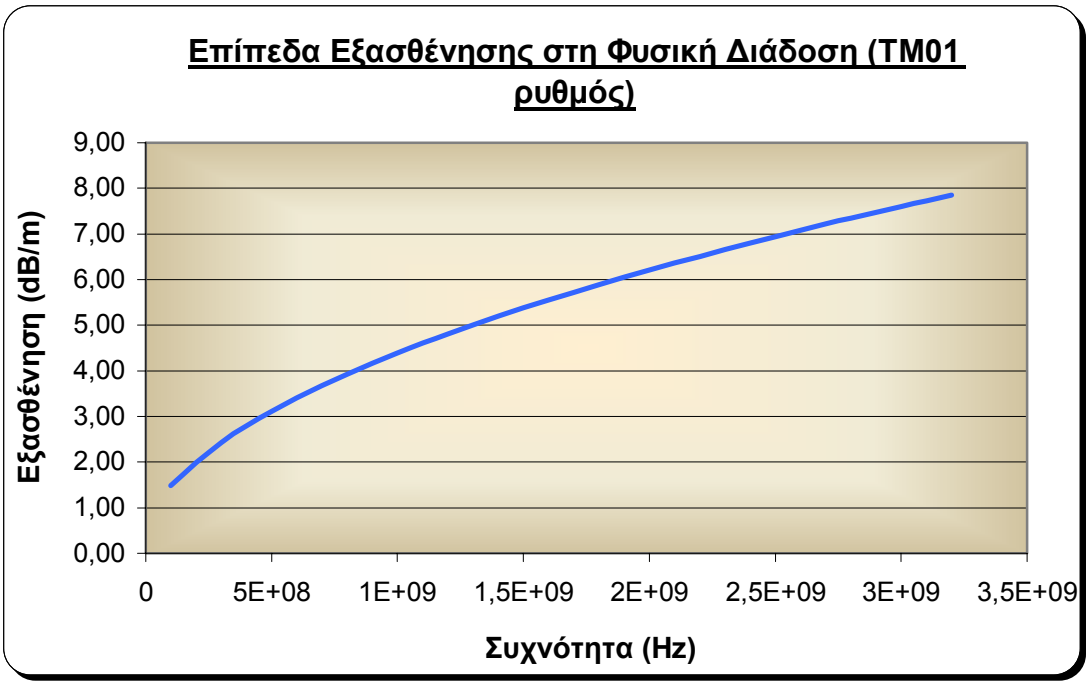
Και για τους TE_{mn} ρυθμούς:

$$a = 8.69\frac{R}{\zeta r}\left[\frac{m^2}{x'_{mn}{}^2-m^2}+\left(\frac{\lambda}{\lambda_{mn}}\right)^2\right]\frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{\lambda_{mn}}\right)^2}}\ dB/m$$

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις θα εκτιμήσουμε την εξασθένηση για τους ρυθμούς TM_{01} και TE_{10}. Παρακάτω δίνονται οι πίνακες με τις τιμές της εξασθένησης και τα αντίστοιχα διαγράμματα.

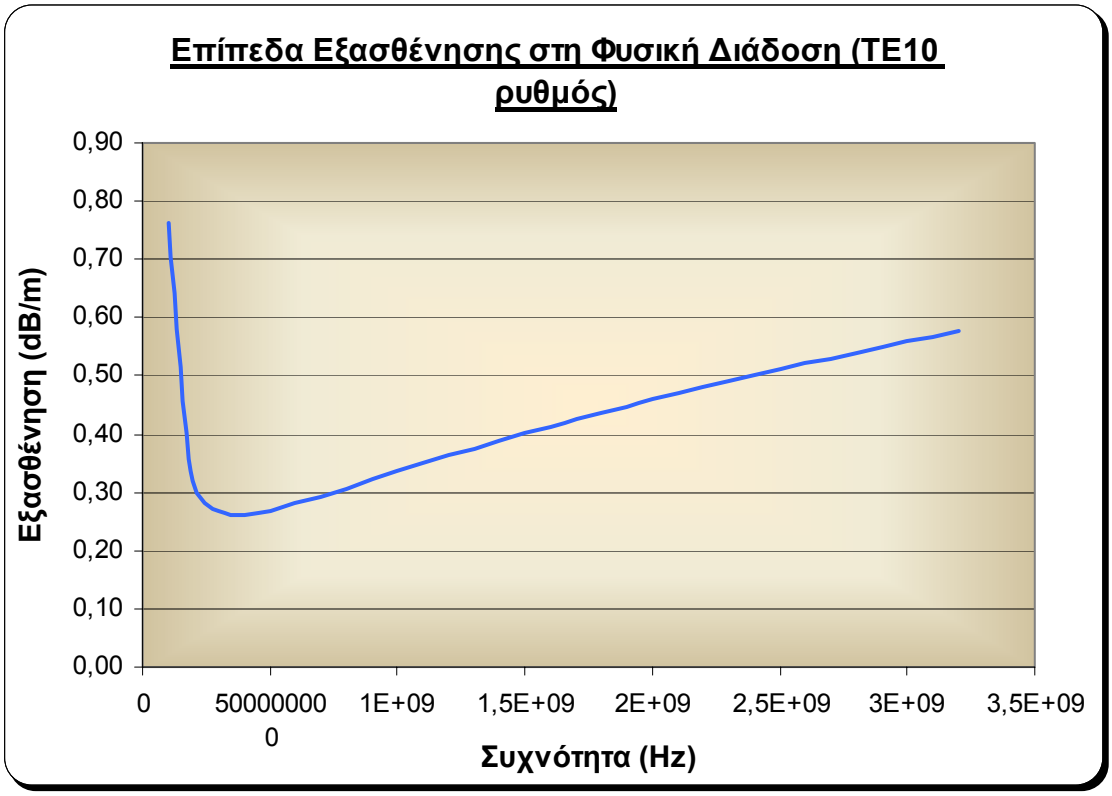
Ρυθμός TM_{01}

f (Hz)	λ (m)	A (dB/m)
100000000	3,000	1,48088
200000000	1,500	1,99352
300000000	1,000	2,42060
400000000	0,750	2,78675
500000000	0,600	3,11140
600000000	0,500	3,40583
700000000	0,429	3,67707
800000000	0,375	3,92981
900000000	0,333	4,16736
1000000000	0,300	4,39215
1100000000	0,273	4,60604
1200000000	0,250	4,81047
1300000000	0,231	5,00658
1400000000	0,214	5,19532
1500000000	0,200	5,37745
1600000000	0,188	5,55363
1700000000	0,176	5,72439
1800000000	0,167	5,89022
1900000000	0,158	6,05151
2000000000	0,150	6,20861
2100000000	0,143	6,36185
2200000000	0,136	6,51148
2300000000	0,130	6,65775
2400000000	0,125	6,80088
2500000000	0,120	6,94106
2600000000	0,115	7,07847
2700000000	0,111	7,21326
2800000000	0,107	7,34559
2900000000	0,103	7,47557
3000000000	0,100	7,60333
3100000000	0,097	7,72898
3200000000	0,094	7,85262


Επίπεδα Εξασθένησης στη Φυσική Διάδοση (TM01 ρυθμός)
Εξασθένηση (dB/m)
9,00
8,00
7,00
6,00
5,00
4,00
3,00
2,00
1,00
0,00
0
5E+08
1E+09
1,5E+09
2E+09
2,5E+09
3E+09
3,5E+09
Συχνότητα (Hz)

Ρυθμός TE_{10}

f (Hz)	λ (m)	A (dB/m)
100000000	3,000	0,762897
200000000	1,500	0,318924
300000000	1,000	0,267015
400000000	0,750	0,261312
500000000	0,600	0,268367
600000000	0,500	0,279978
700000000	0,429	0,293346
800000000	0,375	0,307334
900000000	0,333	0,321432
1000000000	0,300	0,335398
1100000000	0,273	0,349117
1200000000	0,250	0,362537
1300000000	0,231	0,375637
1400000000	0,214	0,388415
1500000000	0,200	0,400878
1600000000	0,188	0,413036
1700000000	0,176	0,424904
1800000000	0,167	0,436494
1900000000	0,158	0,447823
2000000000	0,150	0,458902
2100000000	0,143	0,469746
2200000000	0,136	0,480367
2300000000	0,130	0,490777
2400000000	0,125	0,500986
2500000000	0,120	0,511004
2600000000	0,115	0,520842
2700000000	0,111	0,530508
2800000000	0,107	0,540009
2900000000	0,103	0,549354
3000000000	0,100	0,558550
3100000000	0,097	0,567603
3200000000	0,094	0,576519


Επίπεδα Εξασθένησης στη Φυσική Διάδοση (TE10 ρυθμός)
Εξασθένηση (dB/m)
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0
500000000
1E+09
1,5E+09
2E+09
2,5E+09
3E+09
3,5E+09
Συχνότητα (Hz)

5

Προσομοίωση του τούνελ με το πρόγραμμα προσομοίωσης Supernec V2.9

5.1 Εισαγωγικά

Τα θεωρητικά μοντέλα που μελετήσαμε στα προηγούμενα κεφάλαια δίνουν μόνο μια προσέγγιση των επιπέδων της εξασθένησης για το περιβάλλον του τούνελ που εξετάζουμε. Τα τέσσερα μοντέλα αποτελούν το καθένα μια διαφορετική εκτίμηση των συνθηκών και των φαινομένων που εμφανίζονται σε ένα τέτοιο περιβάλλον, χωρίς να συμφωνούν για τη συμπεριφορά του φαινομένου της εξασθένησης συναρτήσει της συχνότητας.

Προκειμένου να κατανοήσουμε καλύτερα τις συνθήκες διάδοσης στο τούνελ που θέλουμε να προσεγγίσουμε, θα προσομοιώσουμε το τούνελ του μετρό της Αττικής με το πρόγραμμα προσομοίωσης Supernec V2.9.

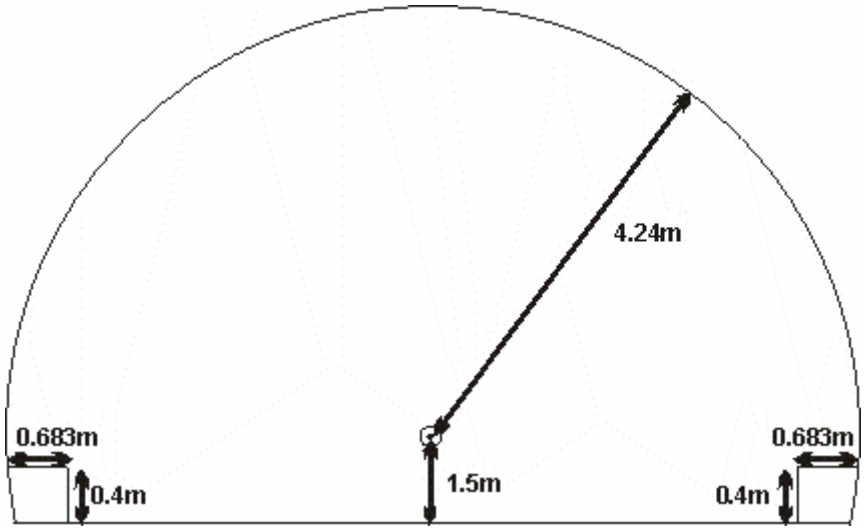
Λαμβάνοντας υπόψη τη διατομή και τα υλικά κατασκευής του πραγματικού έργου, θα κατασκευάσουμε μοντέλο που θα προσεγγίζει το υπό μελέτη τούνελ σε μεγάλο βαθμό και θα μελετήσουμε τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε διάφορες περιπτώσεις που μας ενδιαφέρουν για διαφορετικές συχνότητες και για διαφορετικά σημεία στη διατομή του τούνελ, καθώς και τη συμπεριφορά της εξασθένησης συναρτήσει της απόστασης και της συχνότητας.

Τέλος, θα συγκρίνουμε τα πειραματικά αποτελέσματα της προσομοίωσης με τα τέσσερα θεωρητικά μοντέλα που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ώστε να διαπιστώσουμε το πλέον κατάλληλο από αυτά που θα

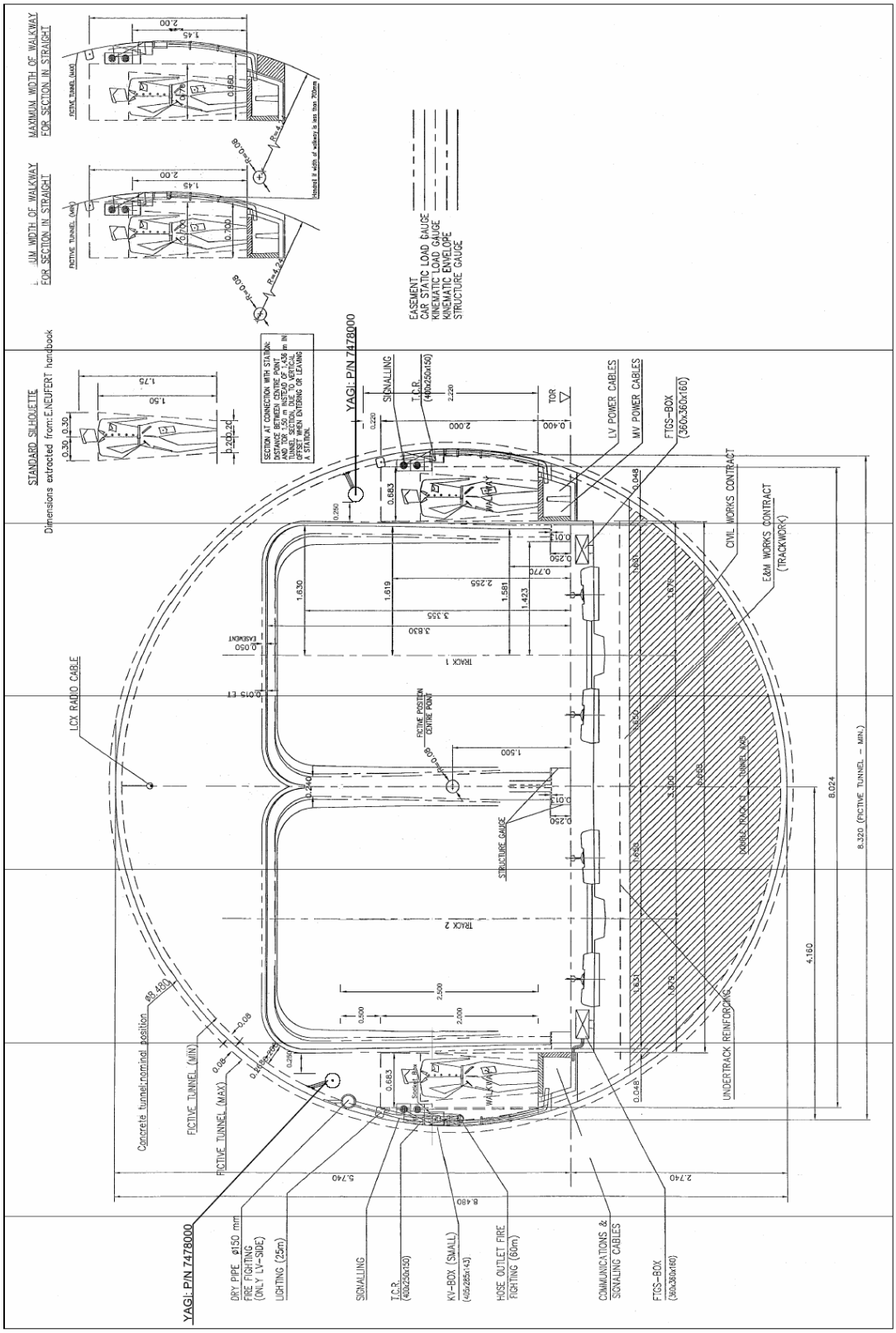
μας δώσει την καλύτερη εκτίμηση για τα επίπεδα και τη συμπεριφορά της εξασθένησης για το υπό μελέτη περιβάλλον.

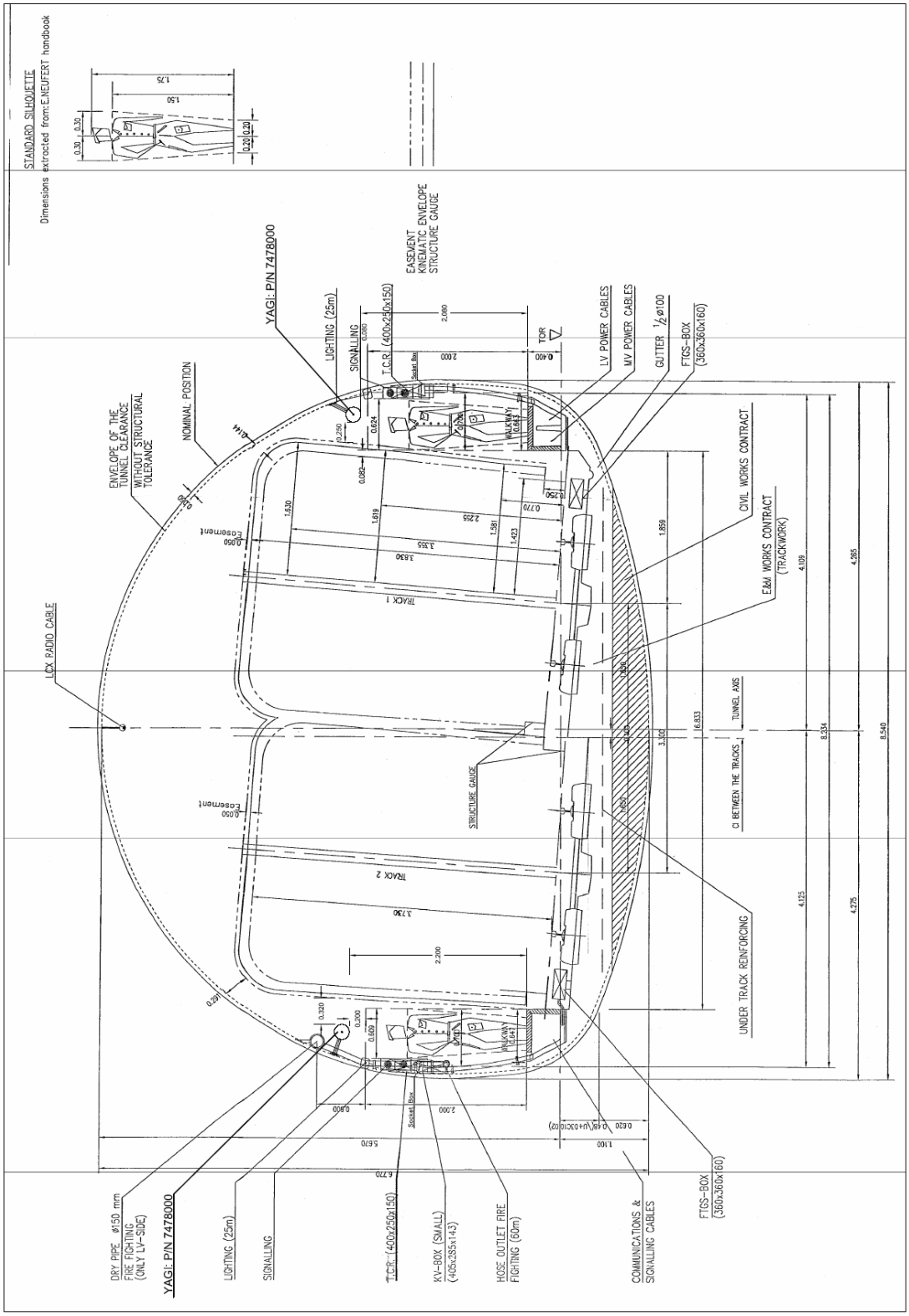
5.2 Πρότυπο

Το πρότυπο τούνελ που θα χρησιμοποιήσουμε είναι το τούνελ του μετρό της Αττικής. Το δίκτυο του μετρό καλύπτει πολλά χιλιόμετρα κάτω από τη γη της Αττικής και ενώνει τους κυριότερους κόμβους της πόλης της Αθήνας. Η υπεύθυνη εταιρία κατασκευής και επίβλεψης του έργου είναι η Αττικό Μετρό Α.Ε. Το μήκος των διαδρομών από σταθμό σε σταθμό μεταβάλλεται ανάλογα με τη διαδρομή. Η βασική σχηματική διατομή του φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



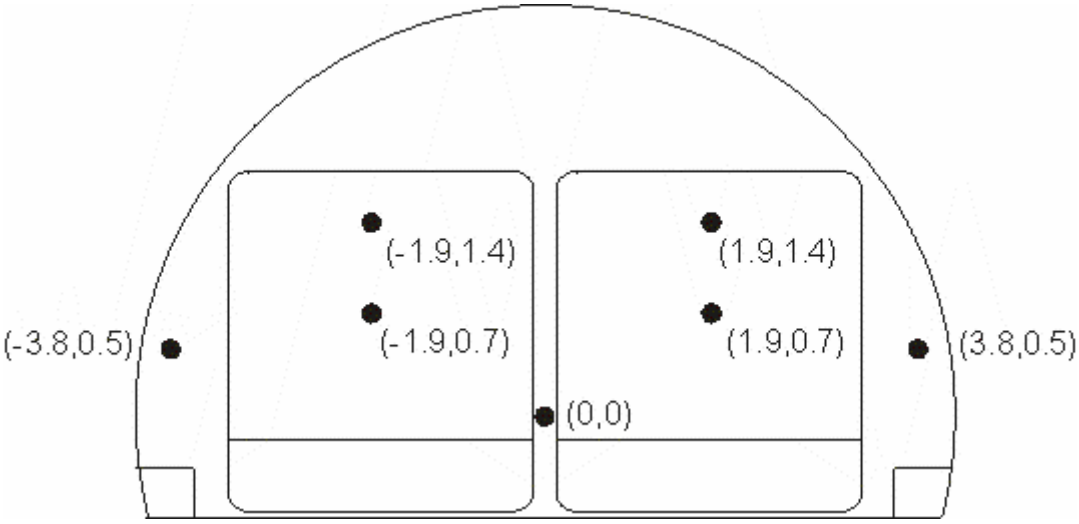
Τα αυθεντικά σχεδιαγράμματα της διατομής δίνονται στα παρακάτω σχήματα. Οι δυο περιπτώσεις καλύπτουν την ευθεία διαδρομή και τις καμπύλες της τροχιάς των συρμών.


MAXIMUM WIDTH OF WALKWAY FOR SECTION IN STRAIGHT
MINIMUM WIDTH OF WALKWAY FOR SECTION IN STRAIGHT
STANDARD SILHOUETTE
Dimensions extracted from: E.NEUFERT handbook
EASEMENT
CAR STATIC LOAD GAUGE
KINEMATIC LOAD GAUGE
KINEMATIC ENVELOPE
STRUCTURE GAUGE
YAGI-P/N 7478000
SIGNALLING
T.R.R.
LV POWER CABLES
MV POWER CABLES
FTGS-BOX
CIVIL WORKS CONTRACT
E&M WORKS CONTRACT
(TRACKWORK)
LCX RADIO CABLE
TRACK 1
TRACK 2
FICTIVE POSITION CENTRE POINT
STRUCTURE GAUGE
DOUBLE TRACK
UNDERTRACK REINFORCING
Concrete tunnel nominal position
FICTIVE TUNNEL (MIN)
FICTIVE TUNNEL (MAX)
8.320 (FICTIVE TUNNEL – MIN.)
8.024
4.180
5.740
2.740
8.480
DRY PIPE ø150 mm
FIRE FIGHTING
(ONLY LV-SIDE)
LIGHTING (25m)
SIGNALLING
T.C.R.
(400x250x150)
KV-BOX (SMALL)
(465x265x143)
HOSE OUTLET FIRE
FIGHTING (60m)
COMMUNICATIONS &
SIGNALING CABLES
FTGS-BOX
(360x360x160)


STANDARD SILHOUETTE
Dimensions extracted from:E.NEUFERT handbook
EASEMENT
KINEMATIC ENVELOPE
STRUCTURE GAUGE
YAGI: P/N 7478000
LIGHTING (25m)
SIGNALLING
T.C.R. (400x250x150)
Socket Box
TOR
LV POWER CABLES
MV POWER CABLES
GUTTER 1/2ø100
FTGS-BOX
(360x360x160)
NOMINAL POSITION
ENVELOPE OF THE
TUNNEL CLEARANCE
WITHOUT STRUCTURAL
TOLERANCE
WALKWAY
CIVIL WORKS CONTRACT
E&M WORKS CONTRACT
(TRACKWORK)
LCX RADIO CABLE
TRACK 1
TRACK 2
Easement
STRUCTURE GAUGE
TUNNEL AXIS
℄ BETWEEN THE TRACKS
UNDER TRACK REINFORCING
DRY PIPE ø150 mm
FIRE FIGHTING
(ONLY LV-SIDE)
YAGI: P/N 7478000
LIGHTING (25m)
SIGNALLING
T.C.R. (400x250x150)
KV-BOX (SMALL)
(405x235x143)
HOSE OUTLET FIRE
FIGHTING (60m)
COMMUNICATIONS &
SIGNALLING CABLES
FTGS-BOX
(360x360x160)

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στα παραπάνω σχήματα, τα βασικά χαρακτηριστικά της διατομής είναι η ακτίνα των 4.240m της σήραγγας, η απόσταση του δαπέδου της κατασκευής από το θεωρητικό κέντρο της κυκλικής διατομής που φτάνει το 1.5m, το μέγεθος των δυο συρμών που πρέπει να έχουν το απαραίτητο μέγεθος ώστε να βρίσκονται ταυτόχρονα στην ίδια διατομή του τούνελ και τέλος, τα χαρακτηριστικά walking paths εκατέρωθεν της διαδρομής, που χρησιμοποιούνται από το προσωπικό συντήρησης της τροχιάς και τους τεχνικούς για λόγους ασφαλείας. Οι διαστάσεις φαίνονται στα σχεδιαγράμματα και έχουν σχεδιαστεί και στο βασικό σχήμα της διατομής. Η διατομή που θα χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο είναι η πρώτη που αφορά το ευθύγραμμο τμήμα του τούνελ.

Τα σημεία της διατομής που μας ενδιαφέρουν για επιστημονική μελέτη είναι τα εξής έξι που φαίνονται καθαρά σχεδιασμένα στο παρακάτω σχήμα:



Είναι τα σημεία που έχουν σχεδιασθεί με σημείο αναφοράς το θεωρητικό κέντρο της κυκλικής διατομής.

Τα σημεία (-3.8,0.5) και (3.8,0.5) αντιστοιχούν στα σημεία του ύψους του κεφαλιού ενός φυσιολογικού ανθρώπου που βρίσκεται στα walking paths εκατέρωθεν των συρμών. Τα εν λόγω σημεία μας ενδιαφέρουν διότι σε αυτά θα βρίσκεται ένας υποθετικός τεχνικός που θα πρέπει να χρησιμοποιήσει το σύστημα επικοινωνιών ασφαλείας TETRA χωρίς να

αντιμετωπίζει προβλήματα αξιοπιστίας από παρεμβολές από άλλα συστήματα επικοινωνιών.

Τα σημεία (-1.9,0.7) και (1.9,0.7) αντιστοιχούν στα σημεία του ύψους του κεφαλιού ενός φυσιολογικού ανθρώπου που βρίσκεται καθισμένος σε μια θέση μέσα στο συρμό του μετρό. Τα εν λόγω σημεία μας ενδιαφέρουν διότι σε αυτά θα βρίσκεται ένας υποθετικός πολίτης που θα πρέπει να χρησιμοποιήσει τα εμπορικά συστήματα επικοινωνιών που βασίζονται στα πρότυπα GSM και DCS της κινητής τηλεφωνίας χωρίς να αντιμετωπίζει προβλήματα αξιοπιστίας από παρεμβολές από άλλα συστήματα επικοινωνιών, ή ένας υποθετικός πολίτης που χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά βοηθήματα για λόγους υγείας (βηματοδότες, ακουστικά βαρηκοΐας) τα οποία δεν πρέπει να αντιμετωπίζουν προβλήματα παρεμβολών.

Τα σημεία (-1.9,1.4) και (1.9,1.4) αντιστοιχούν στα σημεία του ύψους του κεφαλιού ενός φυσιολογικού ανθρώπου που βρίσκεται όρθιος μέσα στο συρμό του μετρό. Τα εν λόγω σημεία μας ενδιαφέρουν διότι σε αυτά θα βρίσκεται ένας υποθετικός πολίτης που θα πρέπει να χρησιμοποιήσει τα εμπορικά συστήματα επικοινωνιών που βασίζονται στα πρότυπα GSM και DCS της κινητής τηλεφωνίας χωρίς να αντιμετωπίζει προβλήματα αξιοπιστίας από παρεμβολές από άλλα συστήματα επικοινωνιών, ή ένας υποθετικός πολίτης που χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά βοηθήματα για λόγους υγείας (βηματοδότες, ακουστικά βαρηκοΐας) τα οποία δεν πρέπει να αντιμετωπίζουν προβλήματα παρεμβολών.

Οι συχνότητες που μας ενδιαφέρουν και θα μελετήσουμε στην προσομοίωση είναι: 400MHz για το σύστημα TETRA επικοινωνιών ασφαλείας του μετρό, 900MHz για το πρότυπο GSM στο οποίο βασίζονται εμπορικά συστήματα επικοινωνιών κινητής τηλεφωνίας, 1800MHz για το πρότυπο DCS στο οποίο επίσης βασίζονται εμπορικά συστήματα επικοινωνιών κινητής τηλεφωνίας, 2100MHz για το πρότυπο UMTS το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στο άμεσο μέλλον για εμπορικές εφαρμογές κινητής τηλεφωνίας και, τέλος, 3500MHz για το πρότυπο WiMax που εκτιμάται ότι θα χρησιμοποιηθεί στο μέλλον για την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών στους επιβάτες του μετρό.

5.3 Σχεδιασμός

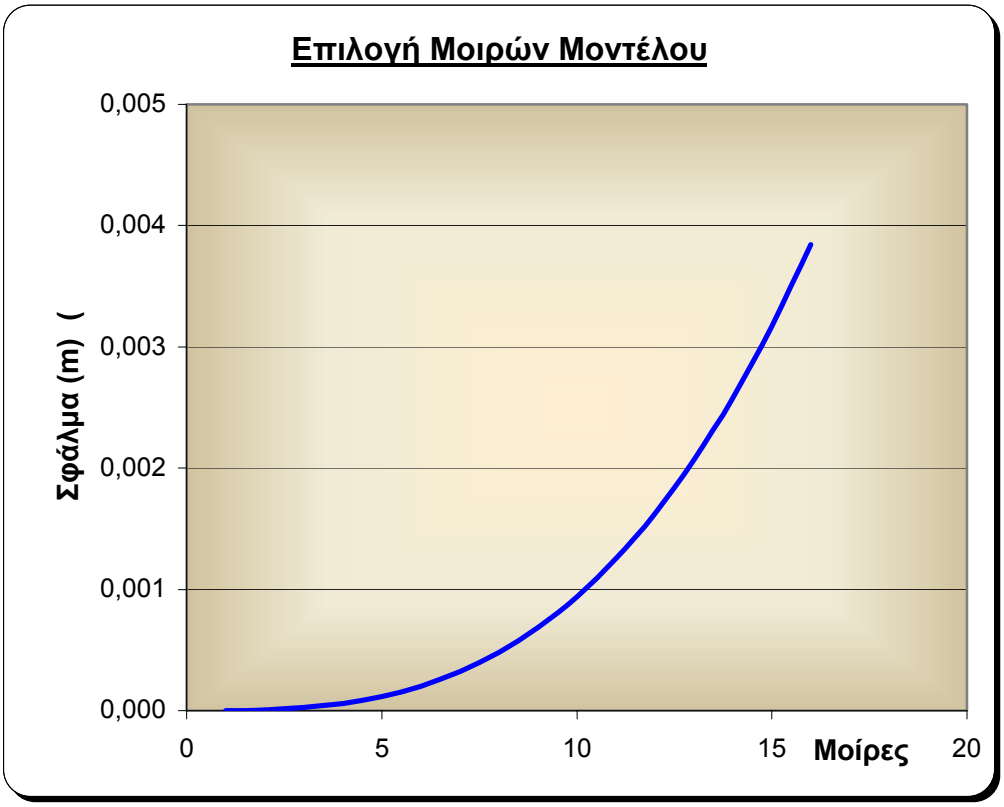
Το Supernec V2.9 είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης που χρησιμοποιείται για την κατασκευή μοντέλων που προσεγγίζουν πραγματικά περιβάλλοντα και συνθήκες διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Χρησιμοποιεί την *ομογενή γεωμετρική θεωρία της περίθλασης* (UGTD – Uniform Geometrical Theory of Diffraction) για να προσομοιώσει το φαινόμενο της περίθλασης και τη *μέθοδο των ροπών* (MoM – Method of Moments) για τον υπολογισμό των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε κάθε σημείο του χώρου. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των μοντέλων είναι είτε έτοιμες εφαρμογές σχημάτων που χρησιμοποιούνται συχνά στην πράξη είτε βασικά σχήματα με τα οποία είναι δυνατόν να κατασκευαστεί κάθε πιθανό περιβάλλον προσομοίωσης από το μηδέν.

Για την κατασκευή του υπό μελέτη τούνελ, θα χρησιμοποιήσουμε τα βασικά σχήματα **UTD plates** που αποτελούν πλάκες με μεταβλητά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και προσομοιώνουν τα φαινόμενα της ανάκλασης και περίθλασης των κυμάτων. Εφόσον δεν είναι δυνατή η χρήση κάποιων βασικών υλικών που να παρουσιάζουν καμπυλότητα, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ένα μεγάλο αριθμό από αυτά τα plates για να προσεγγίσουμε την καμπυλότητα που παρουσιάζει η σήραγγα του μετρό.

Για το λόγο αυτό και χρησιμοποιώντας τους τύπους της βασικής γεωμετρίας για το μήκος τόξου και μήκος χορδής, υπολογίζουμε το απόλυτο σφάλμα της διαφοράς του μήκους τόξου και του μήκους χορδής για ένα μικρό εύρος μοιρών προκειμένου να επιλέξουμε την κατάλληλη τιμή των μοιρών που θα αντιστοιχούν σε ένα plate.

$$\begin{aligned}\Sigma\phi\alpha\lambda\mu\alpha &= \left|\text{Μ}\eta\kappa o\varsigma\ \tau o\xi o\upsilon(\mu) - \text{Μ}\eta\kappa o\varsigma\ \chi o\rho\delta\eta\varsigma(\mu)\right| \\ &= \left|\pi\cdot R\cdot\frac{\mu}{180} - 2\cdot R\cdot\eta\mu(\frac{\mu}{2})\right|\end{aligned}$$

όπου R = 4.240m το μήκος της ακτίνας της διατομής και μ η τιμή των μοιρών. Με βάση τον παραπάνω τύπο, κατασκευάζουμε το παρακάτω διάγραμμα:



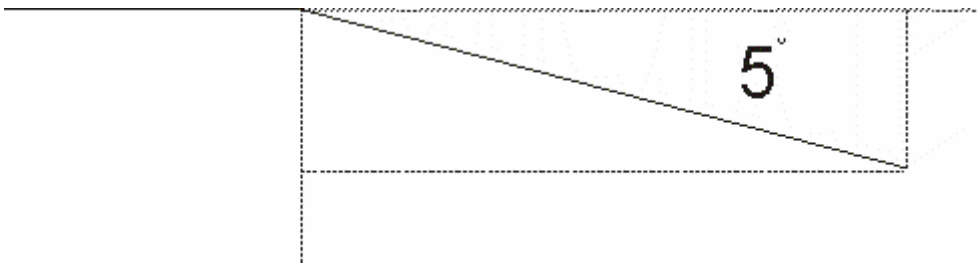
Όπως παρατηρούμε από το παραπάνω σχήμα, αν επιλέξουμε την τιμή των *5 μοιρών* για να προσεγγίσουμε την καμπυλότητα του τούνελ, η διαφορά του μήκους του τόξου από το μήκος της χορδής είναι μικρότερη από 1 χιλιοστό για ένα τούνελ ακτίνας 4.240m. Το σφάλμα είναι απειροελάχιστο και το μοντέλο θα προσεγγίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό ένα κυκλικό τούνελ κατασκευασμένο από ευθύγραμμα τμήματα.

Οι συντεταγμένες και το μήκος κάθε τμήματος είναι απαραίτητο να καθοριστούν με μεγάλη ακρίβεια. Το μήκος της χορδής υπολογίζεται ως εξής:

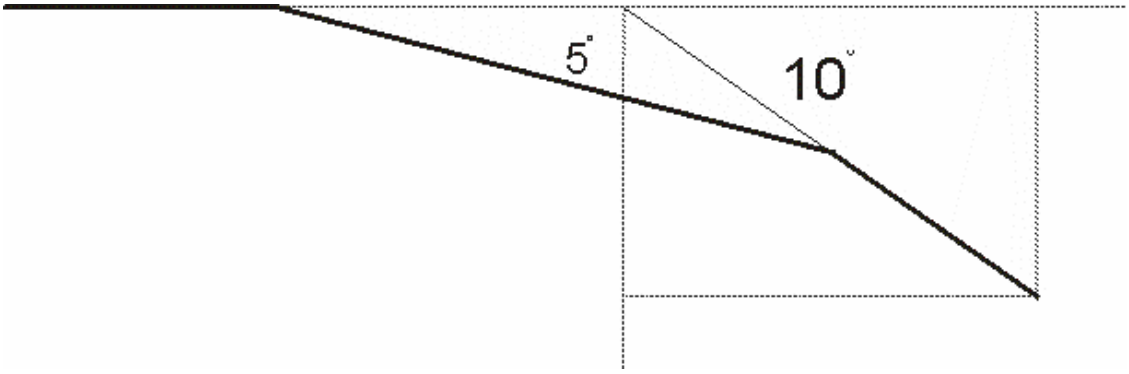
$$\text{Μ}\eta\kappa o\varsigma\ \ \chi o\rho\delta\eta\varsigma(5°) = 2 \cdot 4.24 \cdot \eta\mu(\frac{5°}{2}) = 0.370m$$

Άρα το μήκος κάθε τμήματος πρέπει να είναι **0.370m**.

Όσον αφορά τις συντεταγμένες, για το σχεδιασμό και τον υπολογισμό τους χρησιμοποιήθηκε η εξής μέθοδος. Υπολογίζονται οι προβολές κάθε τμήματος στους άξονες των καρτεσιανών συντεταγμένων, όπως στο σχήμα, και αφαιρούνται από το σημείο έναρξης του τμήματος:



Για το πρώτο τμήμα υπολογίστηκαν οι προβολές του τέλους του σχήματος στους άξονες και αφαιρέθηκαν από το σημείο έναρξης του τμήματος.



Για το δεύτερο τμήμα υπολογίστηκαν οι προβολές του τέλους του τμήματος στους άξονες αλλά με γωνία μέτρησης τις 10° όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα.

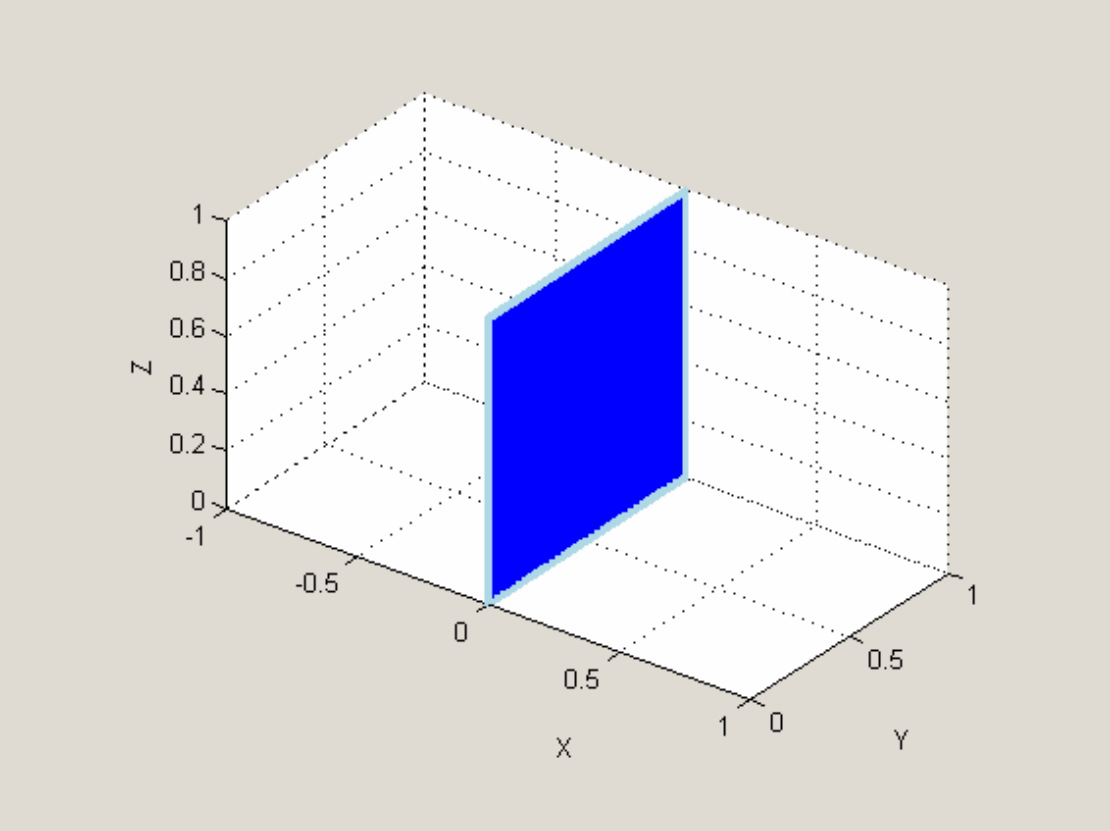
Για τα υπόλοιπα τμήματα χρησιμοποιήθηκε η ίδια μέθοδος με διαφορετική γωνία μέτρησης. Για κάθε τμήμα, η γωνία μέτρησης αυξάνεται κατά 5° μέχρι να φτάσει τις 90° οπότε και θα έχει κατασκευαστεί ένα τέταρτο του κύκλου.

5.4 Κατασκευή

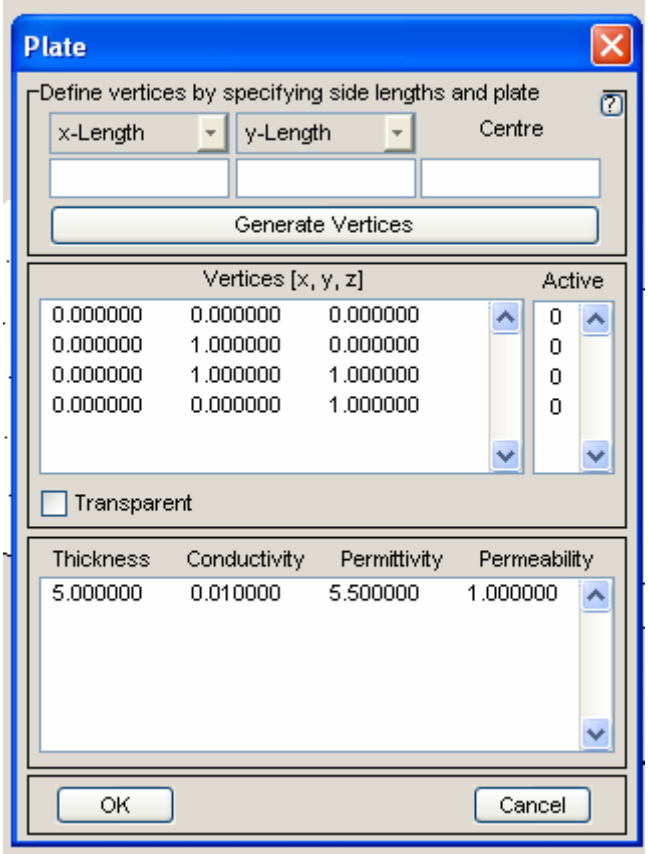
Για την περιγραφή της διαδικασίας κατασκευής του μοντέλου στο πρόγραμμα προσομοίωσης, θα χρησιμοποιηθούν στιγμιότυπα από τα μενού επιλογών του Supernec V2.9.

Θα περιγραφεί η μέθοδος για την κατασκευή του γενικού μοντέλου, καθώς για κάθε διαφορετική προσομοίωση που απαιτεί το πειραματικό μέρος της εργασίας τα χαρακτηριστικά του μοντέλου μεταβάλλονται ανάλογα με τις απαιτήσεις της προσομοίωσης.

Το βασικό στοιχείο που συνθέτει το μοντέλο είναι το UTD plate.

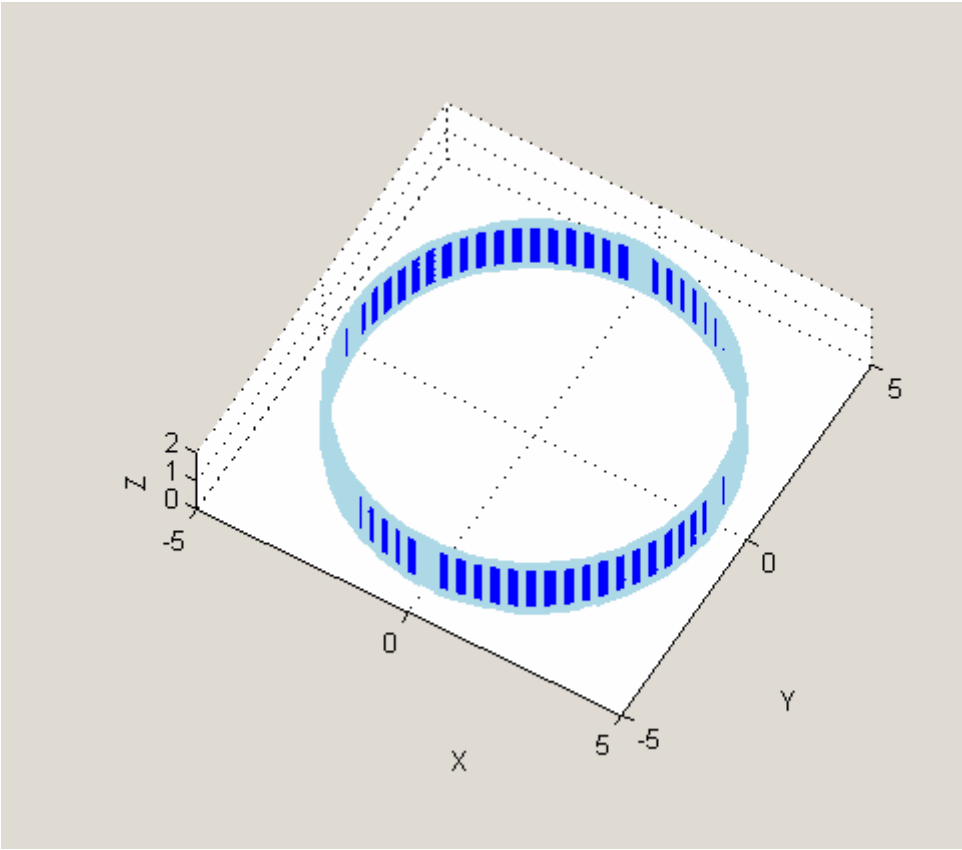


Οι ιδιότητες του plate μπορούν να μεταβληθούν από το μενού επεξεργασίας.

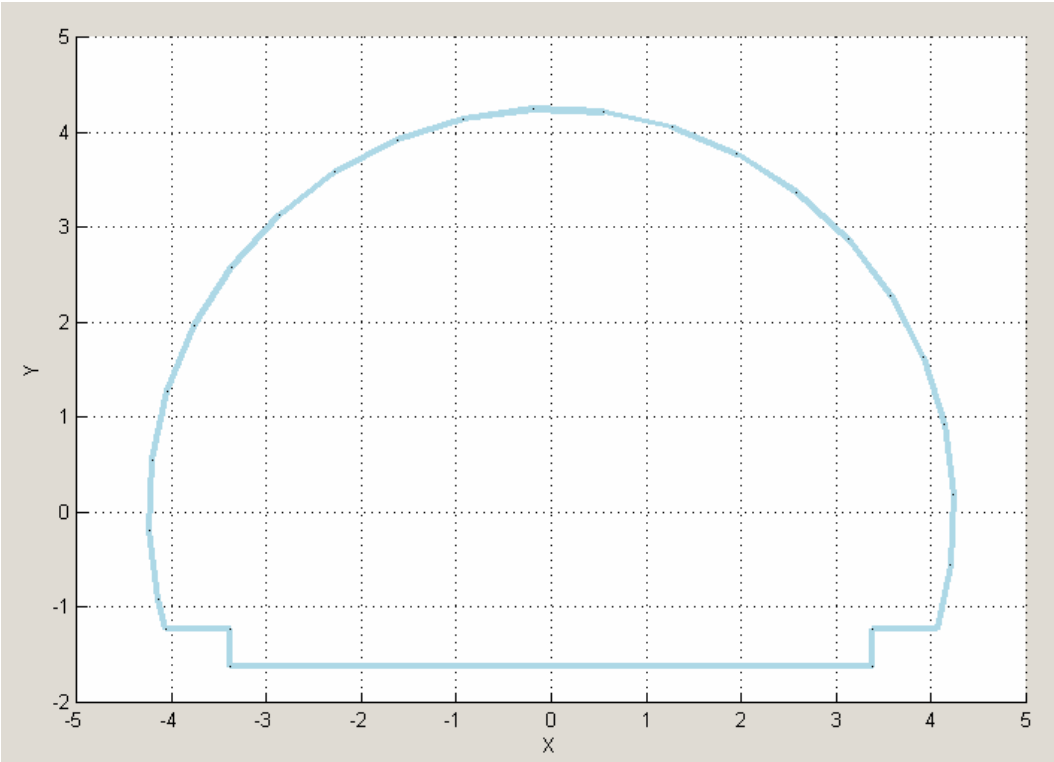


Σε αυτό το μενού, θέτουμε στη θέση vertices τα σημεία των τεσσάρων άκρων του plate στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, στη θέση active τη δυνατότητα περίθλασης στις άκρες των ακμών, και στο κουτί στο κάτω μέρος τις ηλεκτρικές ιδιότητες: το πάχος του plate, την αγωγιμότητά του, την επιτρεπτότητα ε και τη διαπερατότητα μ. Το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το τούνελ του μετρό είναι το τσιμέντο. Θέτουμε το πάχος στα 5m ώστε να είναι απίθανη η διείσδυση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων διαμέσου των τοιχωμάτων. Θέτουμε την αγωγιμότητα 0.01S/m, τη σχετική επιτρεπτότητα ε_r=5.5 και τη σχετική μαγνητική διαπερατότητα μ_r=1, όπως ισχύουν για το υλικό του τσιμέντου. Θέτουμε τις ακμές της πλάκας 0 δηλαδή inactive ώστε να μην υπολογιστεί το φαινόμενο της περίθλασης στα άκρα τους.

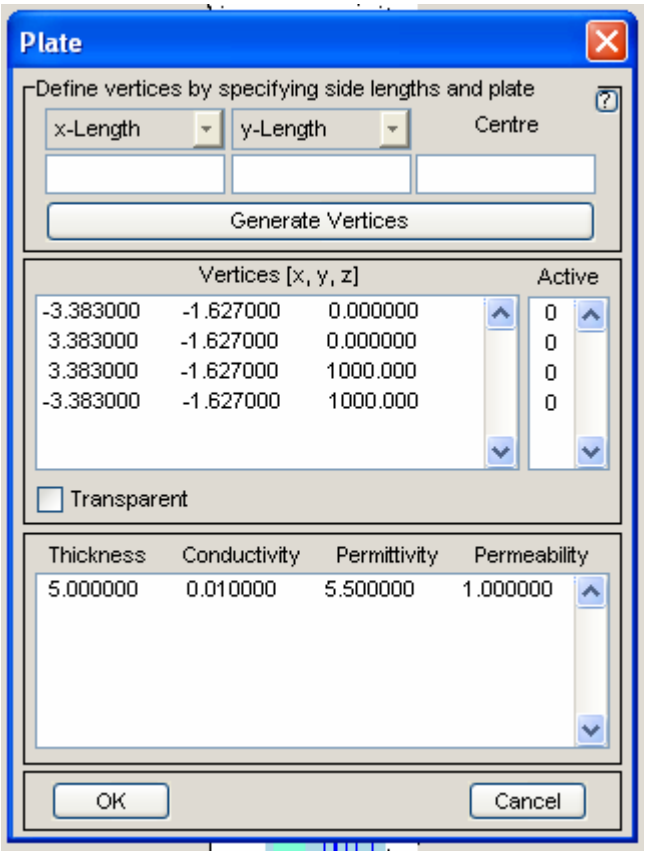
Το αρχικό στάδιο της κατασκευής ήταν η δημιουργία ενός κυκλικού τούνελ ώστε να διαμορφωθεί περαιτέρω κατάλληλα και να σχηματίσει το επιθυμητό τούνελ.



Έπειτα από κατάλληλη διαμόρφωση, το τελικό σχήμα του τούνελ επετεύχθη. Σε αυτό το σχήμα που φαίνεται μόνο η κάτοψη, καθώς το μήκος του είναι 1Km, διακρίνεται η ακρίβεια των διαστάσεων της διατομής, των walking paths και του δαπέδου της σήραγγας.

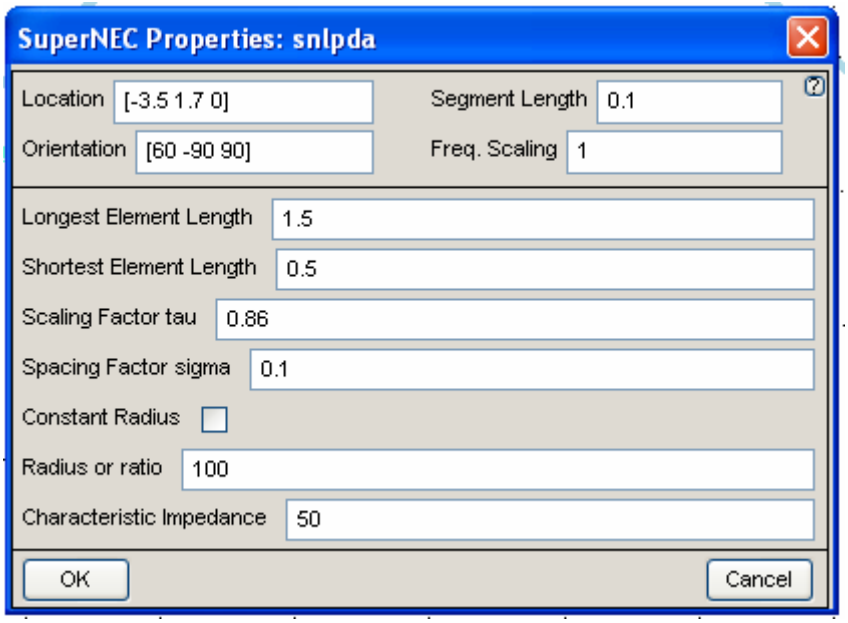


Οι ιδιότητες ενός από τα τμήματα του μοντέλου φαίνονται παρακάτω. Στη θέση z των vertices διακρίνεται το μήκος του 1km. Η επιλογή του 1km σαν το μέσο μήκος μελέτης διαδρομής έγινε διότι το μέσο μήκος από σταθμό σε σταθμό για το μετρό της Αττικής είναι τα 2km οπότε μας ενδιαφέρει η ισχύς λήψης σε κάθε σημείο της διατομής μέχρι τη μισή απόσταση που είναι το 1km, αφού υπάρχει μια κεραία εκπομπής σε κάθε άκρο της τροχιάς.

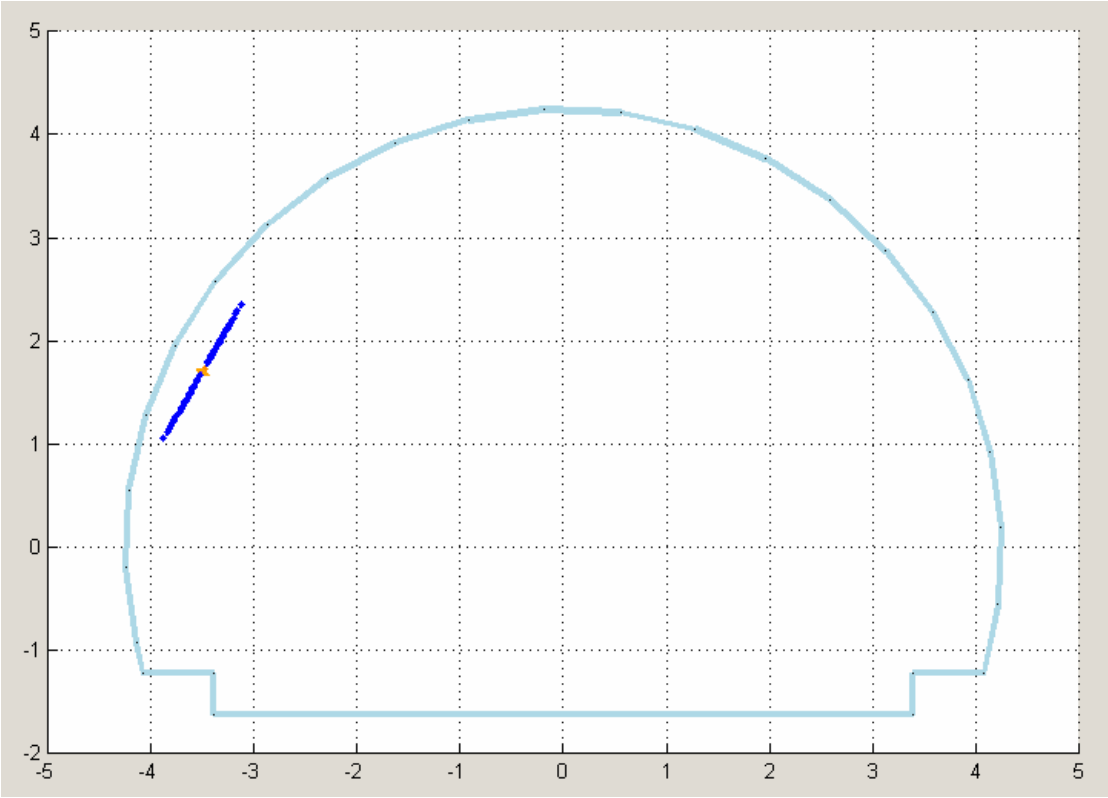


Η κεραία εκπομπής που προτιμήθηκε για την προσομοίωση είναι η log-periodical lpda που έχει τη δυνατότητα συντονισμού σε παραπάνω από μια συχνότητες. Εφόσον ο στόχος της εργασίας είναι η μελέτη ενός μεγάλου σχετικά εύρους συχνοτήτων, η log-periodical κεραία κρίθηκε η πλέον κατάλληλη.

Το μενού των ιδιοτήτων της συμπληρώθηκε όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Τοποθετήθηκε στο σημείο (-3.5,1.7) της διατομής στην αρχή του τούνελ, στο σημείο που βρίσκεται ακριβώς πάνω από το αριστερό walking path της σήραγγας, σε σημείο που είναι τοποθετημένες και οι πραγματικές κεραίες στο μετρό της Αττικής.

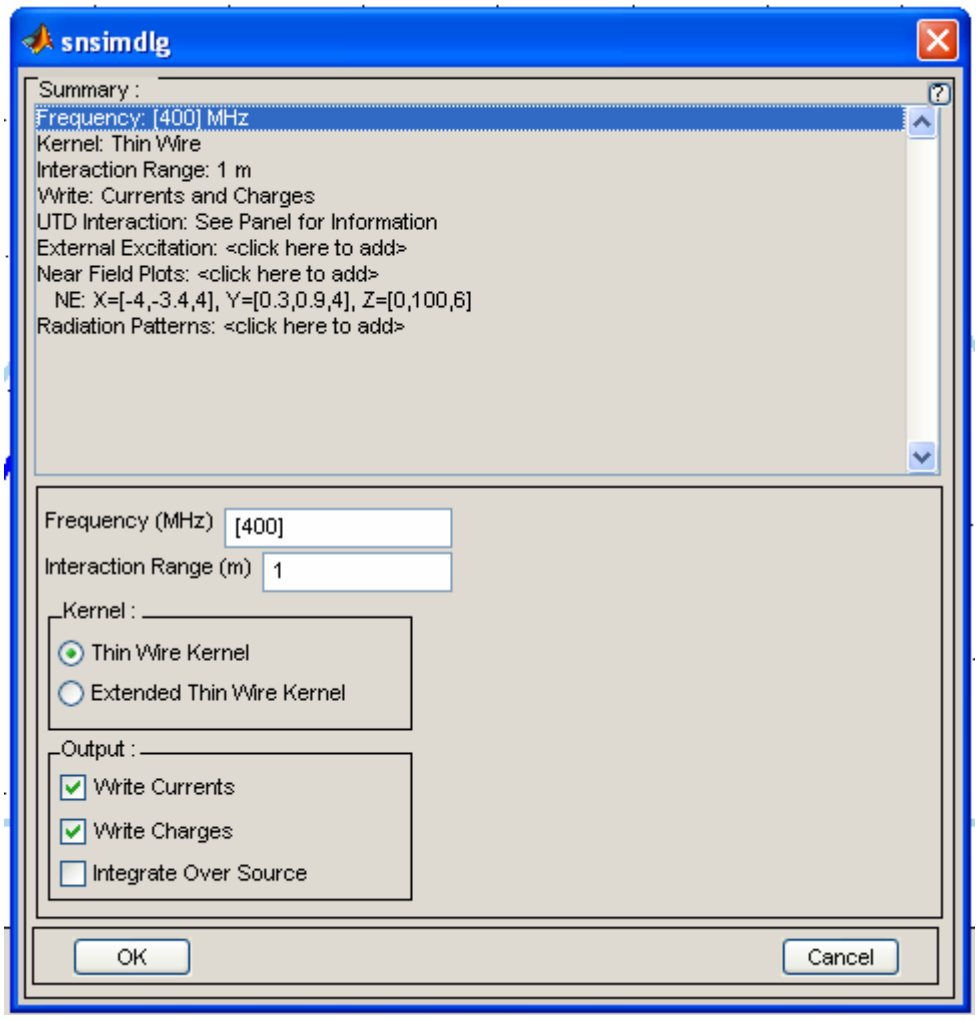


Η διατομή με τη θέση της κεραίας φαίνονται στο παρακάτω σχήμα που είναι η τελική μορφή του μοντέλου.

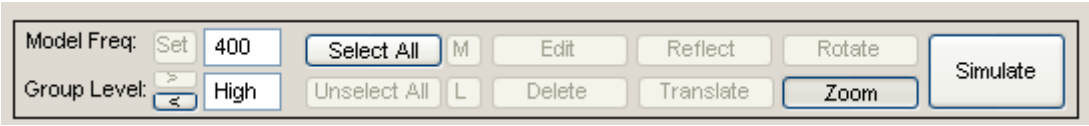


Μέχρι τώρα περιγράφηκε η διαδικασία κατασκευής του μοντέλου. Η μορφή του διατηρήθηκε η ίδια για όλες τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν. Αυτό που μεταβάλλεται από προσομοίωση σε προσομοίωση είναι οι συνθήκες προσομοίωσης που περιγράφονται παρακάτω.

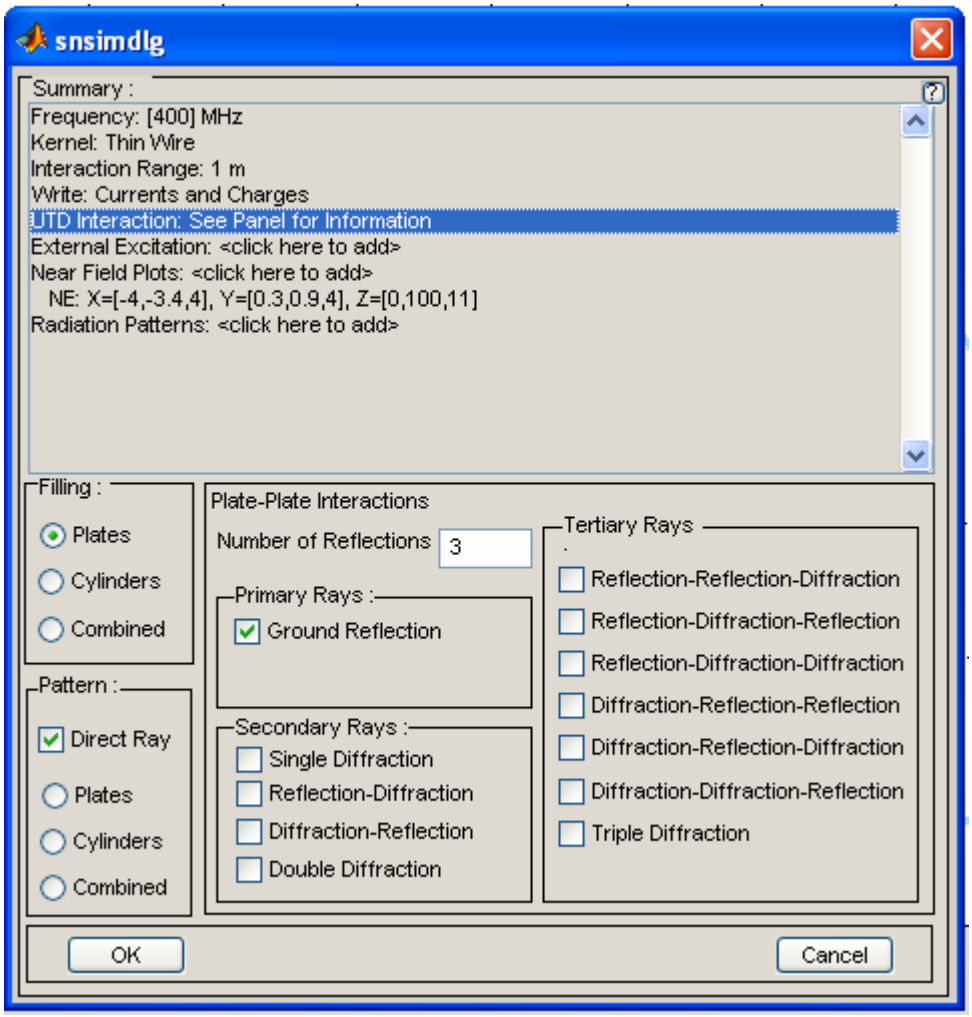
Στο μενού Simulation Settings θέτουμε τις συνθήκες προσομοίωσης.



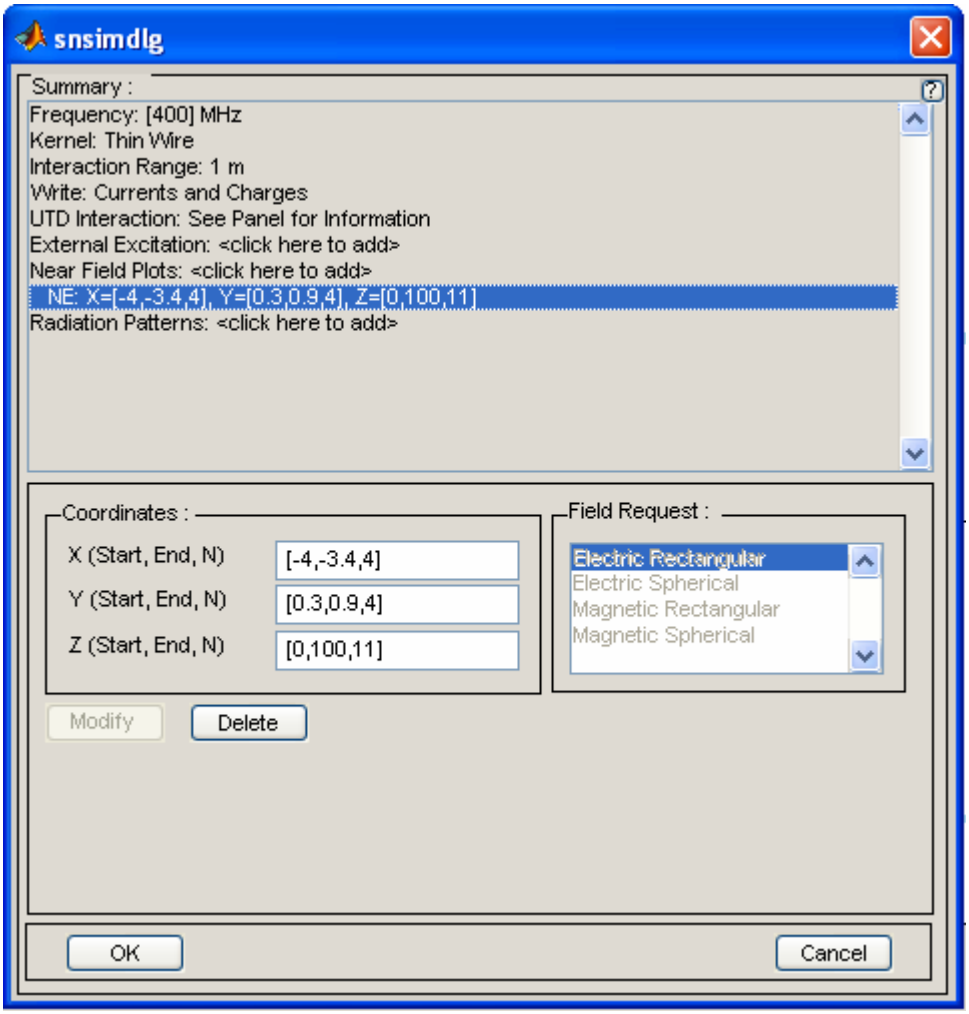
Στο μενού της συχνότητας, θέτουμε τη συχνότητα προσομοίωσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι 400MHz. Σε αυτό το μενού μπορούμε να θέσουμε περισσότερες από μια τιμές συχνότητας ώστε τα αποτελέσματα να υπολογιστούν για πολλές τιμές της συχνότητας και να λάβουμε ως αποτέλεσμα διαγράμματα με ανεξάρτητη μεταβλητή τη συχνότητα. Οι τιμές σε αυτό το μενού πρέπει να είναι μικρότερες ή ίσες από την τιμή της συχνότητας του μοντέλου που τίθεται στο κεντρικό μενού, στο κουτί Model Freq.



Στο μενού UTD Interaction θέτουμε τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των plates που συνθέτουν το μοντέλο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπως φαίνεται στο σχήμα, δεν επιλέγουμε κάποια από τις αλληλεπιδράσεις που περιέχουν περίθλαση καθώς αυτό το φαινόμενο δεν εμφανίζεται στην περίπτωσή μας. Επιλέγουμε μόνο την ανάκλαση στην επιφάνεια των πλακών και θέτουμε τον μέγιστο αριθμό ανακλάσεων στις 3 καθώς αύξηση του αριθμού σε μεγαλύτερο νούμερο αυξάνει κατά πολύ τη διάρκεια της προσομοίωσης χωρίς να προσθέτει ουσιαστική ακρίβεια στα αποτελέσματα. Κρίνουμε πως η ακρίβεια των μετρήσεων είναι ικανοποιητική υπολογίζοντας 3 ανακλάσεις ανά πλάκα.

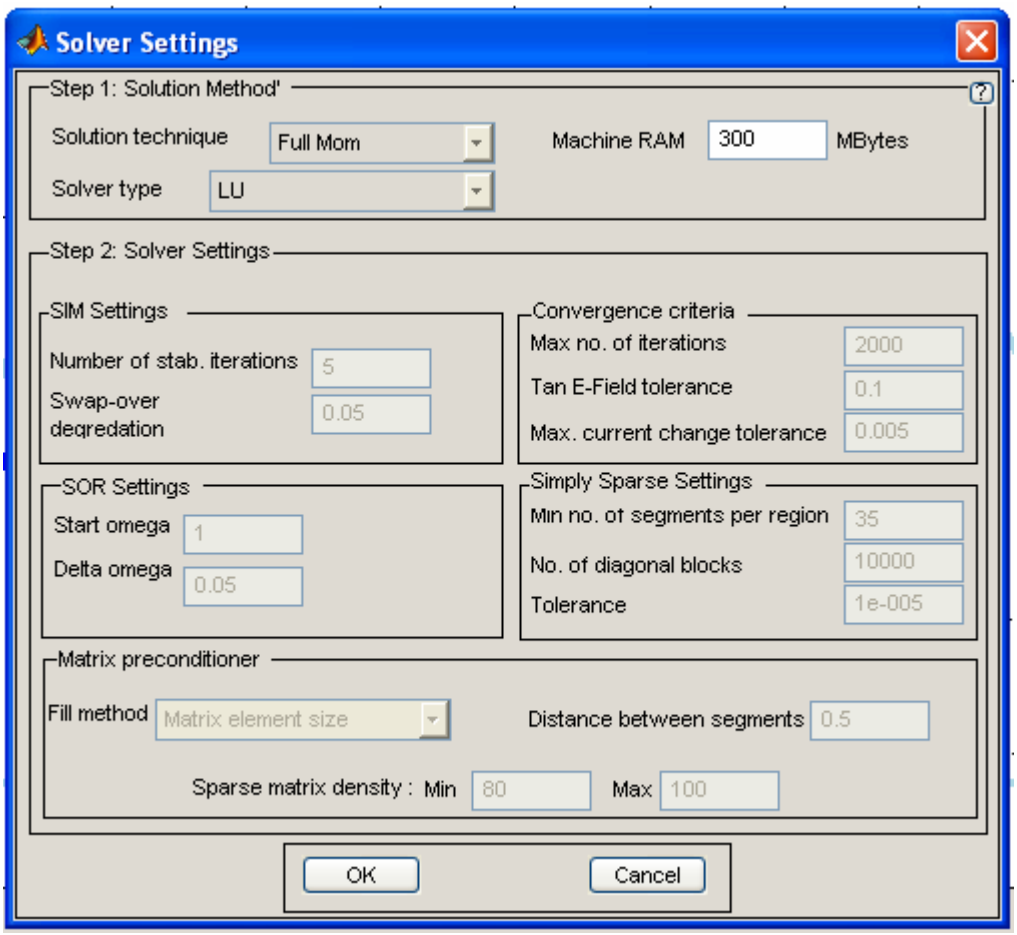


Στο μενού Near Field Plots επιλέγουμε να υπολογιστεί το ηλεκτρικό πεδίο σε καρτεσιανές συντεταγμένες για την περιοχή σημείων (x,y) που μας ενδιαφέρει κάθε φορά και για την απόσταση z που μας ενδιαφέρει κάθε φορά. Το Supernec δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού μόνο του κοντινού πεδίου. Στην περίπτωση που η απόσταση που μελετάται ανήκει στο μακρινό πεδίο της κεραίας, αυτό υπολογίζεται κανονικά, αφού γίνεται εσωτερικός έλεγχος από το Supernec ώστε το πεδίο σε κάθε σημείο να υπολογίζεται ανάλογα με το σε ποια περιοχή, κοντινή ή μακρινή, ανήκει το σημείο.



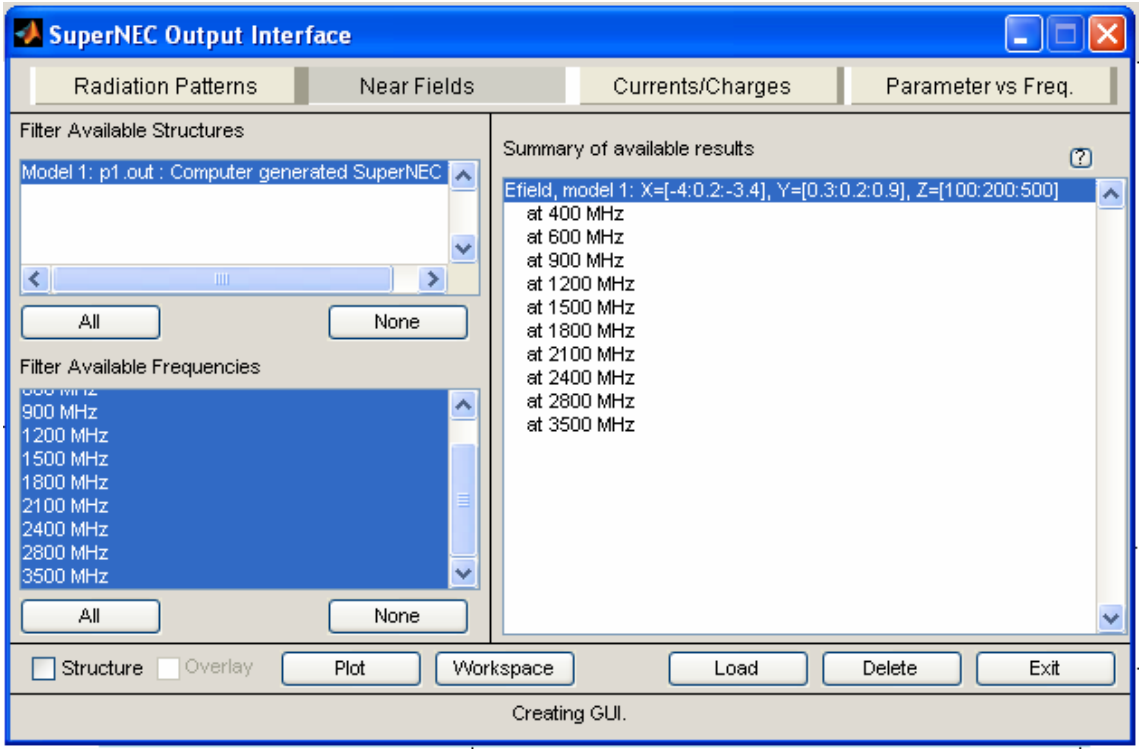
Οι υπόλοιπες δυνατότητες υπολογισμού του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας και χρήσης εξωτερικής διέγερσης για το περιβάλλον δε χρησιμοποιούνται αφού δεν εφαρμόζονται στην περίπτωση που μελετάμε.

Στο μενού Solver Settings εμφανίζονται οι μαθηματικές τεχνικές που δίνει το Supernec στο χρήστη για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιούμε την πλήρη μέθοδο των ροπών για τον υπολογισμό των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε κάθε σημείο του χώρου ενώ χρησιμοποιούμε τη μέθοδο LU για την επίλυση συστημάτων πινάκων.



Η προσομοίωση πραγματοποιείται με το πάτημα του πλήκτρου Simulate στο κεντρικό μενού.

Μετά το πέρας της προσομοίωσης, τα αποτελέσματα εμφανίζονται στο παράθυρο του output.



Σε αυτό το παράθυρο επιλέγουμε το κουμπί Near Fields για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων του κοντινού πεδίου και έπειτα επιλέγουμε τη συχνότητα που επιθυμούμε.

Τα γραφήματα εμφανίζονται με χρώματα που διακρίνουν τη διαφορά στην ισχύ του πεδίου σε κάθε σημείο. Το κεντρικό παράθυρο δείχνει την κατανομή της ισχύος στη διατομή του τούνελ ενώ επιλέγοντας από το παράθυρο Z, μπορούμε να αλλάξουμε την απόσταση από την αρχή του τούνελ. Επίσης αλλάζοντας την τιμή του παραθύρου freq, μεταβάλλουμε τη συχνότητα προσομοίωσης.

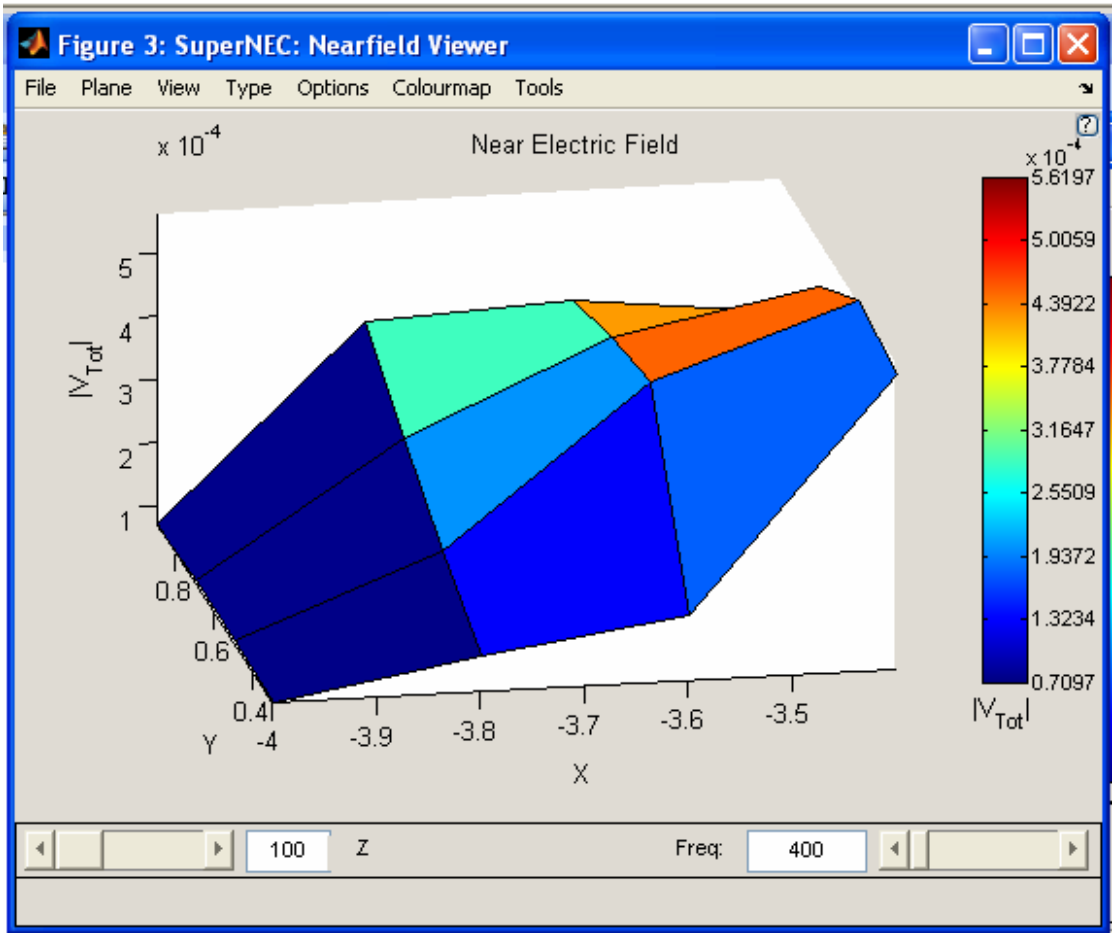


Figure 3: SuperNEC: Nearfield Viewer
File Plane View Type Options Colourmap Tools
Near Electric Field
x 10^-4
|V_Tot|
5
4
3
2
1
0.8
0.6
0.4
Y
-4
-3.9
-3.8
-3.7
-3.6
-3.5
X
x 10^-4
5.6197
5.0059
4.3922
3.7784
3.1647
2.5509
1.9372
1.3234
0.7097
|V_Tot|
100
Z
Freq:
400

5.5 Επιλογή διαγραμμάτων

Με την παραπάνω διαδικασία δημιουργήθηκε το μοντέλο που προσομοιώνει το υπό μελέτη τούνελ ενώ δημιουργήθηκαν συνολικά 161 διαφορετικές προσομοιώσεις με διαφορετικές ιδιότητες η κάθε μια. Η κάθε προσομοίωση δημιουργήθηκε για να υπολογιστεί μια διαφορετική συνθήκη στη συνολική προσομοίωση.

Τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων που θα παρουσιαστούν παρακάτω επιλέχθηκαν προκειμένου να είναι δυνατή η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα διαγράμματα των θεωρητικών μοντέλων και να είναι εύκολη η εκτίμηση των επιπέδων εξασθένησης σε οποιαδήποτε θέση για οποιαδήποτε συχνότητα μας ενδιαφέρει.

Συνολικά θα παρουσιαστούν 63 διαγράμματα.

Τα 30 αναφέρονται σε διαγράμματα κανονικοποιημένης ισχύος λήψης συναρτήσει της απόστασης. Αναφέρονται στα 6 διαφορετικά σημεία μελέτης που επιλέξαμε παραπάνω και υπολογίζεται η ισχύ λήψης σε αυτά τα σημεία και για τις 5 υπό μελέτη συχνότητες.

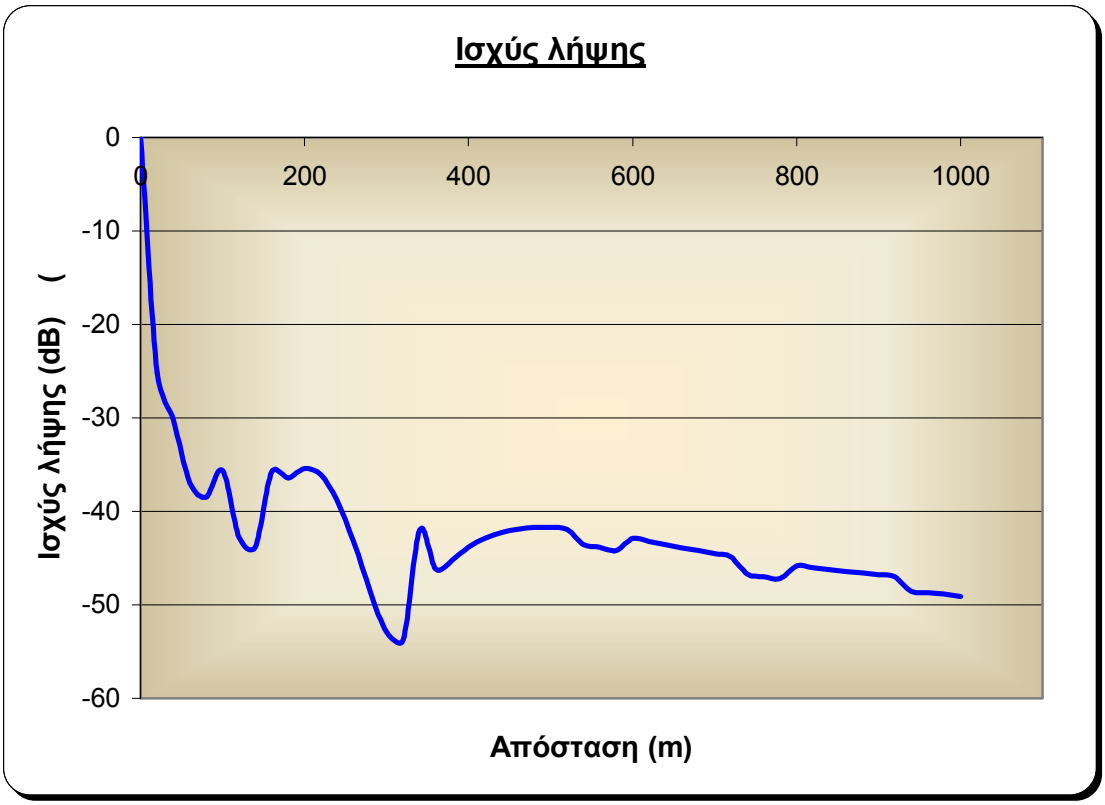
Τα 18 αναφέρονται σε διαγράμματα εξασθένησης συναρτήσει της συχνότητας. Επιλέχθηκαν 3 αποστάσεις: 100m, 300m, 500m ώστε να είναι πιο πλήρης η μελέτη και προσομοιώθηκαν και τα 6 σημεία που μας ενδιαφέρουν.

Τα 15 αναφέρονται σε διαγράμματα ισχύος σε ολόκληρη τη διατομή του τούνελ. Σε αυτήν την περίπτωση δε θα παρουσιαστεί απλά η τιμή της ισχύος σε ένα συγκεκριμένο σημείο της διατομής, αλλά η κατανομή της ισχύος σε όλη τη διατομή της σήραγγας ώστε να είναι πλέον παραστατική και έκδηλη η συμπεριφορά των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων καθώς διαδίδονται σε ένα τούνελ. Επιλέχθηκαν 3 αποστάσεις: 100m, 500m, 900m και θα προσομοιωθούν και οι 5 υπό μελέτη συχνότητες.

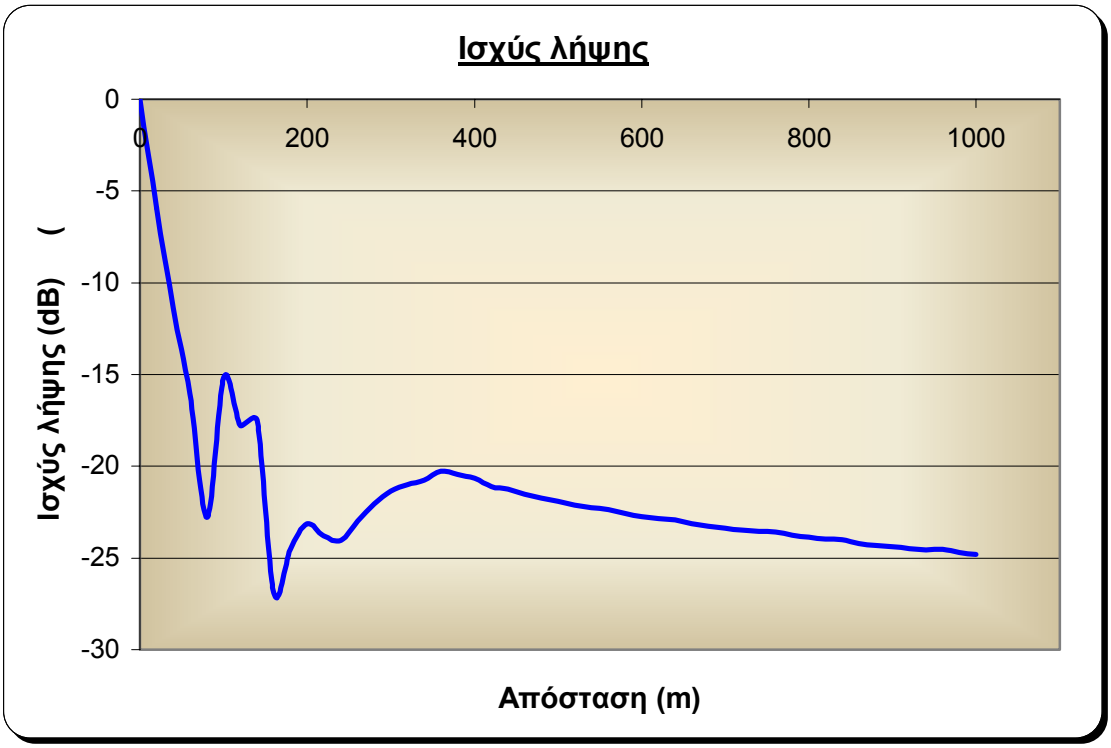
5.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Αρχικά θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα της κανονικοποιημένης ισχύος συναρτήσει της απόστασης από την κεραία εκπομπής, για κάθε σημείο παρατήρησης. Ως τιμή αναφοράς για την κανονικοποίηση επιλέχθηκε η τιμή για z=0.

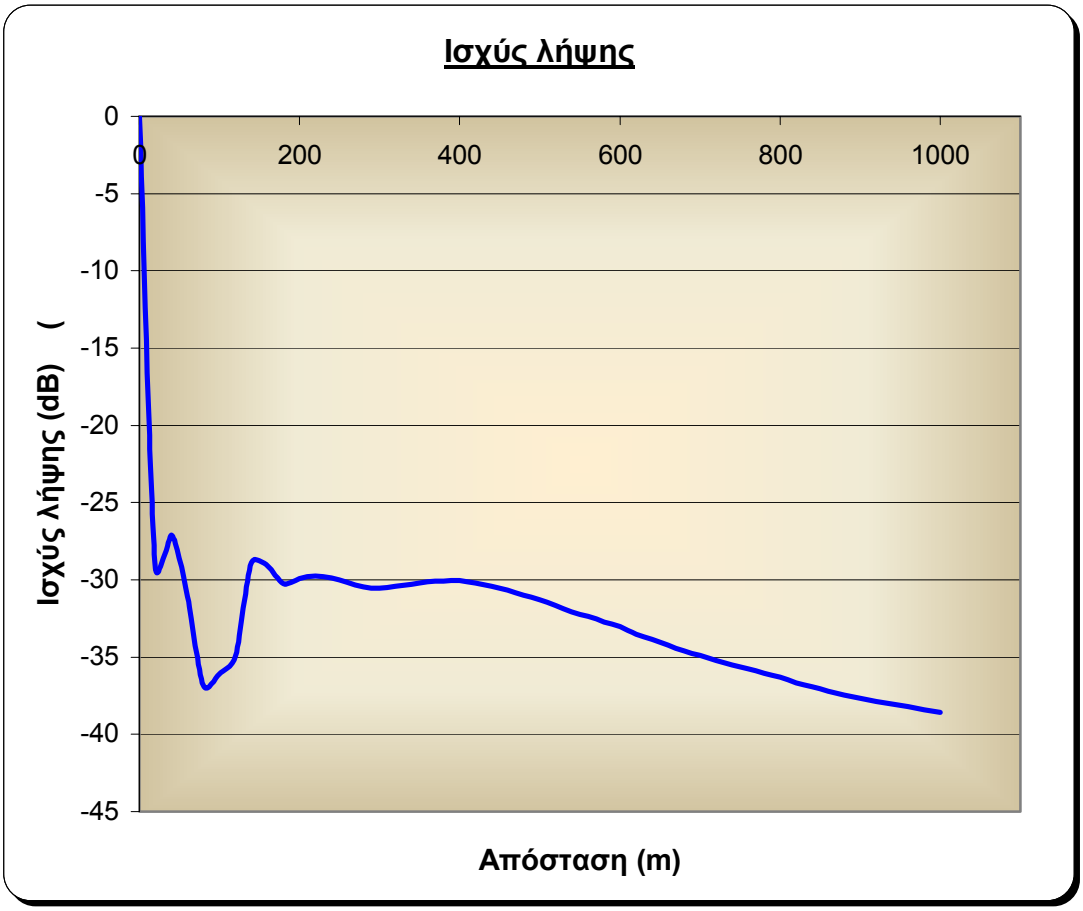
Σημείο παρατήρησης (-3.8,0.5) – Συχνότητα 400MHz



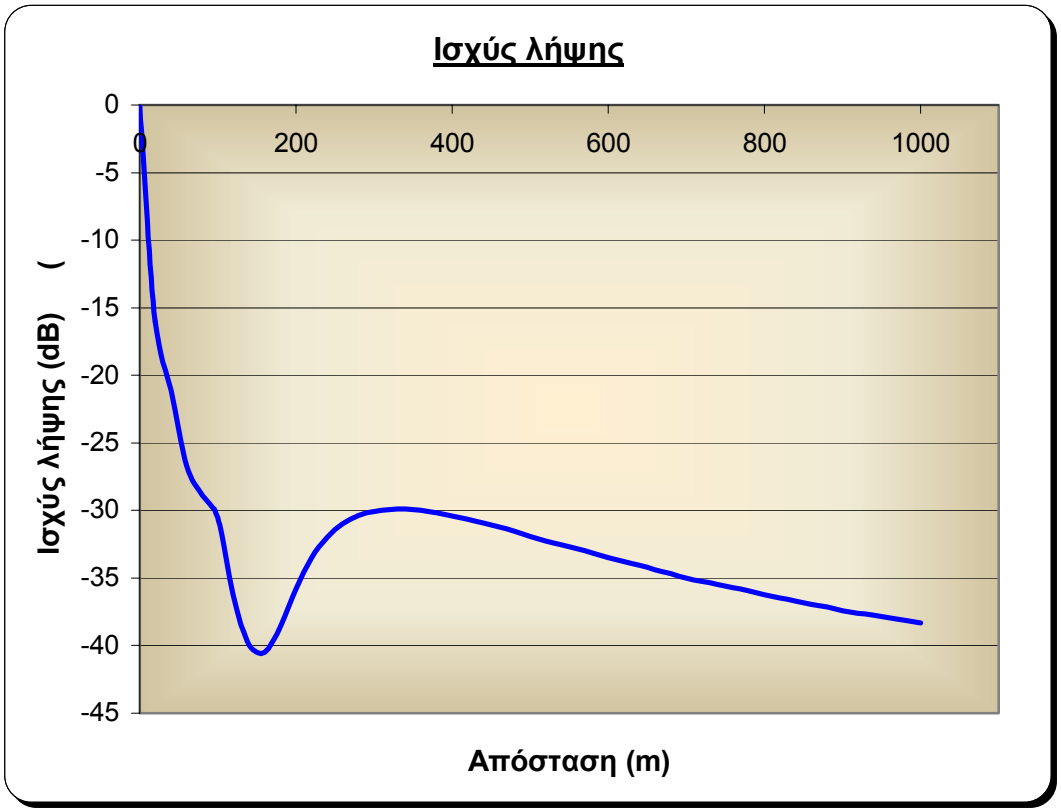
Σημείο παρατήρησης (3.8,0.5) – Συχνότητα 400MHz



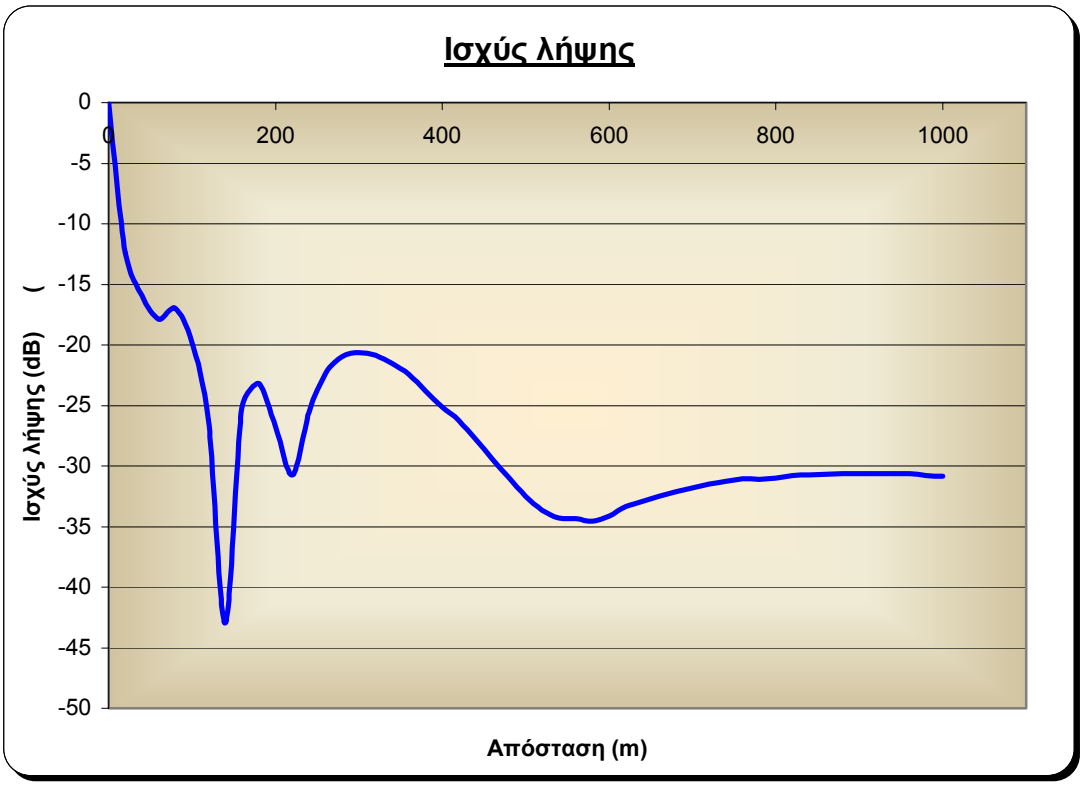
Σημείο παρατήρησης (-1.9,0.7) – Συχνότητα 400MHz



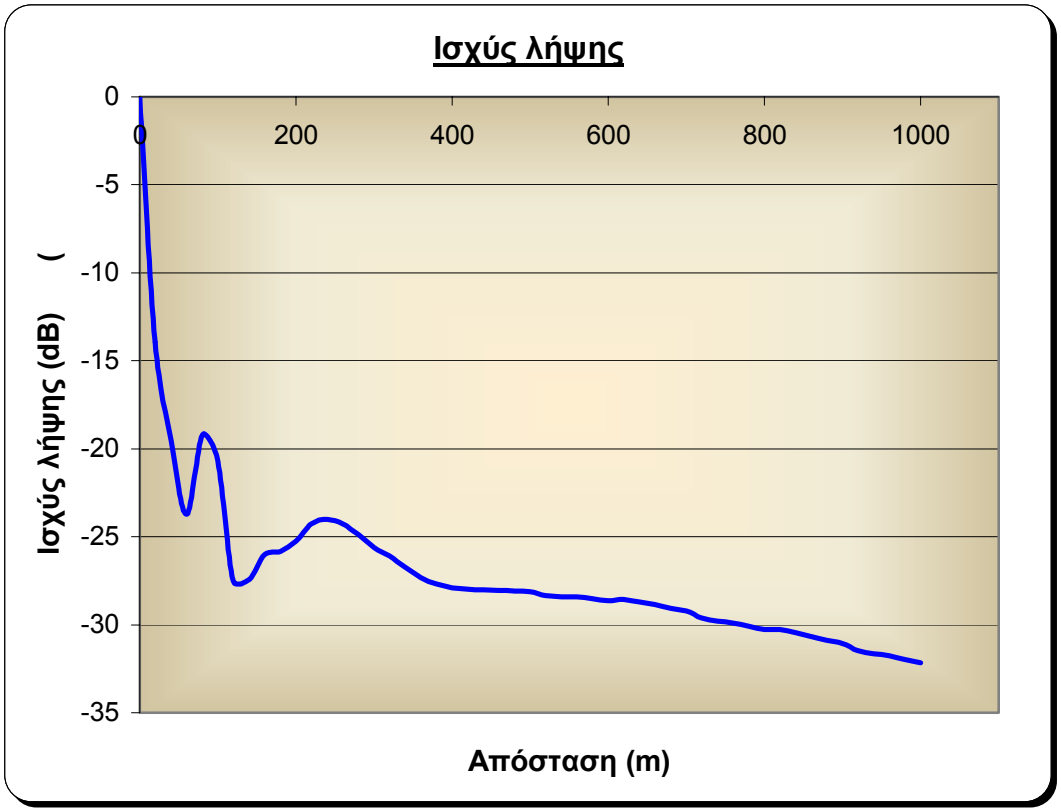
Σημείο παρατήρησης (-1.9,1.4) – Συχνότητα 400MHz



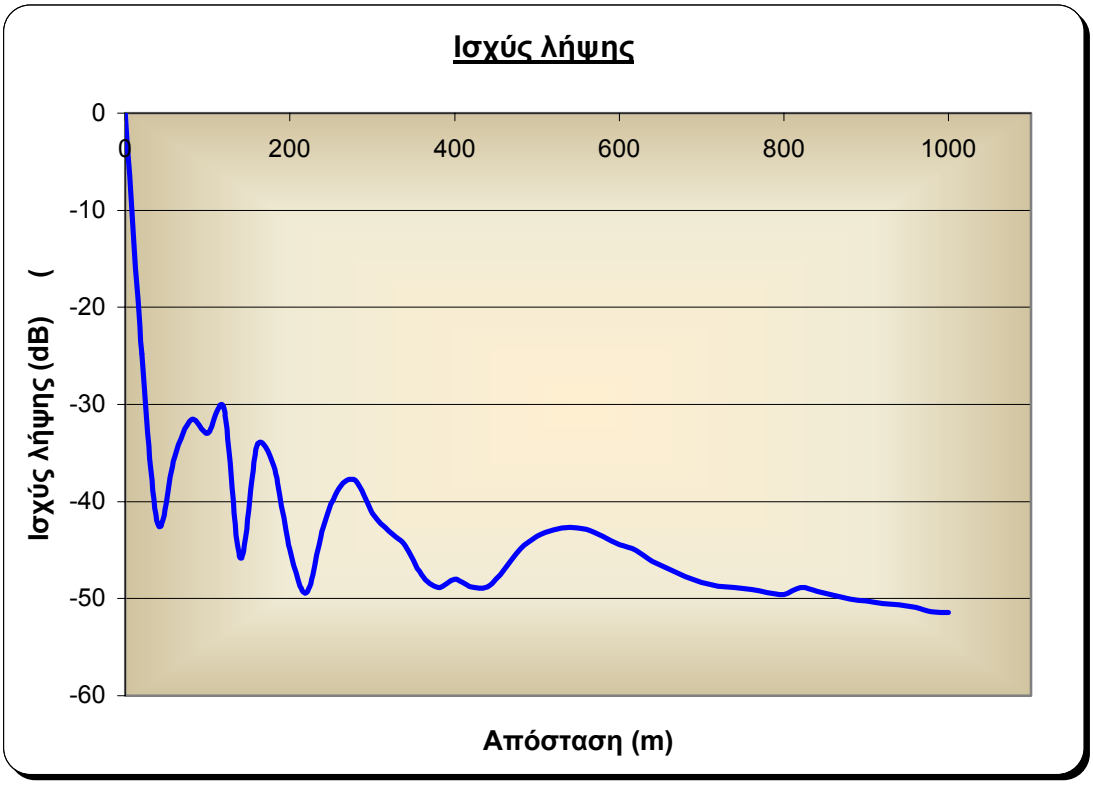
Σημείο παρατήρησης (1.9,0.7) – Συχνότητα 400MHz



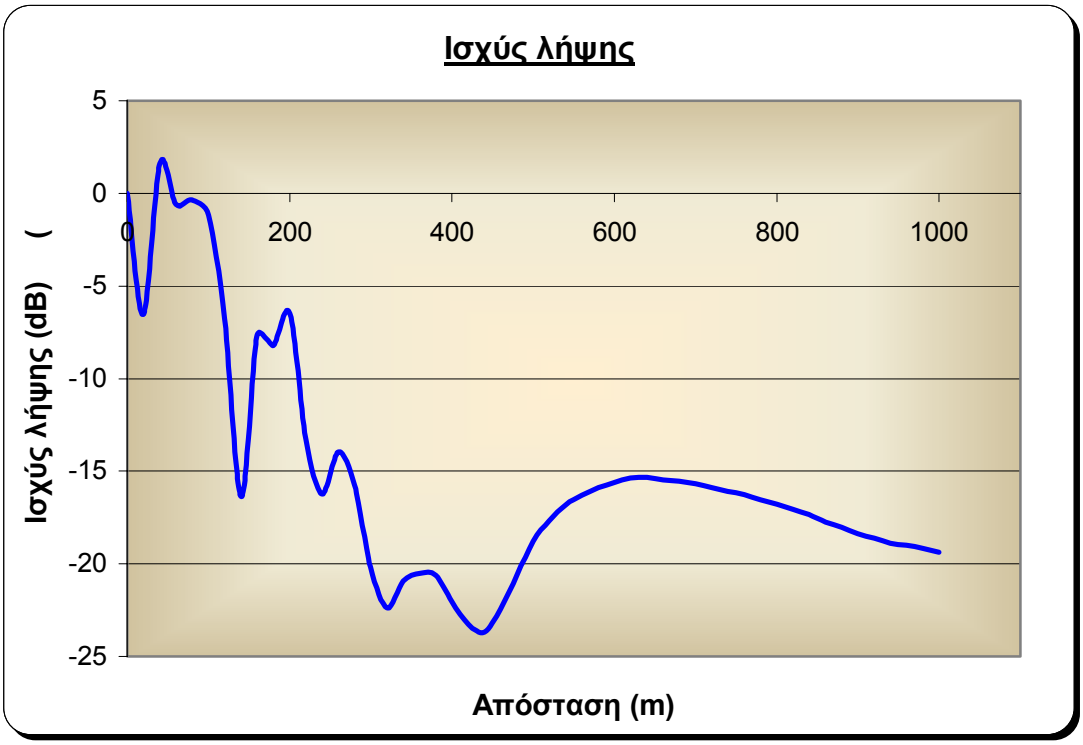
Σημείο παρατήρησης (1.9,1.4) – Συχνότητα 400MHz



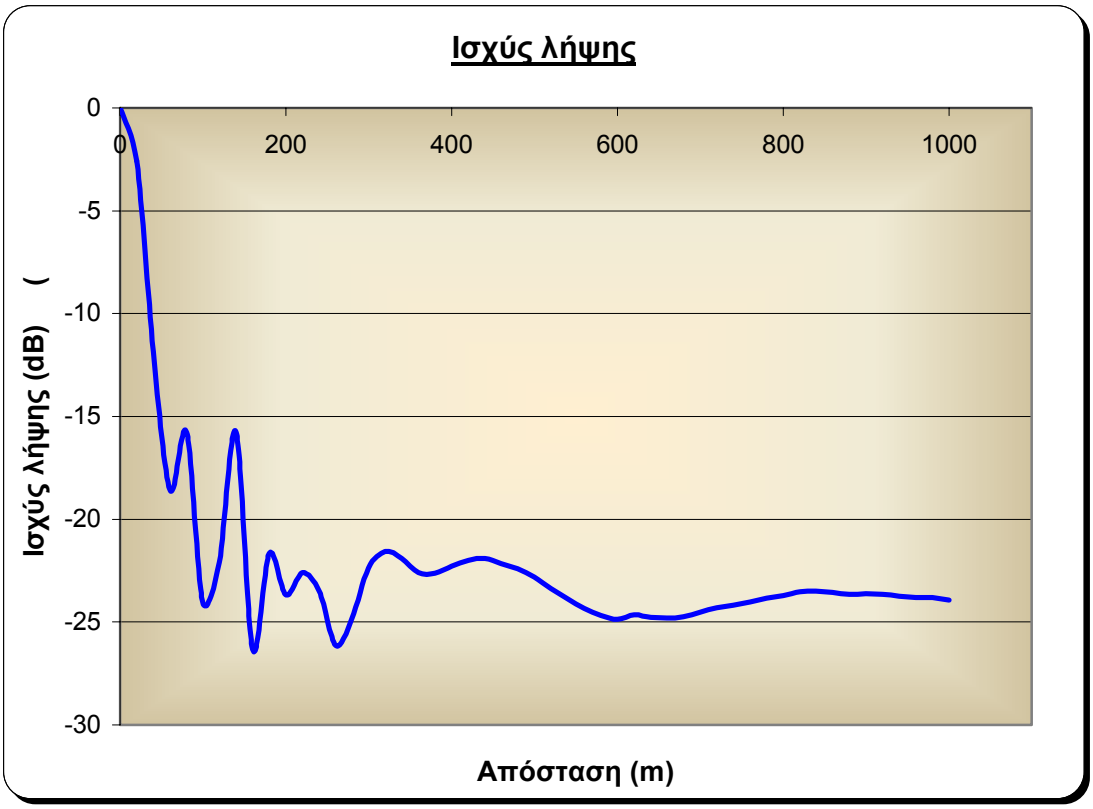
Σημείο παρατήρησης (-3.8,0.5) – Συχνότητα 900MHz



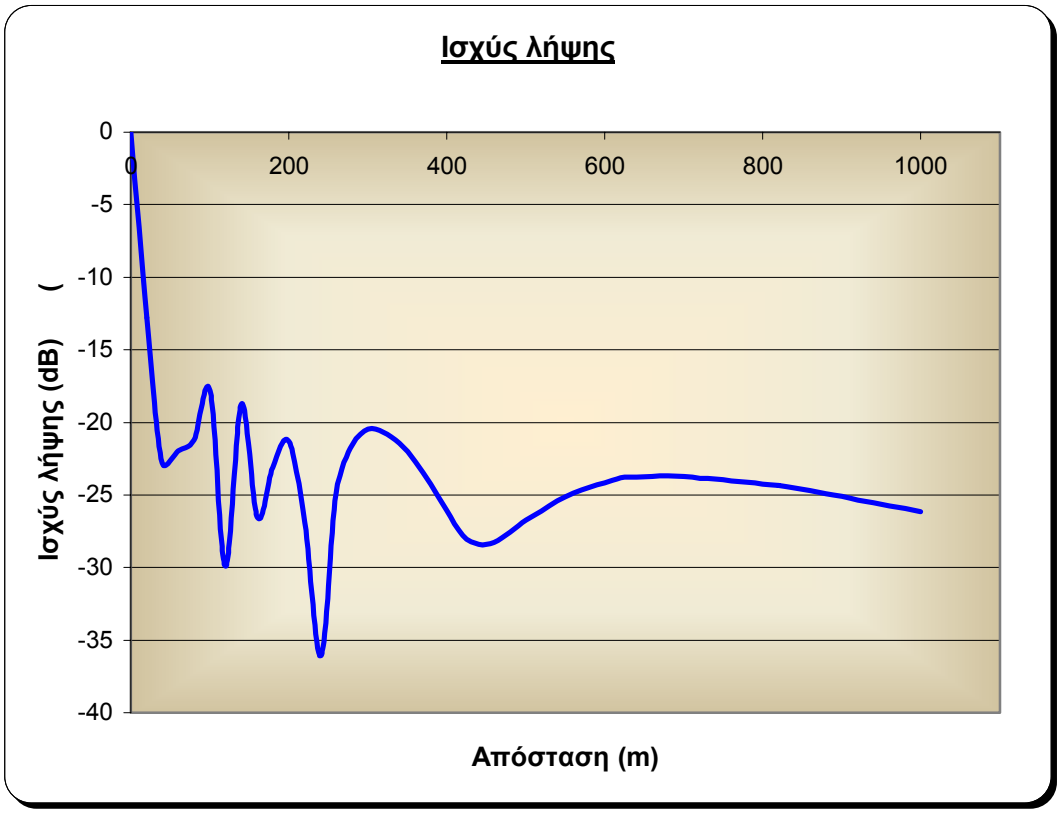
Σημείο παρατήρησης (3.8,0.5) – Συχνότητα 900MHz



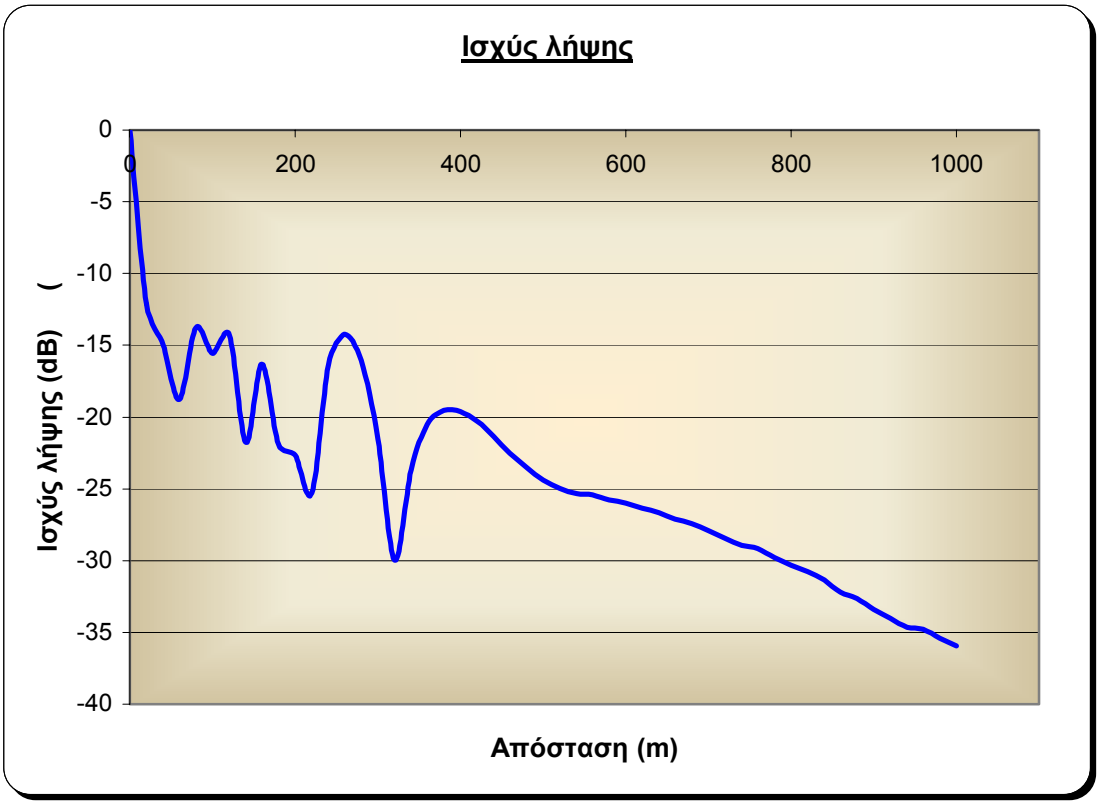
Σημείο παρατήρησης (-1.9,0.7) – Συχνότητα 900MHz



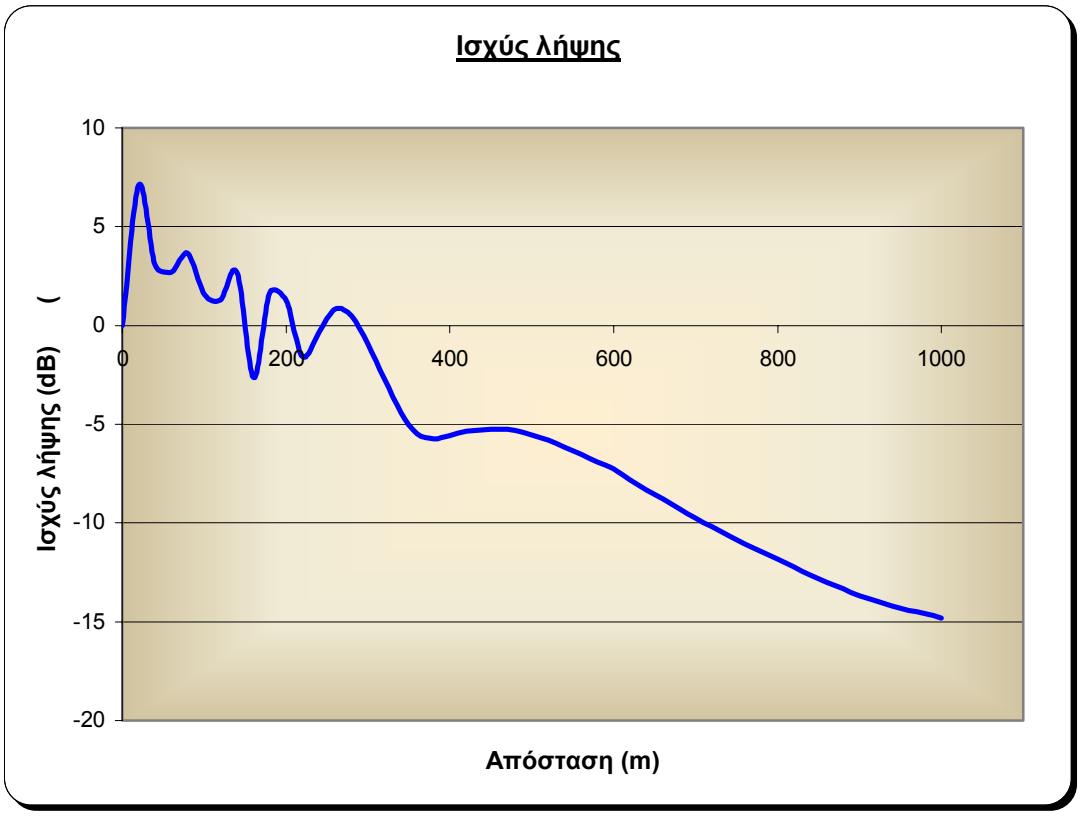
Σημείο παρατήρησης (-1.9,1.4) – Συχνότητα 900MHz



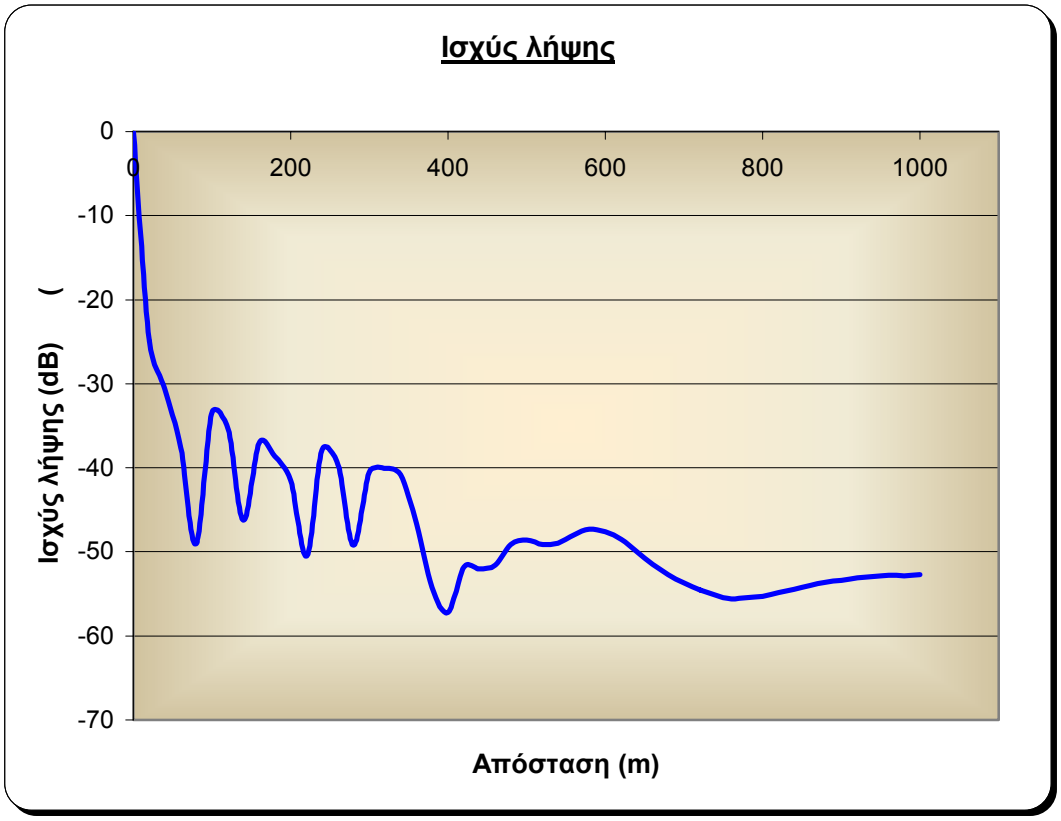
Σημείο παρατήρησης (1.9,0.7) – Συχνότητα 900MHz



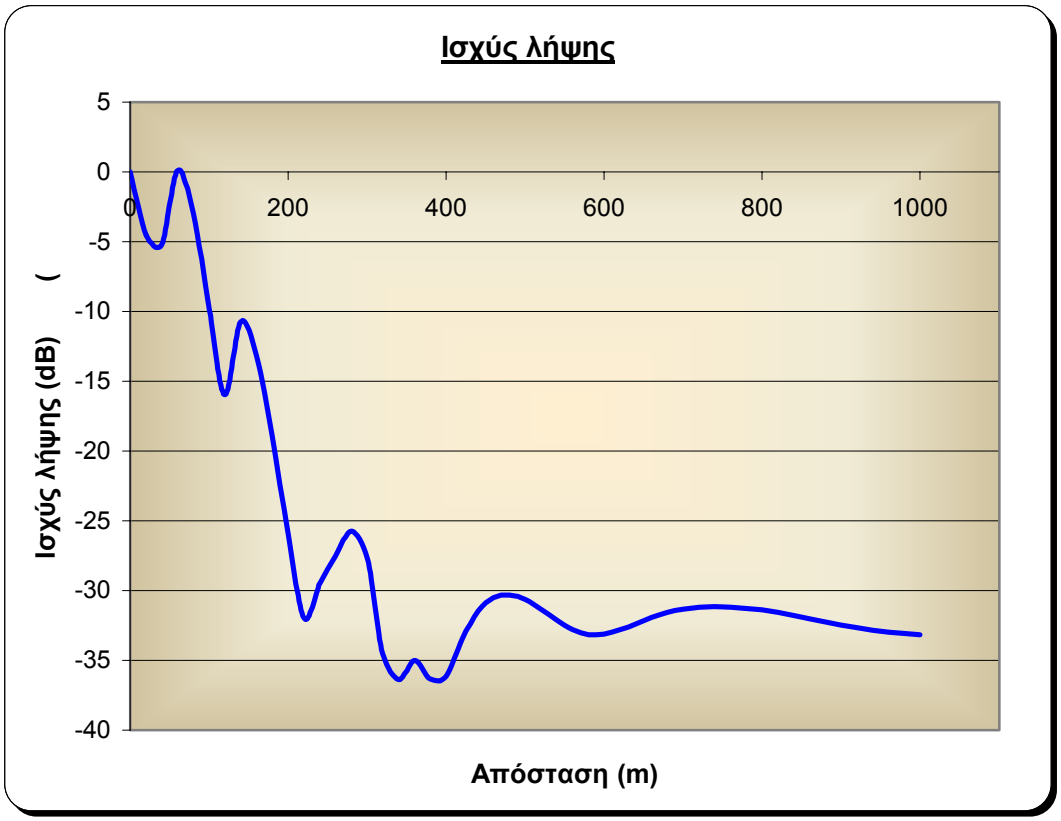
Σημείο παρατήρησης (1.9,1.4) – Συχνότητα 900MHz



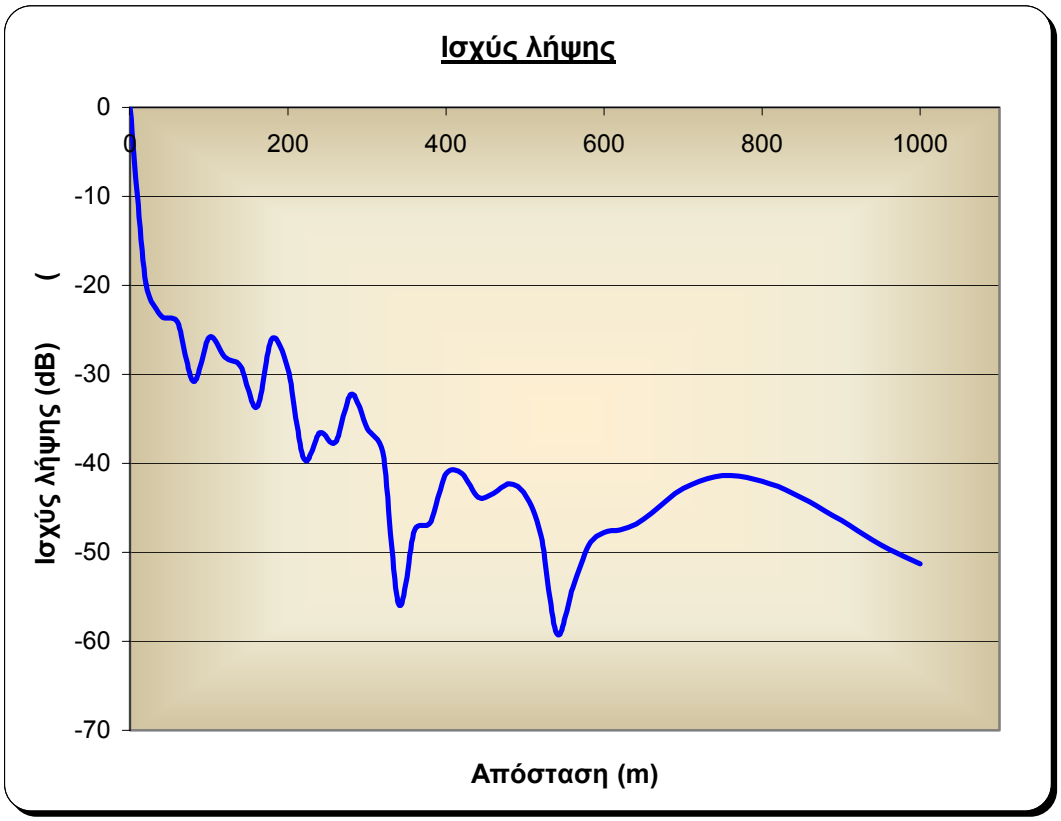
Σημείο παρατήρησης (-3.8,0.5) – Συχνότητα 1800MHz



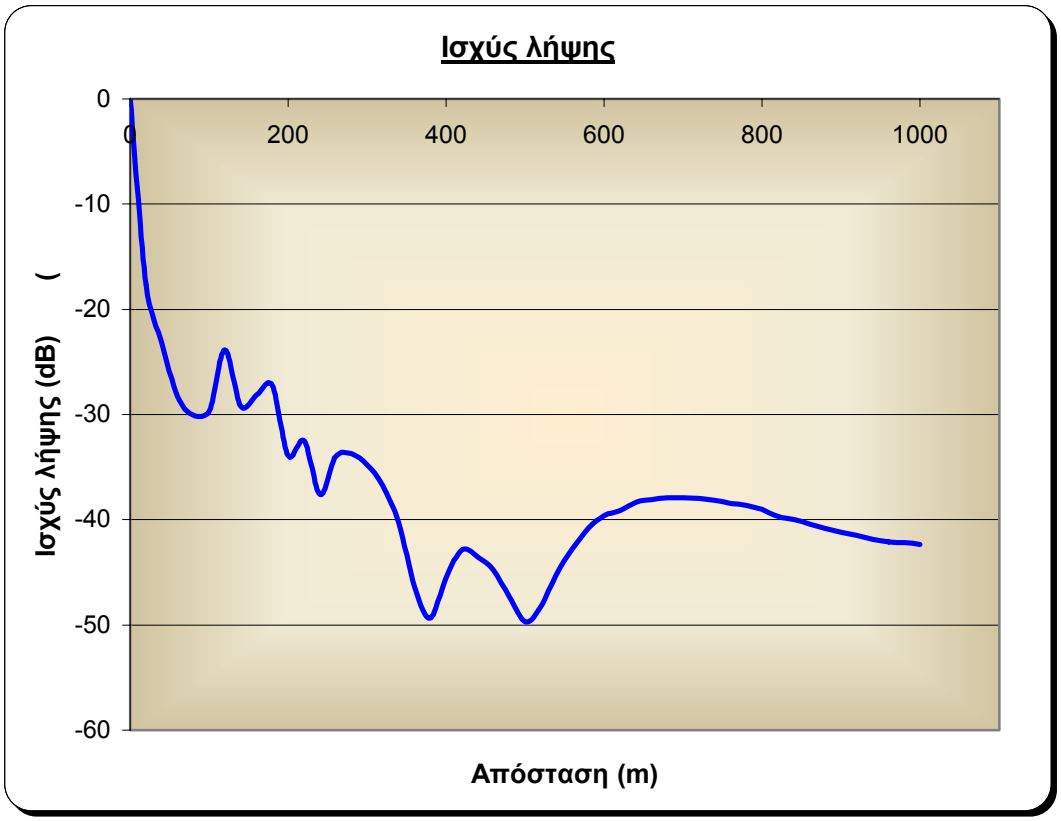
Σημείο παρατήρησης (3.8,0.5) – Συχνότητα 1800MHz



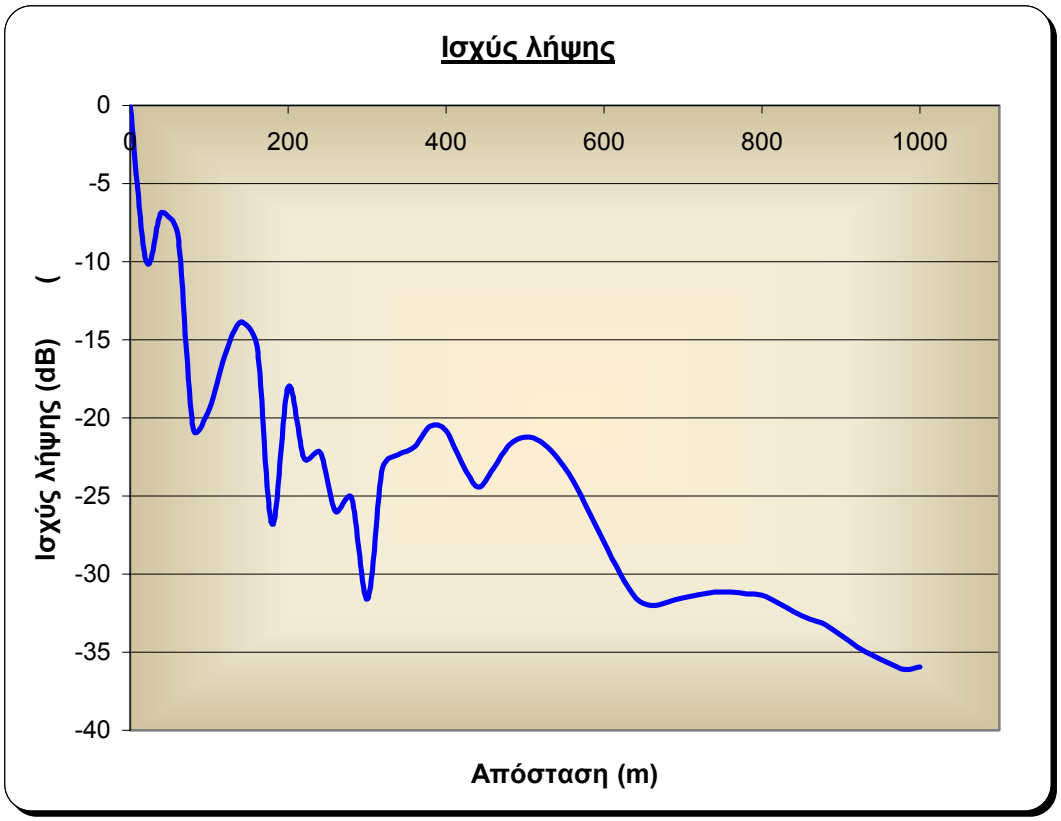
Σημείο παρατήρησης (-1.9,0.7) – Συχνότητα 1800MHz



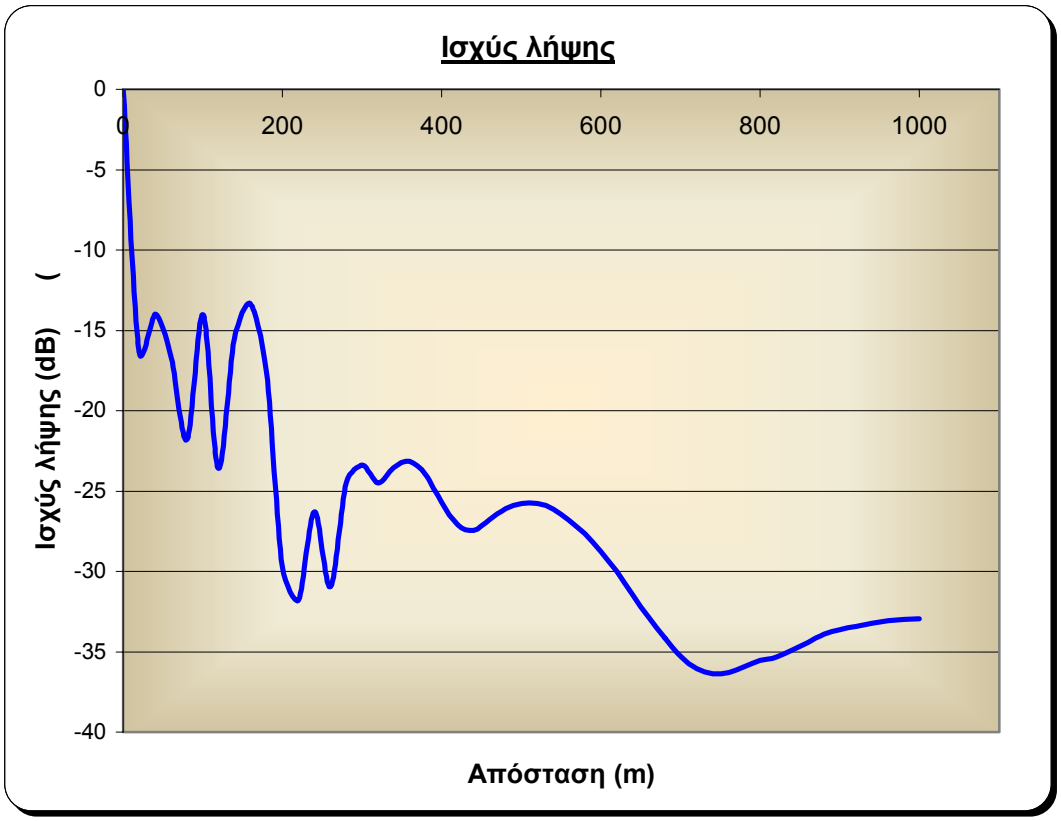
Σημείο παρατήρησης (-1.9,1.4) – Συχνότητα 1800MHz



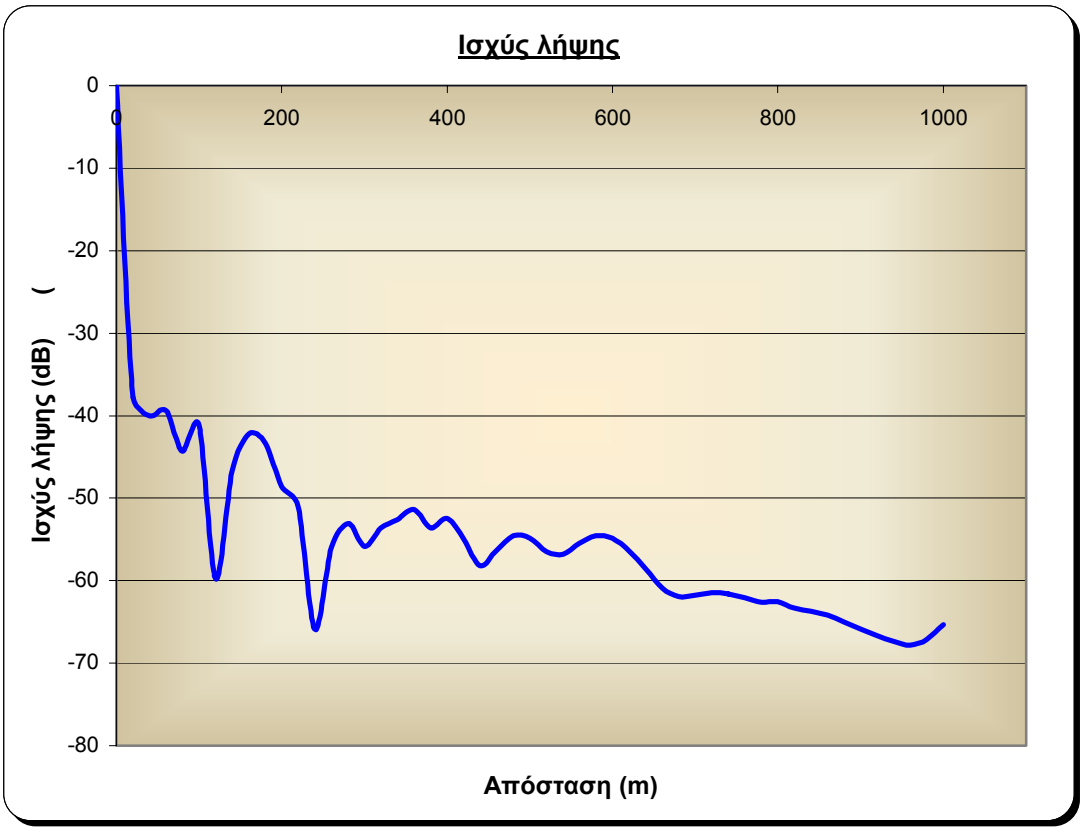
Σημείο παρατήρησης (1.9,0.7) – Συχνότητα 1800MHz



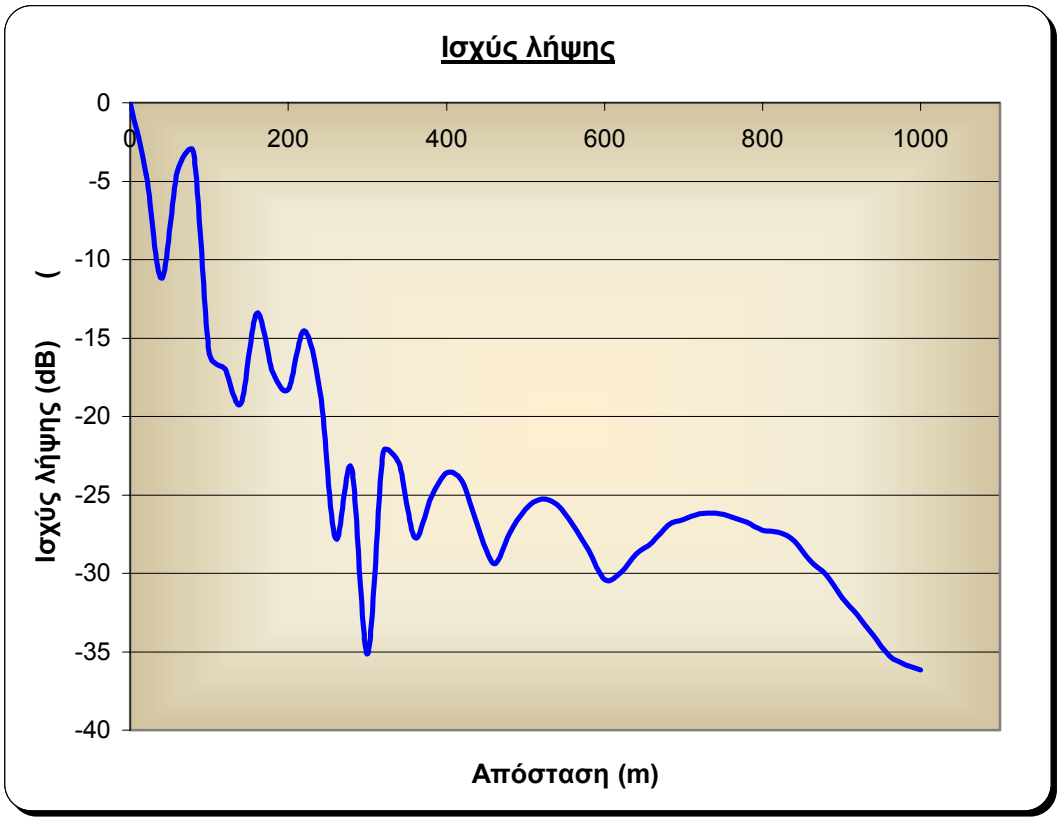
Σημείο παρατήρησης (1.9,1.4) – Συχνότητα 1800MHz



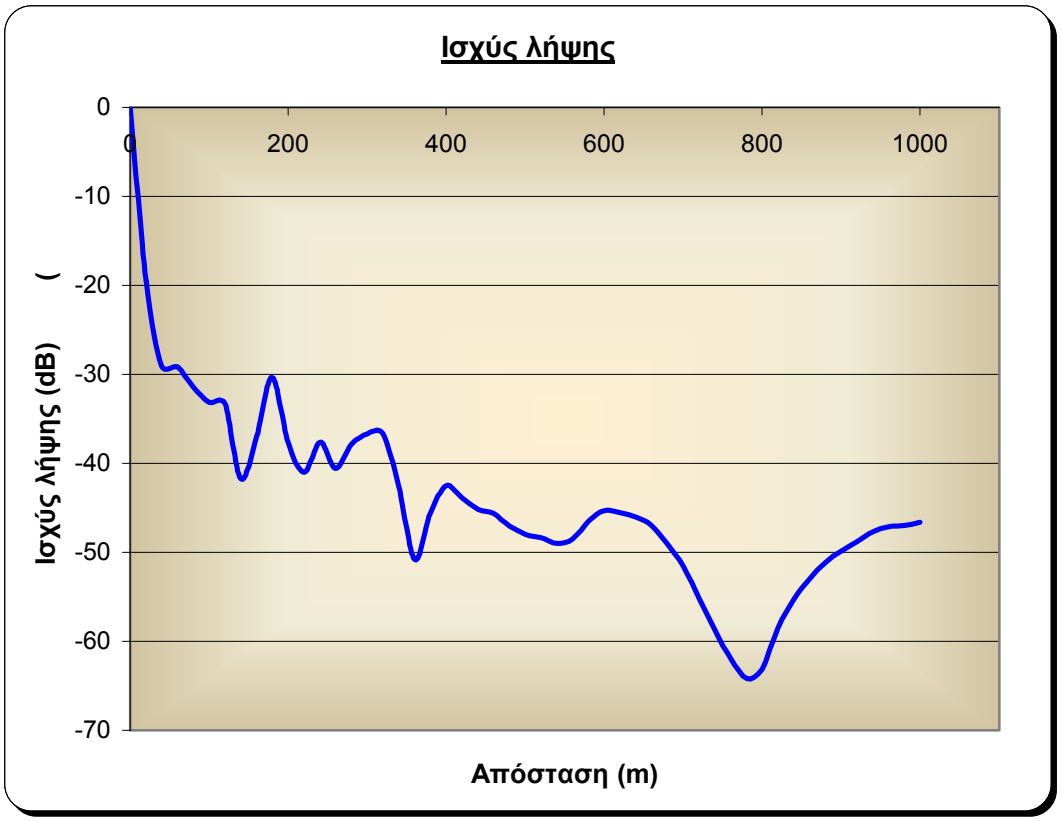
Σημείο παρατήρησης (-3.8,0.5) – Συχνότητα 2100MHz



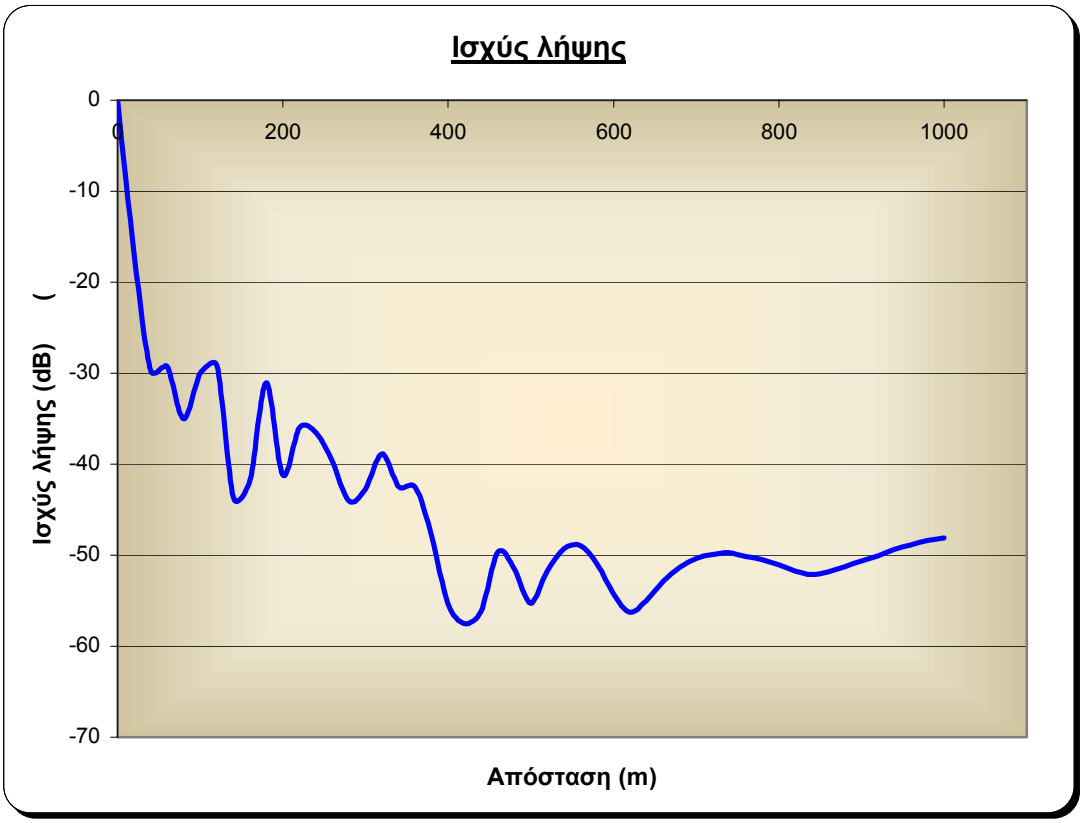
Σημείο παρατήρησης (3.8,0.5) – Συχνότητα 2100MHz



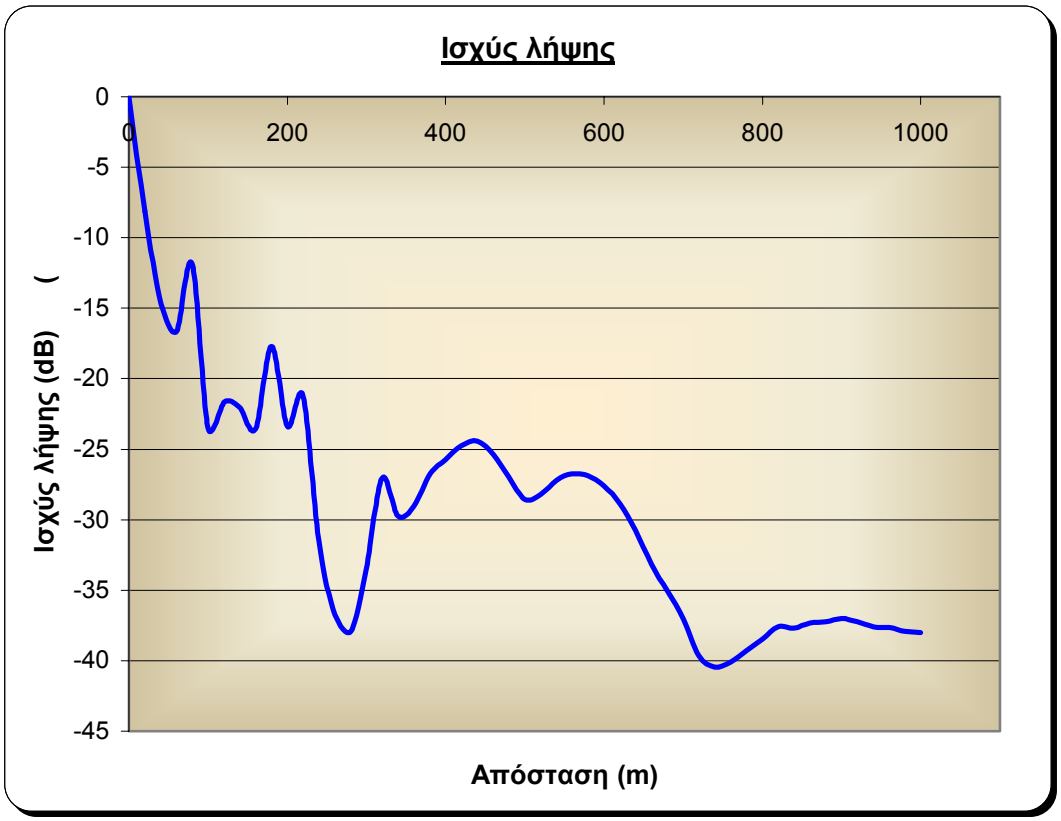
Σημείο παρατήρησης (-1.9,0.7) – Συχνότητα 2100MHz



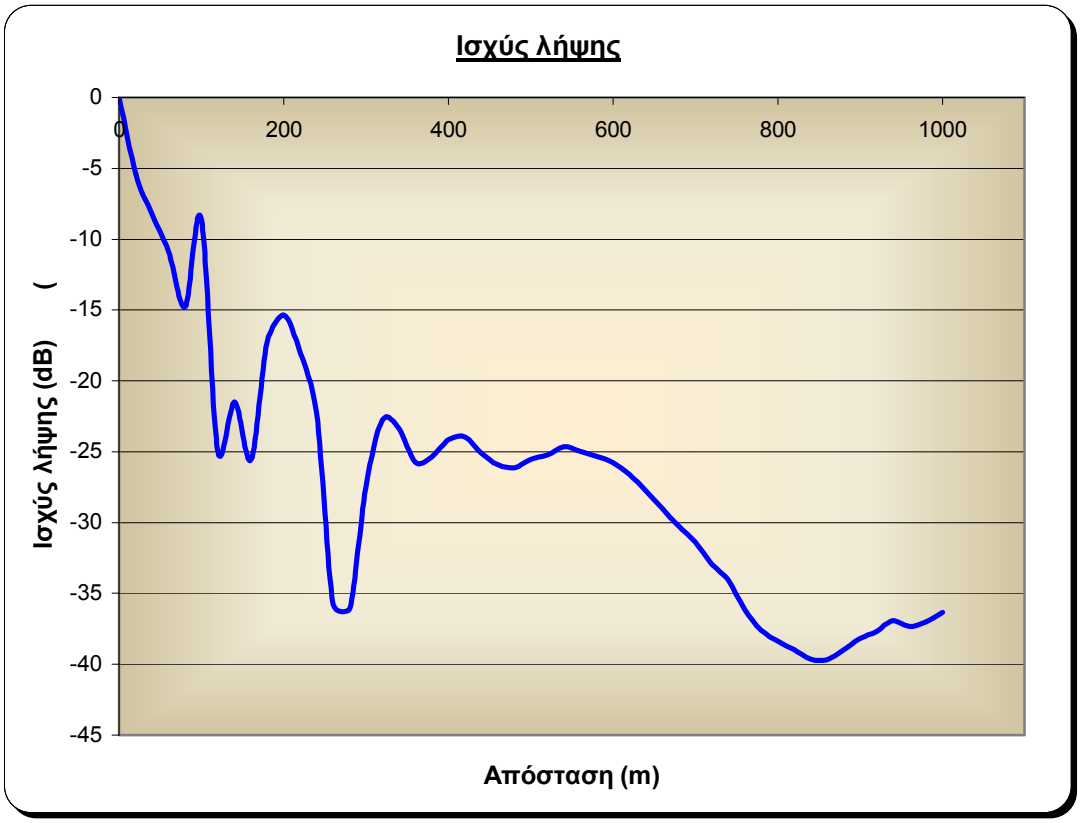
Σημείο παρατήρησης (-1.9,1.4) – Συχνότητα 2100MHz



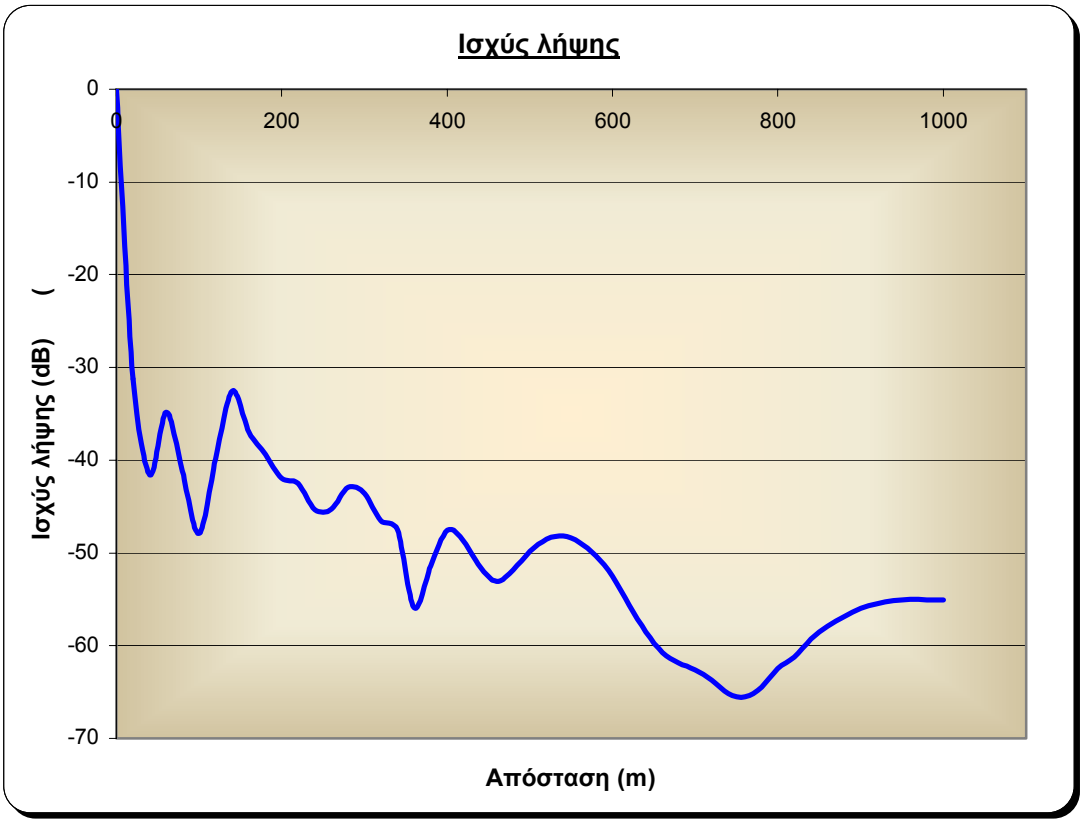
Σημείο παρατήρησης (1.9,0.7) – Συχνότητα 2100MHz



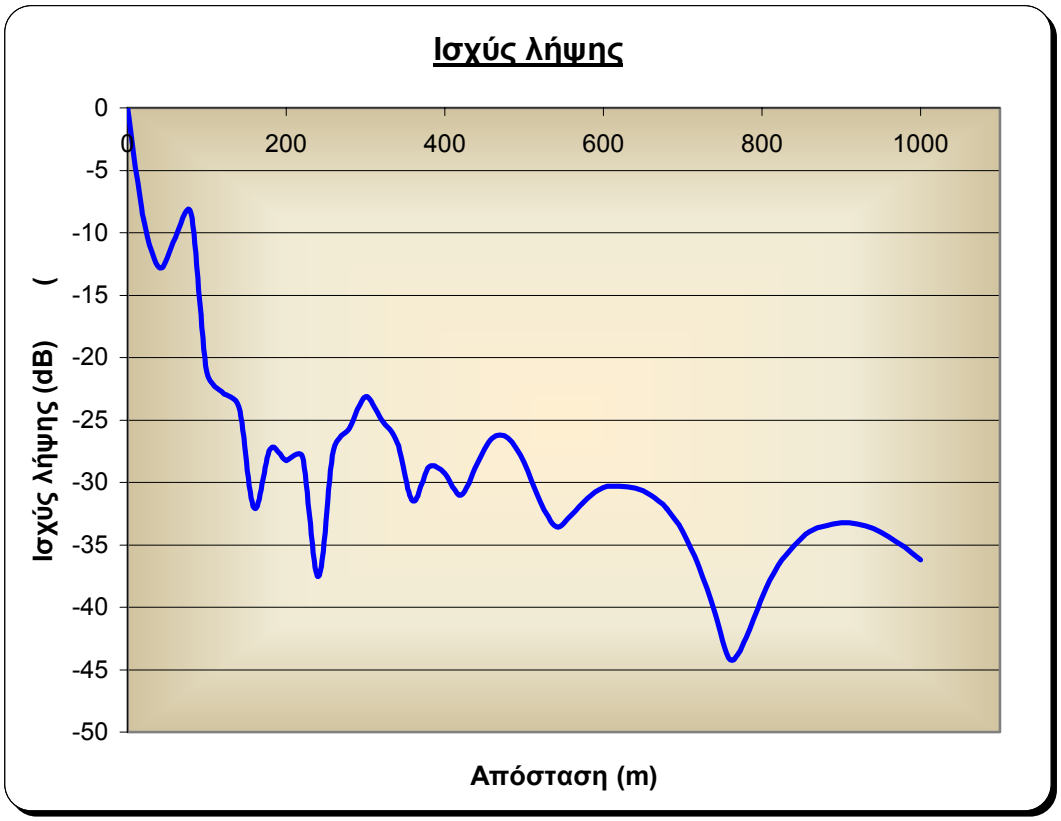
Σημείο παρατήρησης (1.9,1.4) – Συχνότητα 2100MHz



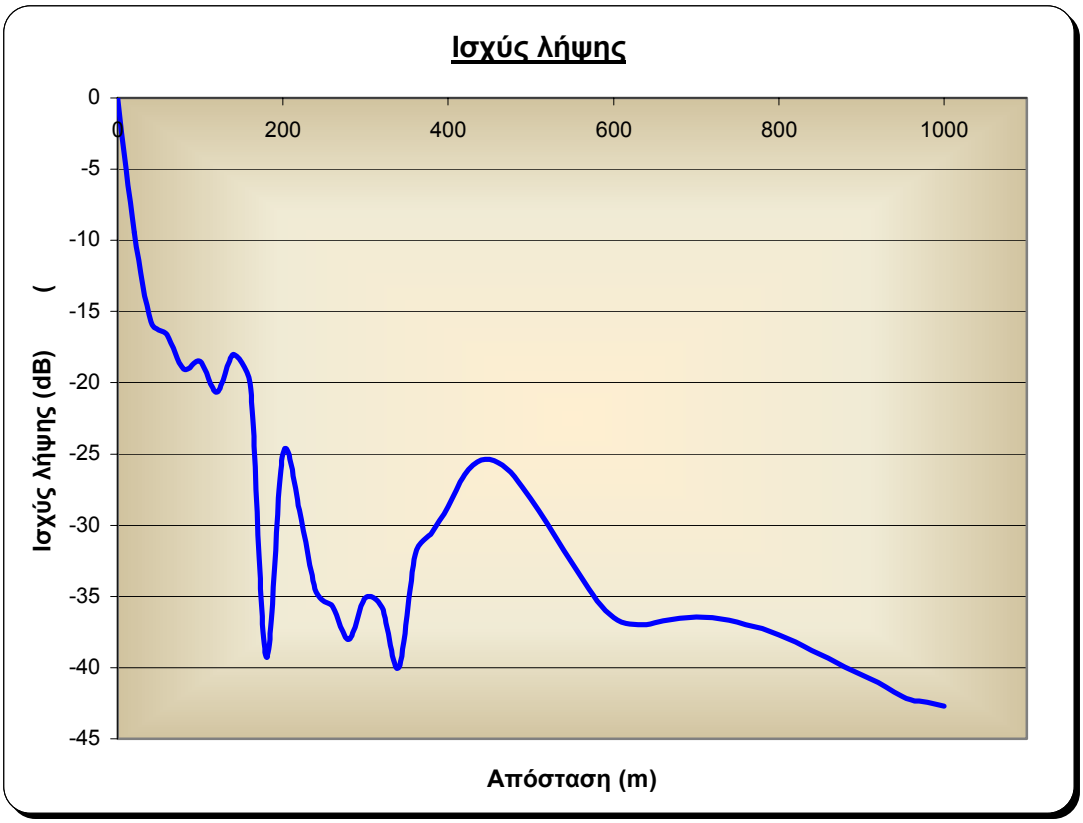
Σημείο παρατήρησης (-3.8,0.5) – Συχνότητα 3500MHz



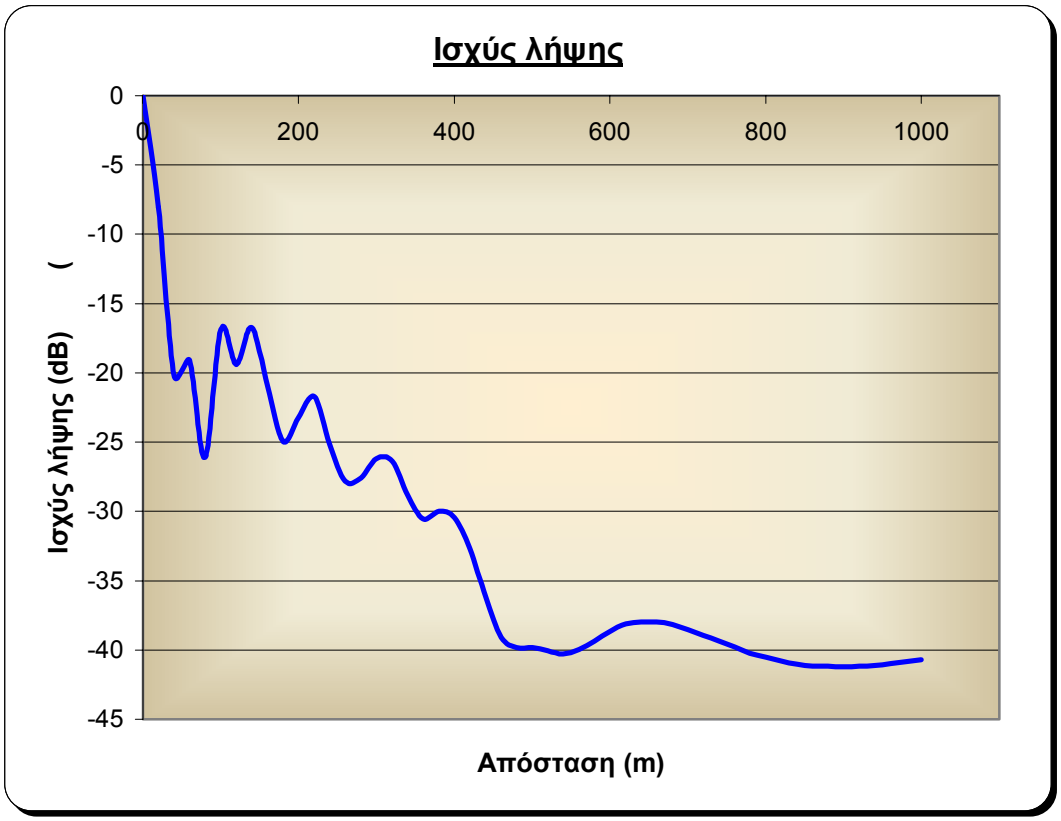
Σημείο παρατήρησης (3.8,0.5) – Συχνότητα 3500MHz



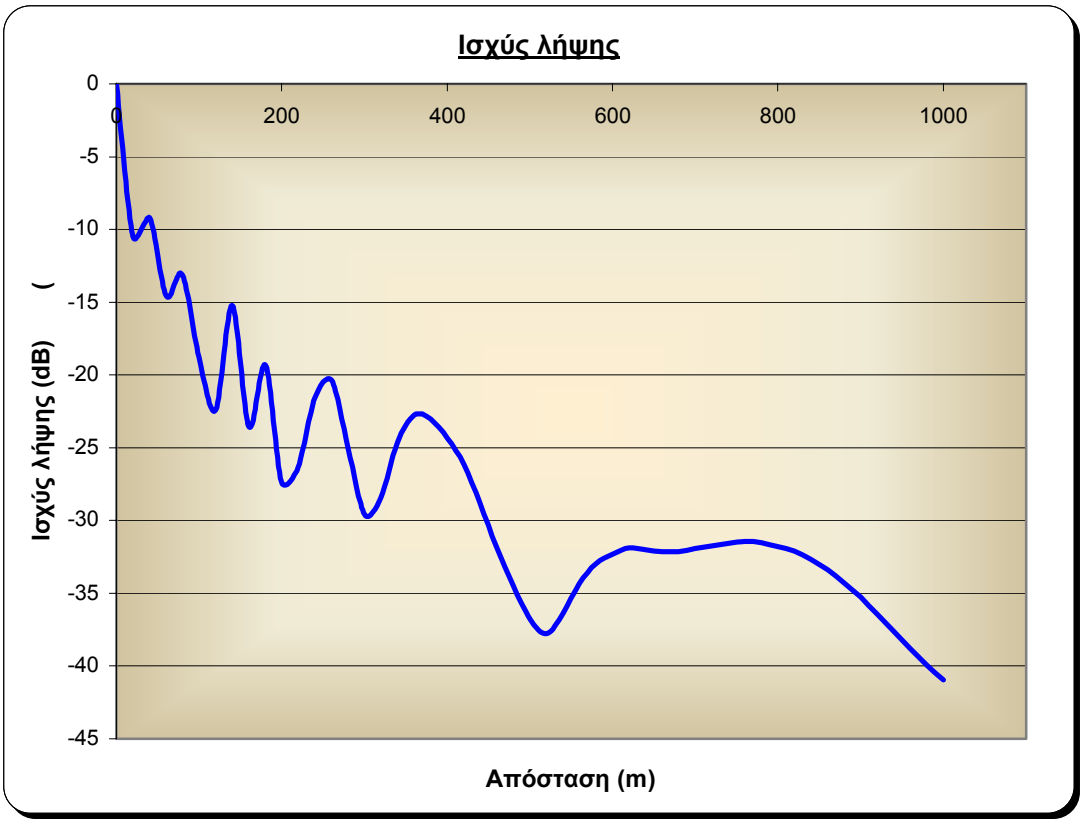
Σημείο παρατήρησης (-1.9,0.7) – Συχνότητα 3500MHz



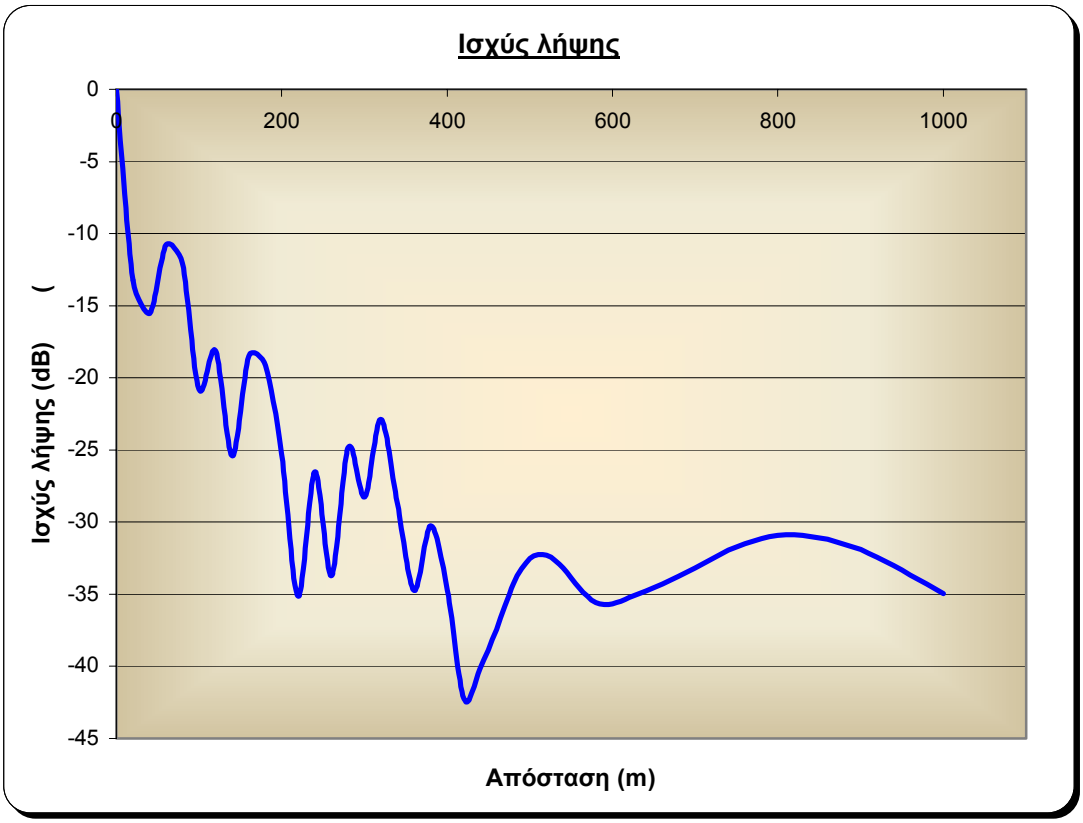
Σημείο παρατήρησης (-1.9,1.4) – Συχνότητα 3500MHz



Σημείο παρατήρησης (1.9,0.7) – Συχνότητα 3500MHz

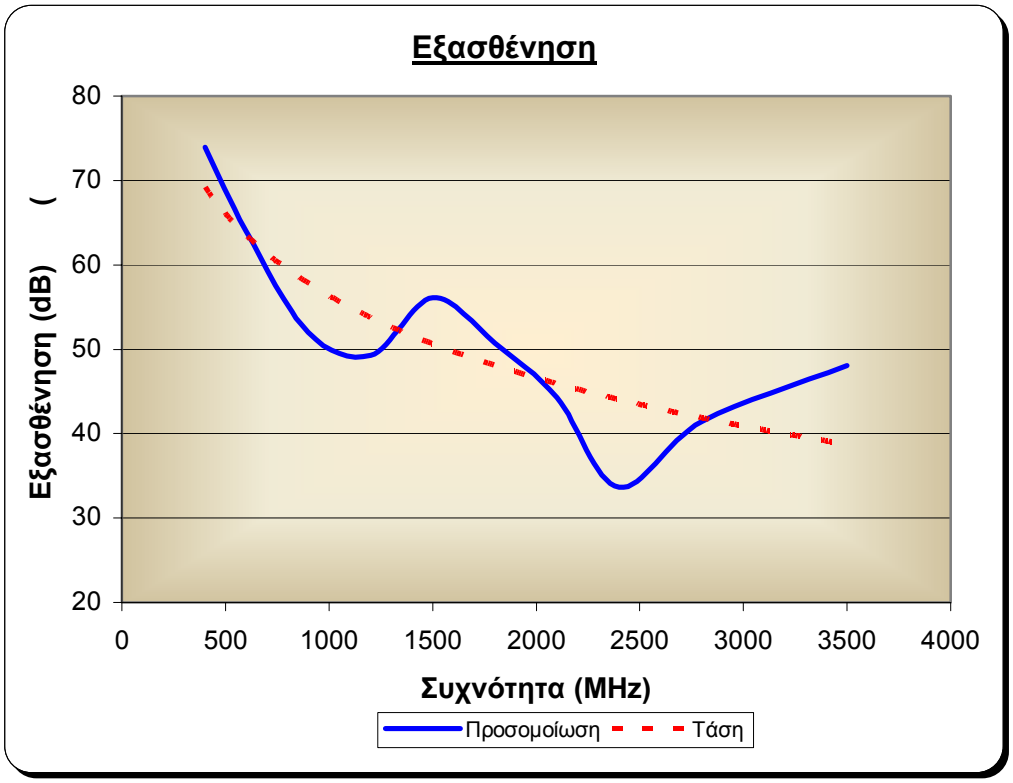


Σημείο παρατήρησης (1.9,1.4) – Συχνότητα 3500MHz

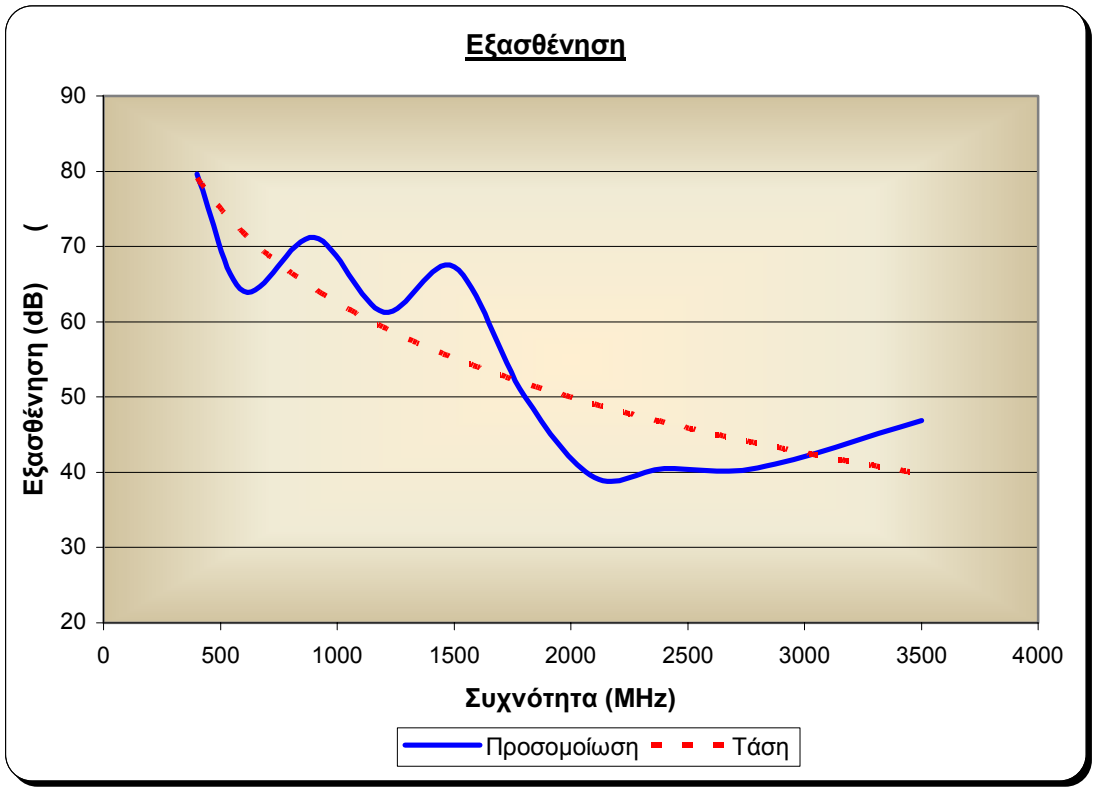


Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα της εξασθένησης συναρτήσει της συχνότητας προσομοίωσης για κάθε σημείο παρατήρησης και για τρεις περιπτώσεις απόστασης από την κεραία εκπομπής, 100m 300m και 500m. Με συνεχή γραμμή διακρίνεται η γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης ενώ με διαφορετικό χρώμα και διακεκομμένη γραμμή διακρίνεται η γραμμή τάσης των μετρήσεων που ομαλοποιεί τα fluctuations που φυσιολογικά εμφανίζονται εξαιτίας της τυχαιότητας της προσομοίωσης και μας βοηθά να συγκρίνουμε τα πειραματικά αποτελέσματα με τα διαγράμματα των θεωρητικών μοντέλων που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

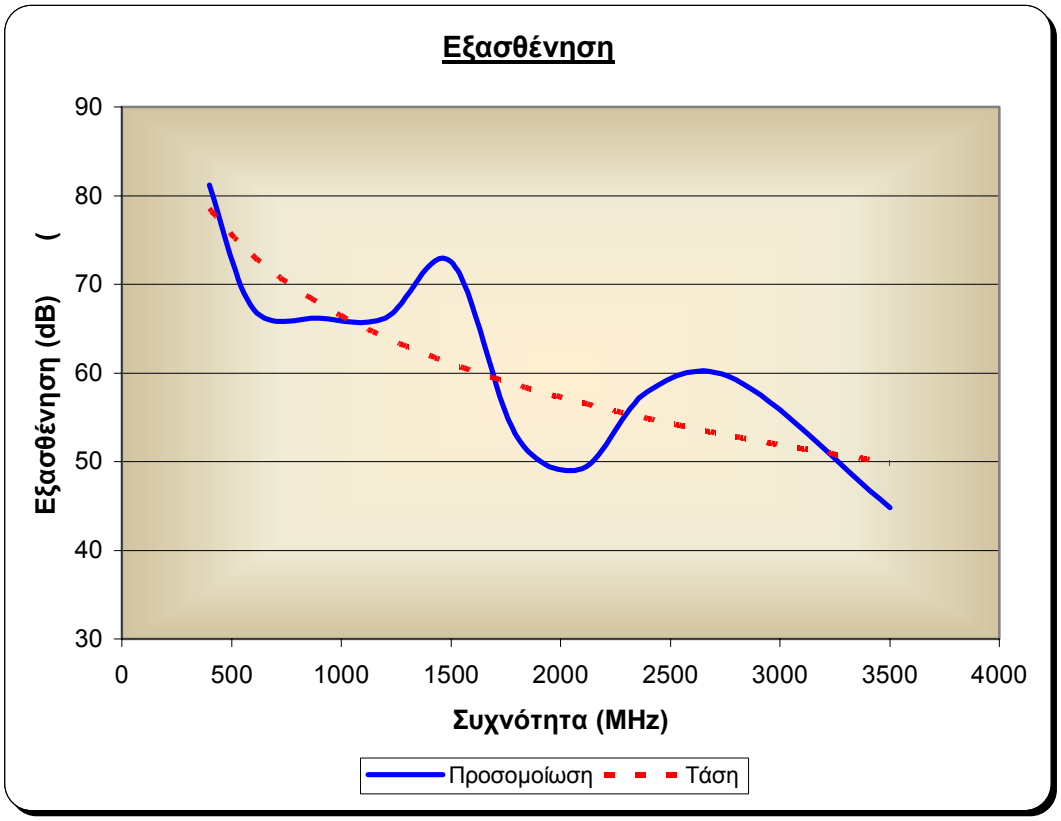
Σημείο παρατήρησης (-3.8,0.5) – Απόσταση 100m



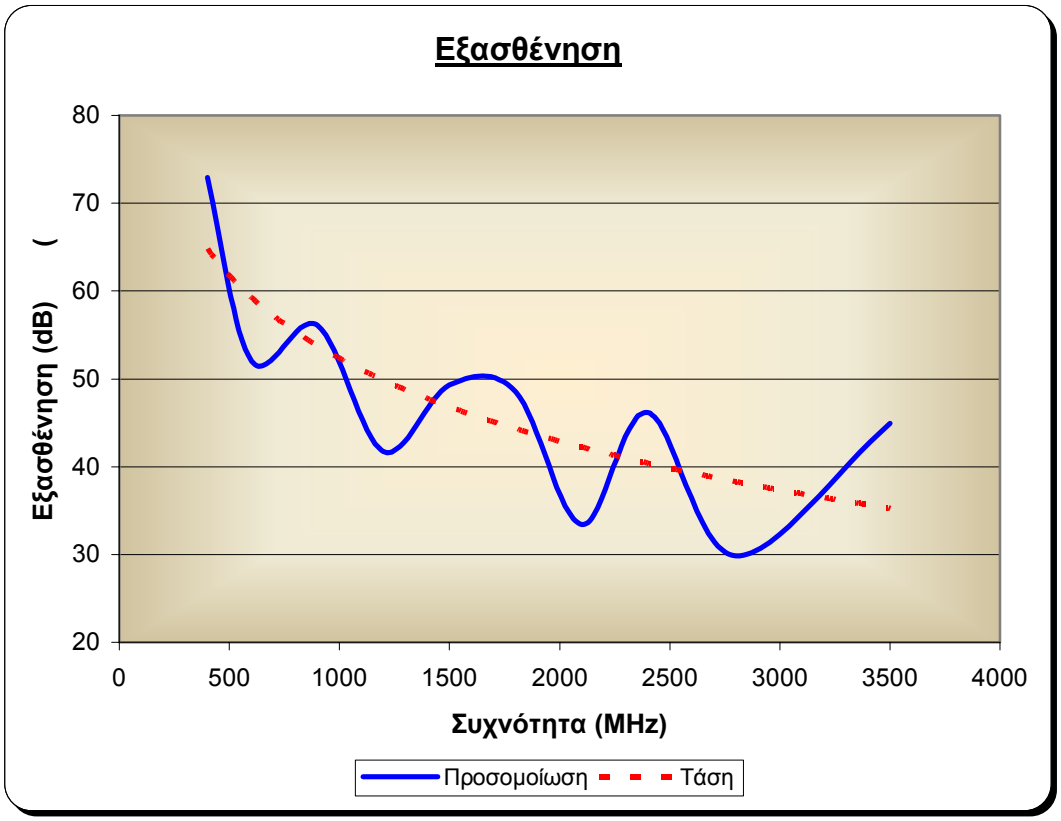
Σημείο παρατήρησης (-3.8,0.5) – Απόσταση 300m



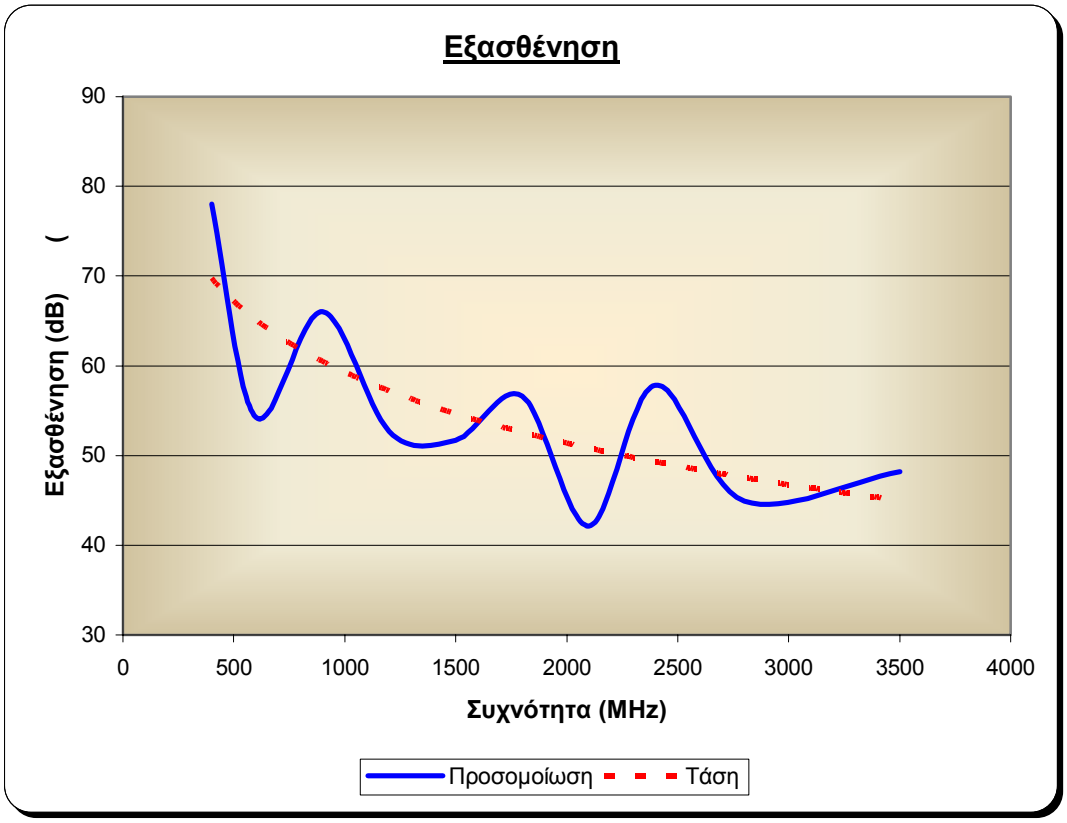
Σημείο παρατήρησης (-3.8,0.5) – Απόσταση 500m



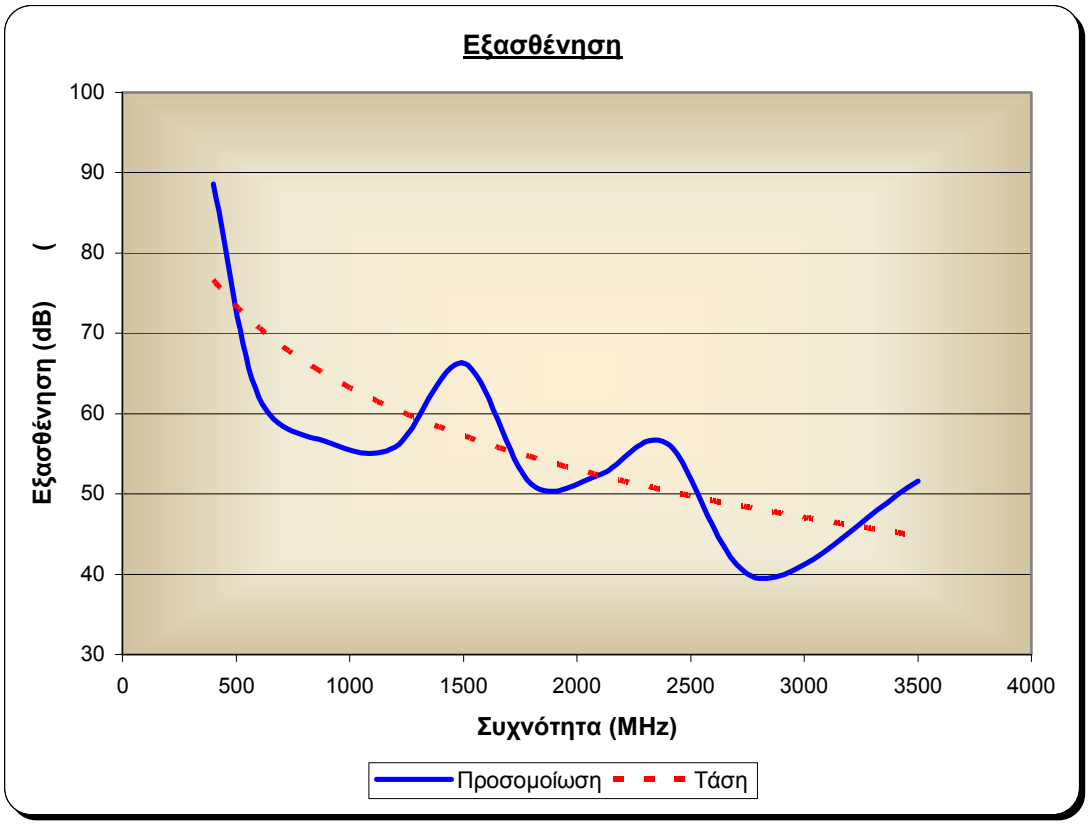
Σημείο παρατήρησης (3.8,0.5) – Απόσταση 100m



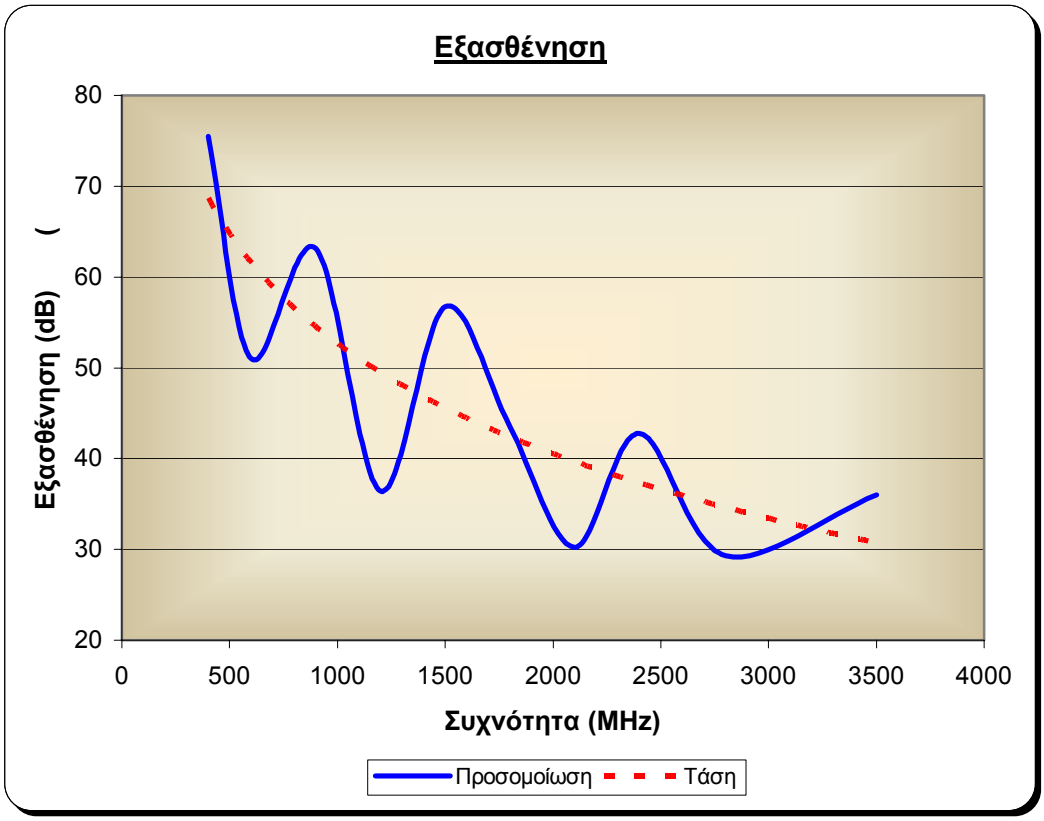
Σημείο παρατήρησης (3.8,0.5) – Απόσταση 300m



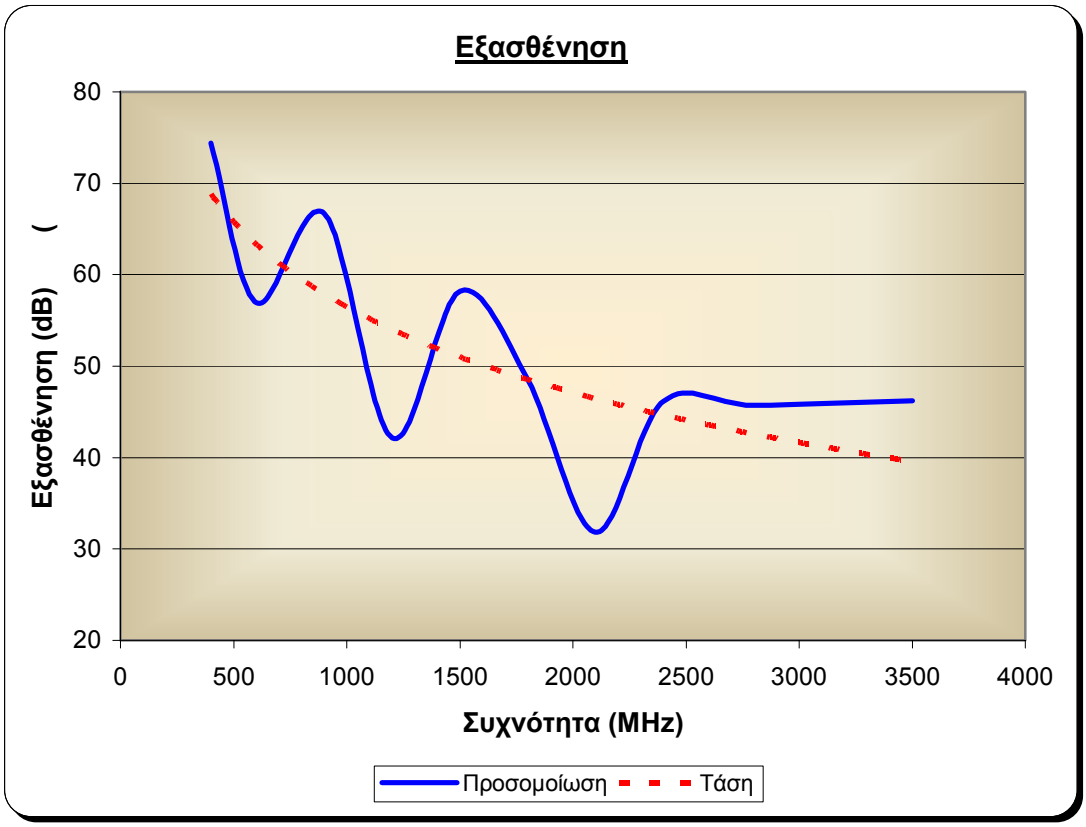
Σημείο παρατήρησης (3.8,0.5) – Απόσταση 500m



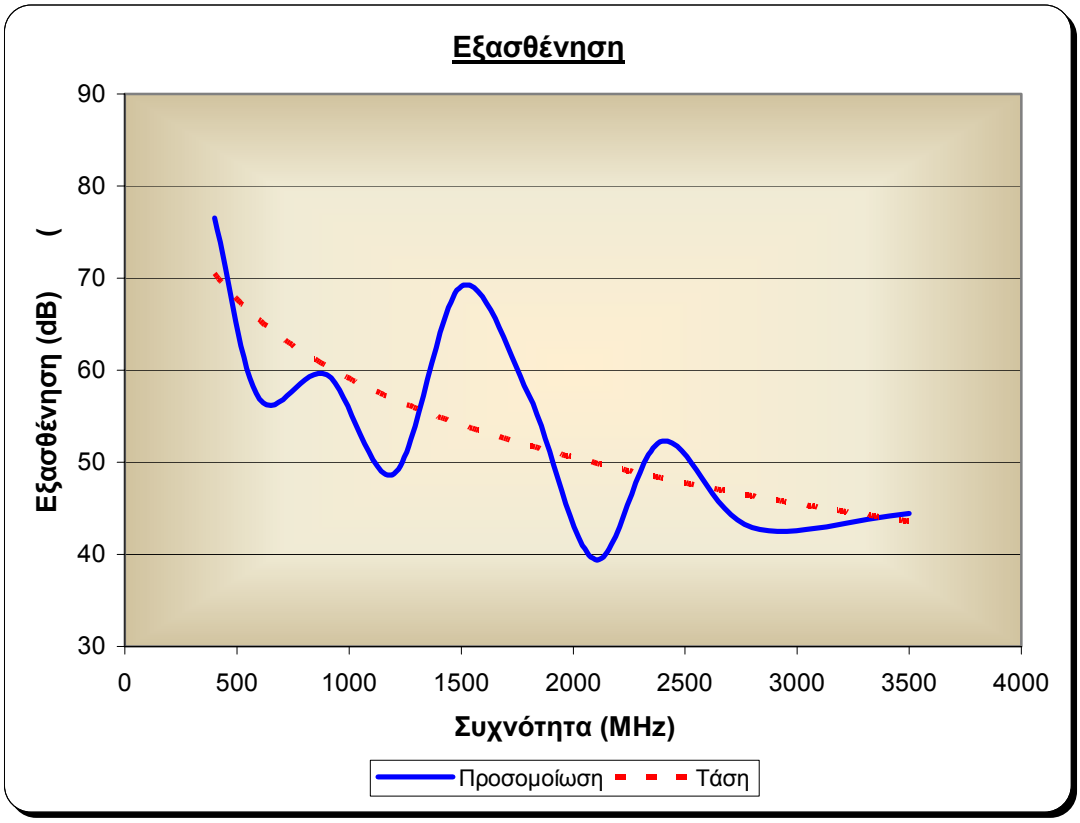
Σημείο παρατήρησης (-1.9,0.7) – Απόσταση 100m



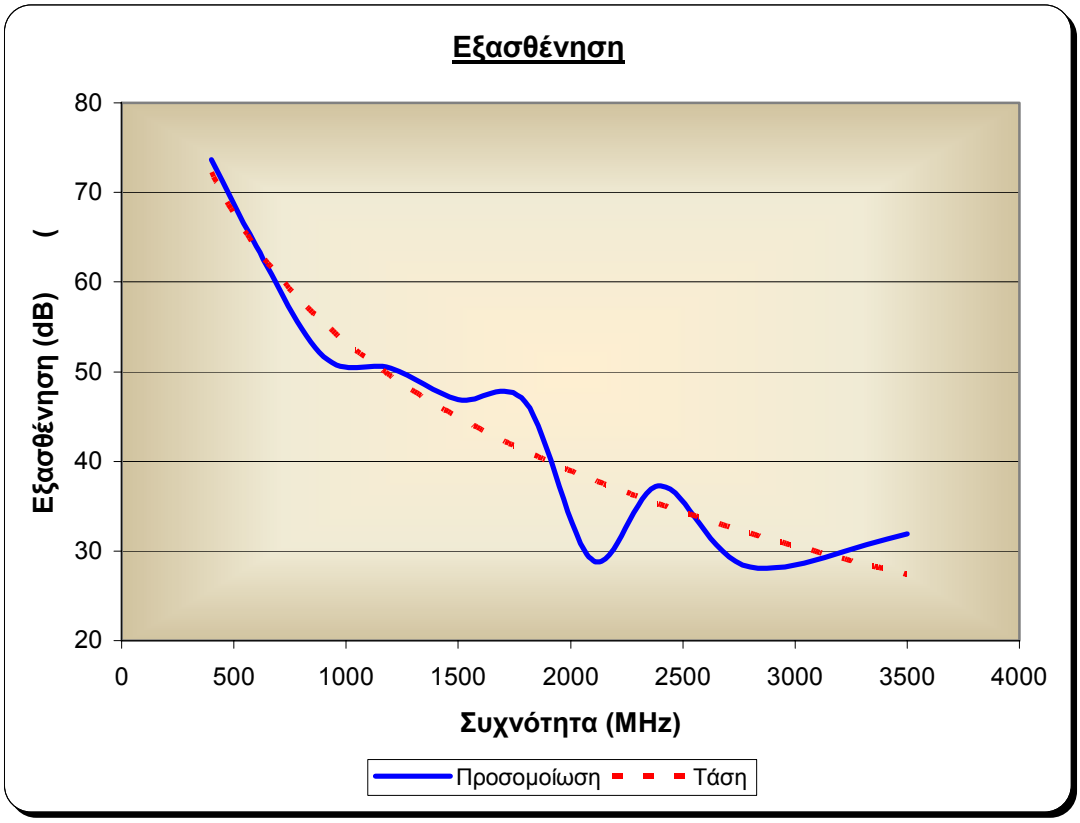
Σημείο παρατήρησης (-1.9,0.7) – Απόσταση 300m



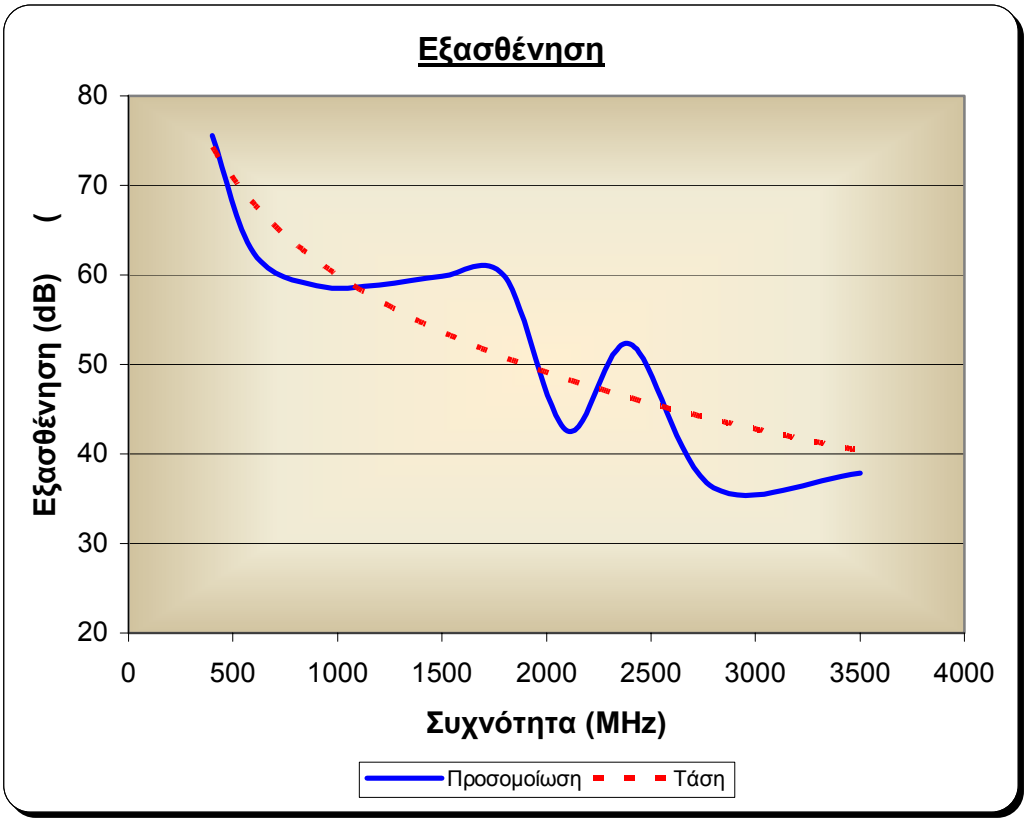
Σημείο παρατήρησης (-1.9,0.7) – Απόσταση 500m



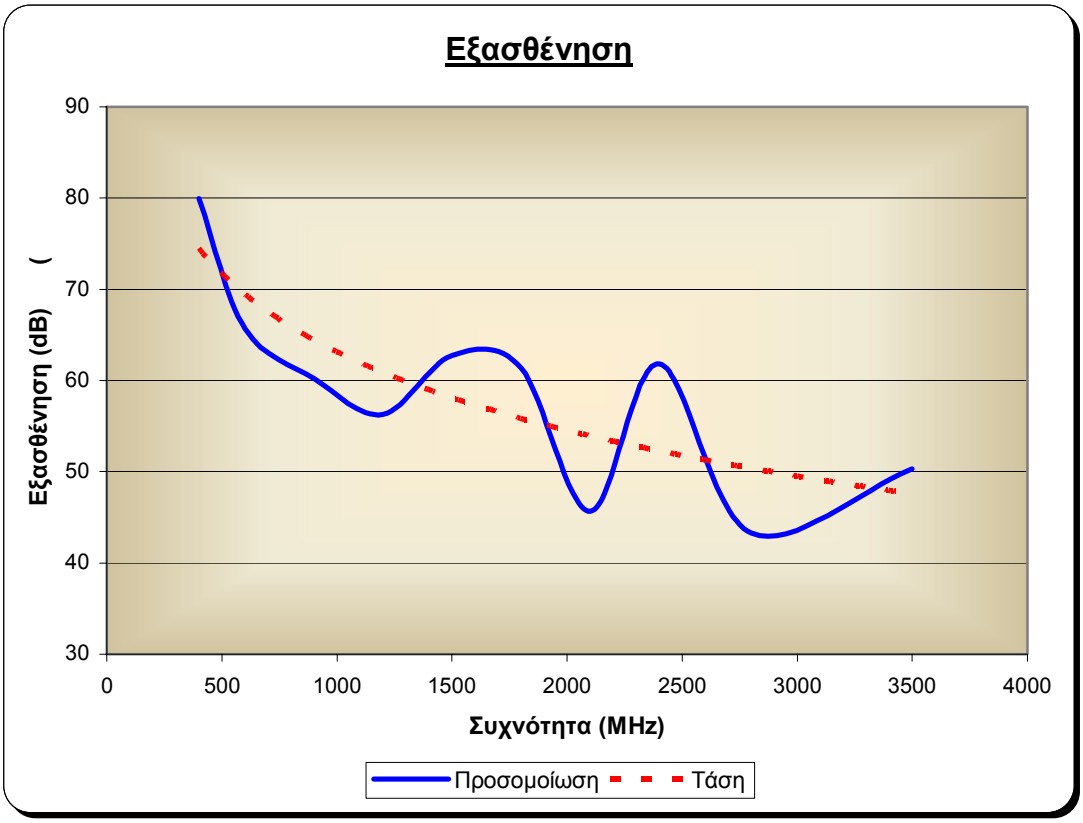
Σημείο παρατήρησης (-1.9,1.4) – Απόσταση 100m



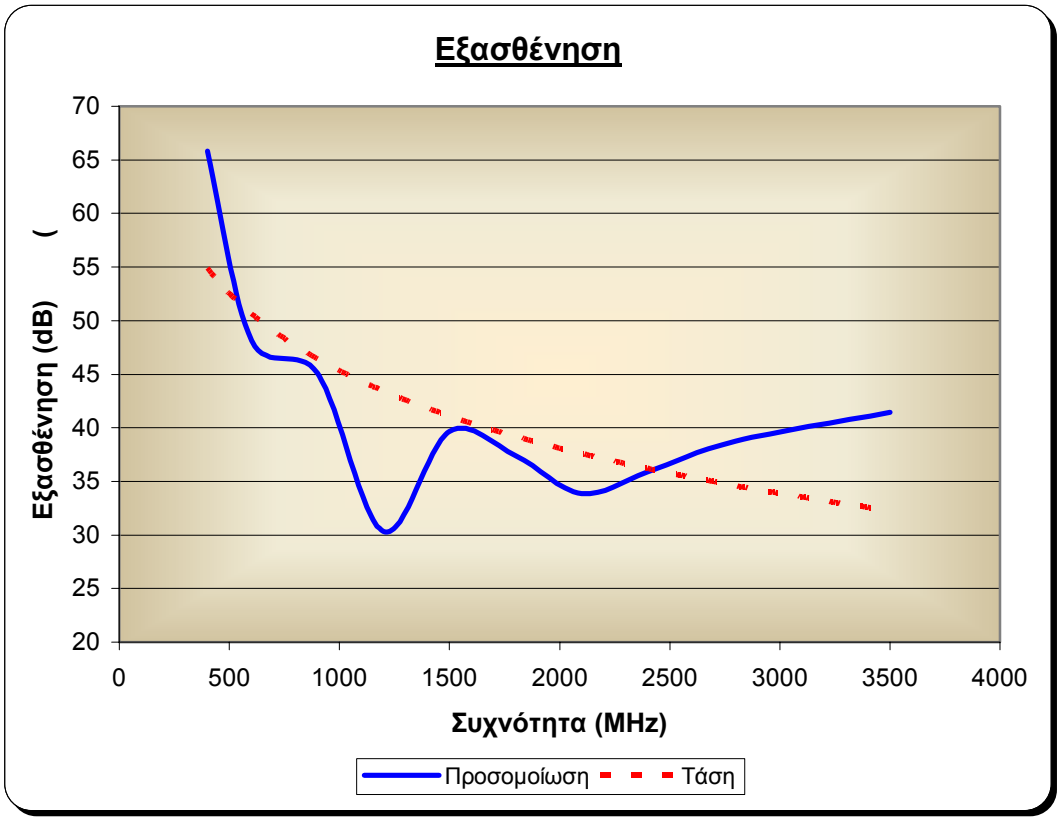
Σημείο παρατήρησης (-1.9,1.4) – Απόσταση 300m



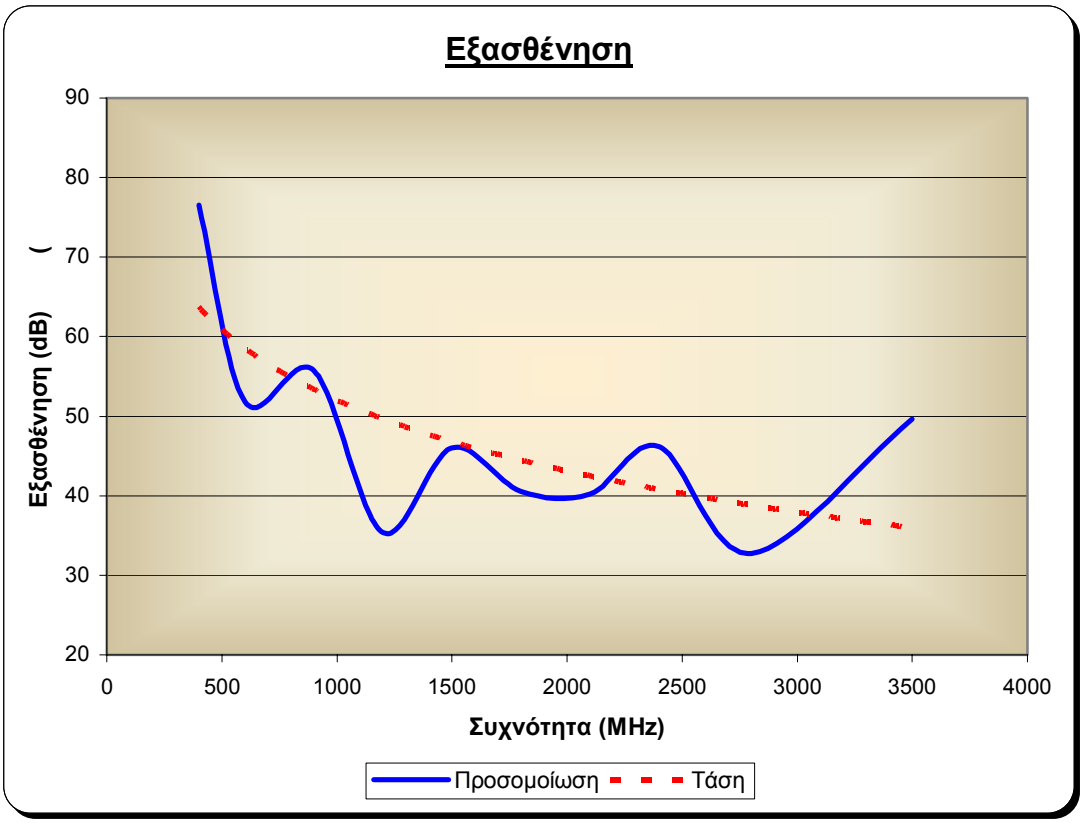
Σημείο παρατήρησης (-1.9,1.4) – Απόσταση 500m



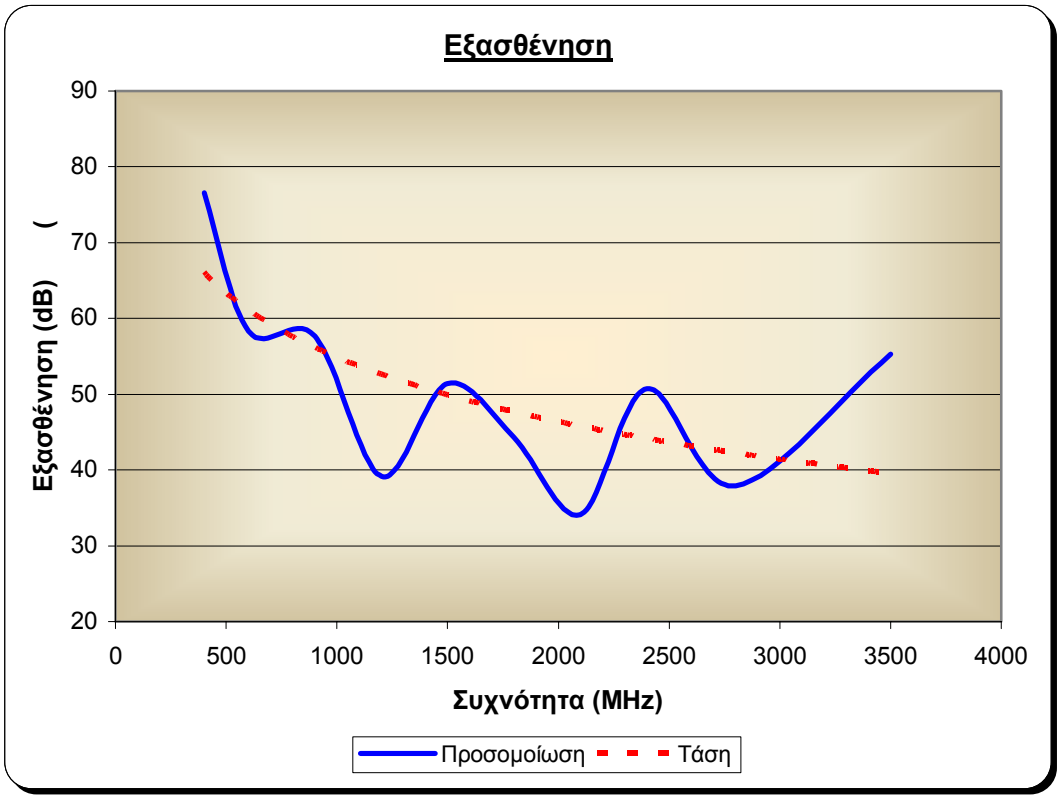
Σημείο παρατήρησης (1.9,0.7) – Απόσταση 100m



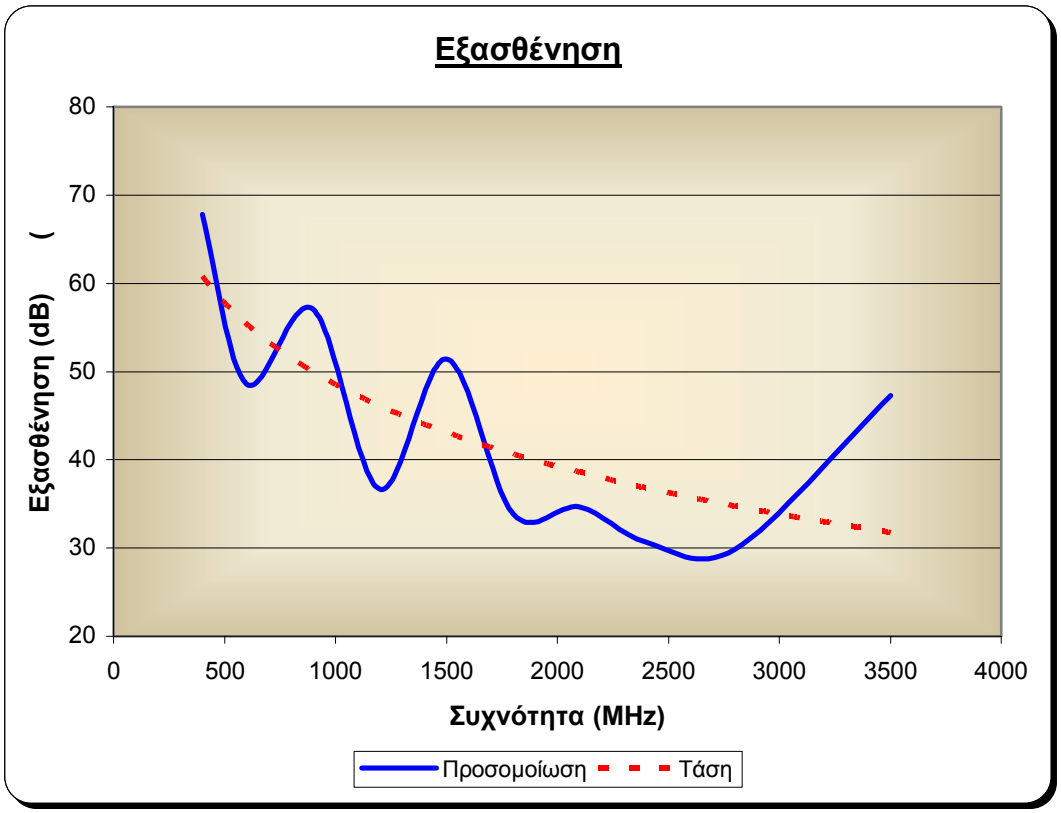
Σημείο παρατήρησης (1.9,0.7) – Απόσταση 300m



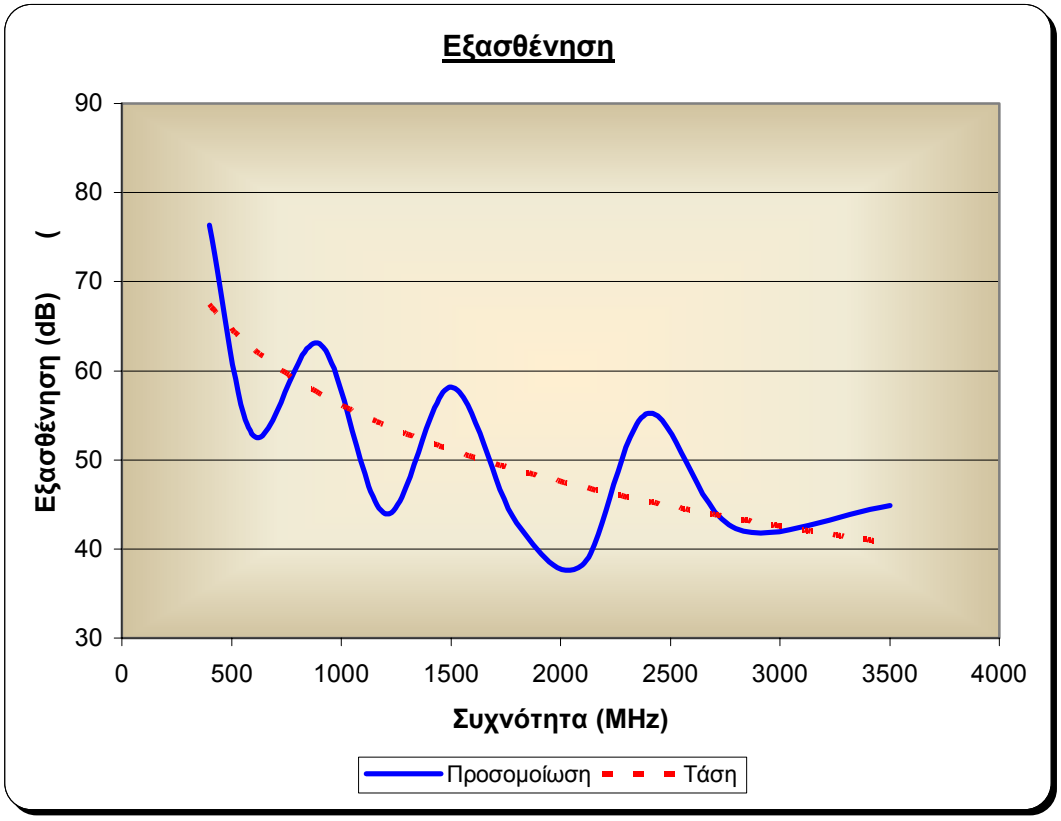
Σημείο παρατήρησης (1.9,0.7) – Απόσταση 500m



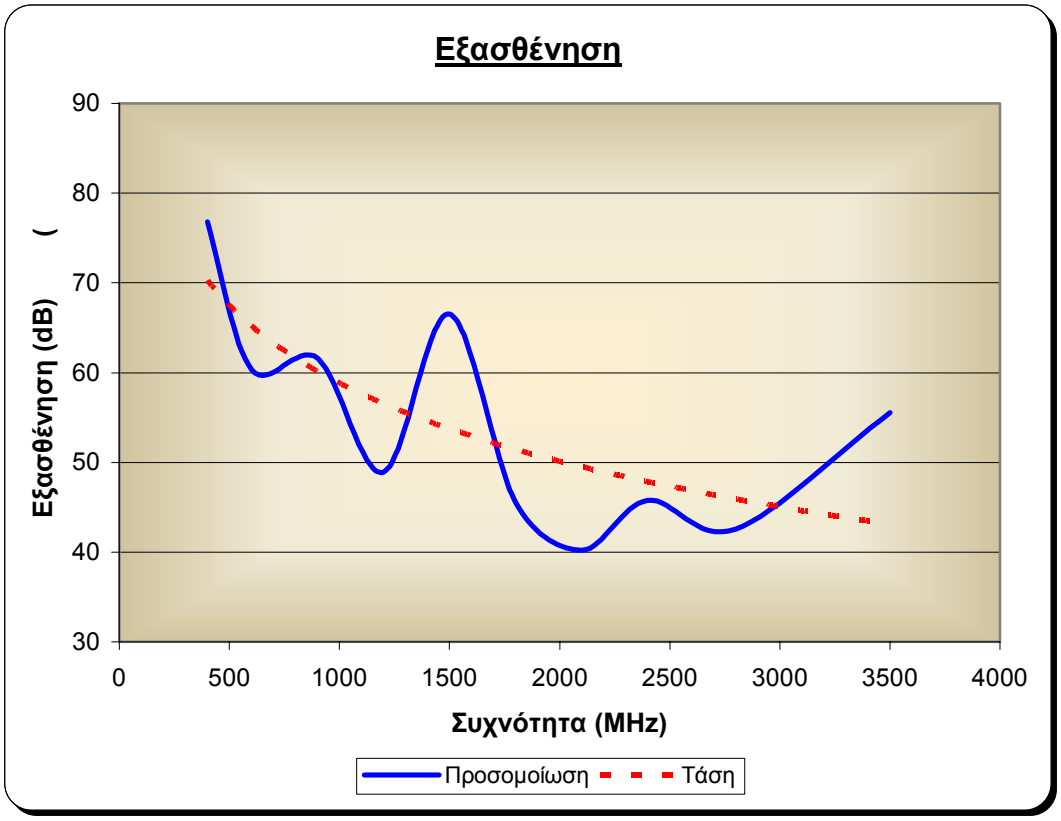
Σημείο παρατήρησης (1.9,1.4) – Απόσταση 100m



Σημείο παρατήρησης (1.9,1.4) – Απόσταση 300m

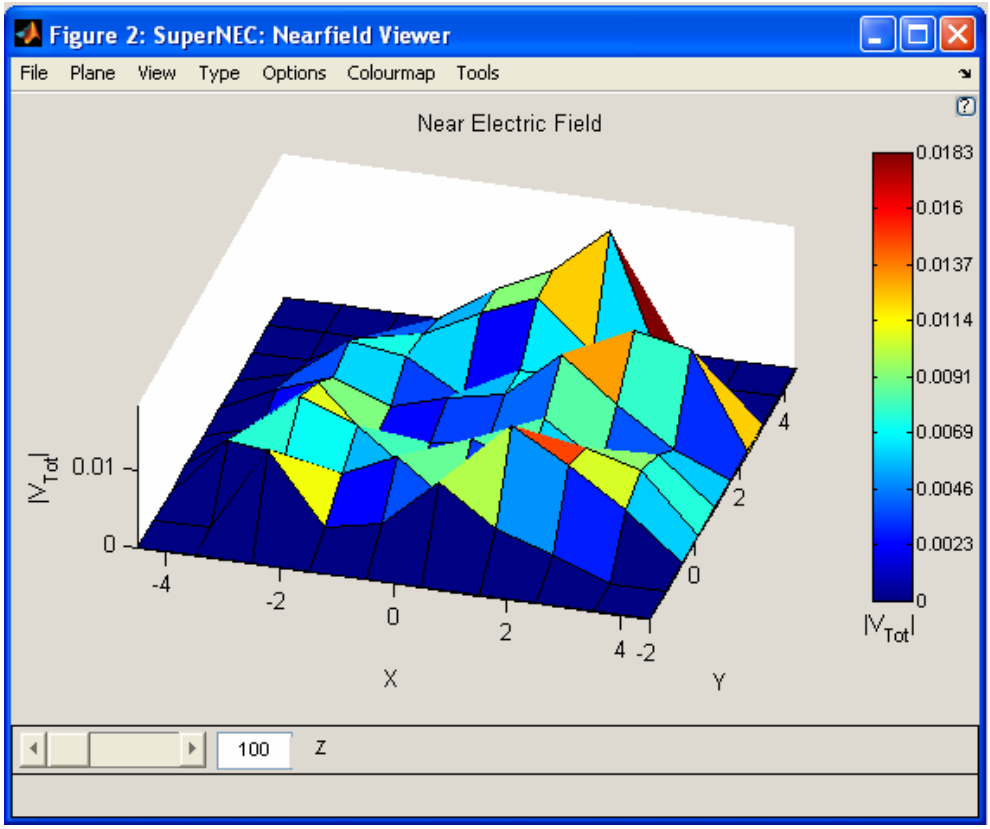


Σημείο παρατήρησης (1.9,1.4) – Απόσταση 500m

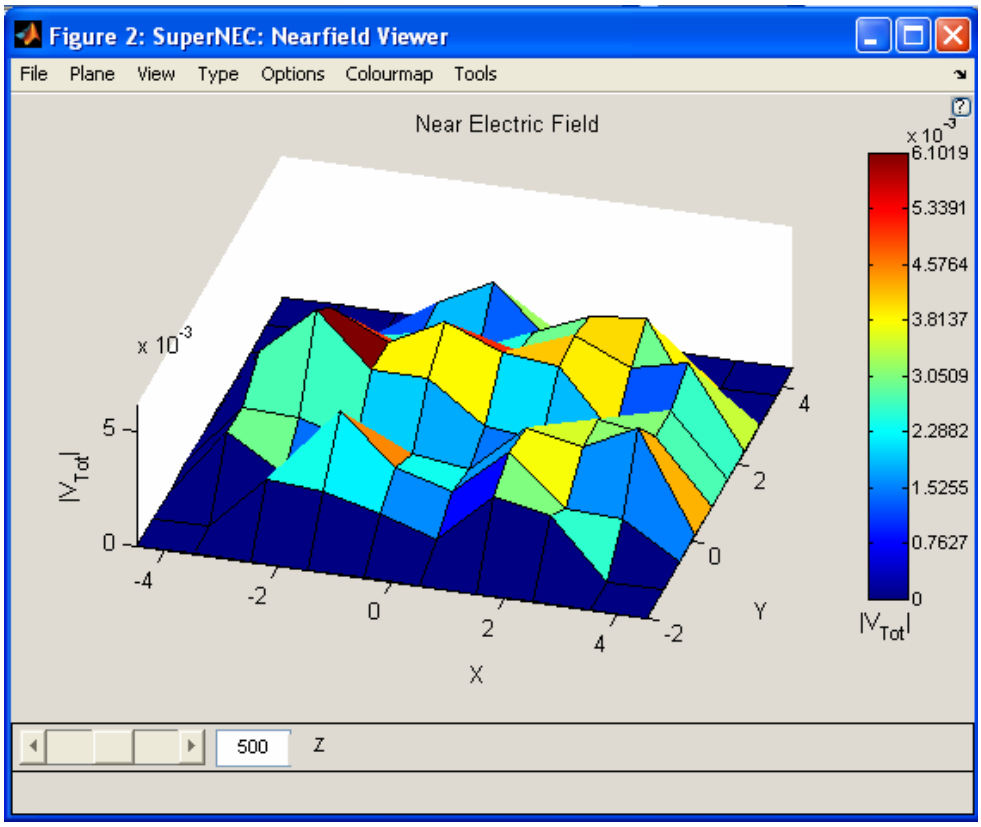


Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα ισχύος σε ολόκληρη τη διατομή του τούνελ για τις 5 υπό μελέτη συχνότητες και για τρεις περιπτώσεις απόστασης από την κεραία εκπομπής, 100m 500m και 900m. Σε αυτήν την περίπτωση δε θα παρουσιαστεί απλά η τιμή της ισχύος σε ένα συγκεκριμένο σημείο της διατομής, αλλά η κατανομή της ισχύος σε όλη τη διατομή της σήραγγας ώστε να είναι πλέον παραστατική και έκδηλη η συμπεριφορά των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων καθώς διαδίδονται σε ένα τούνελ.

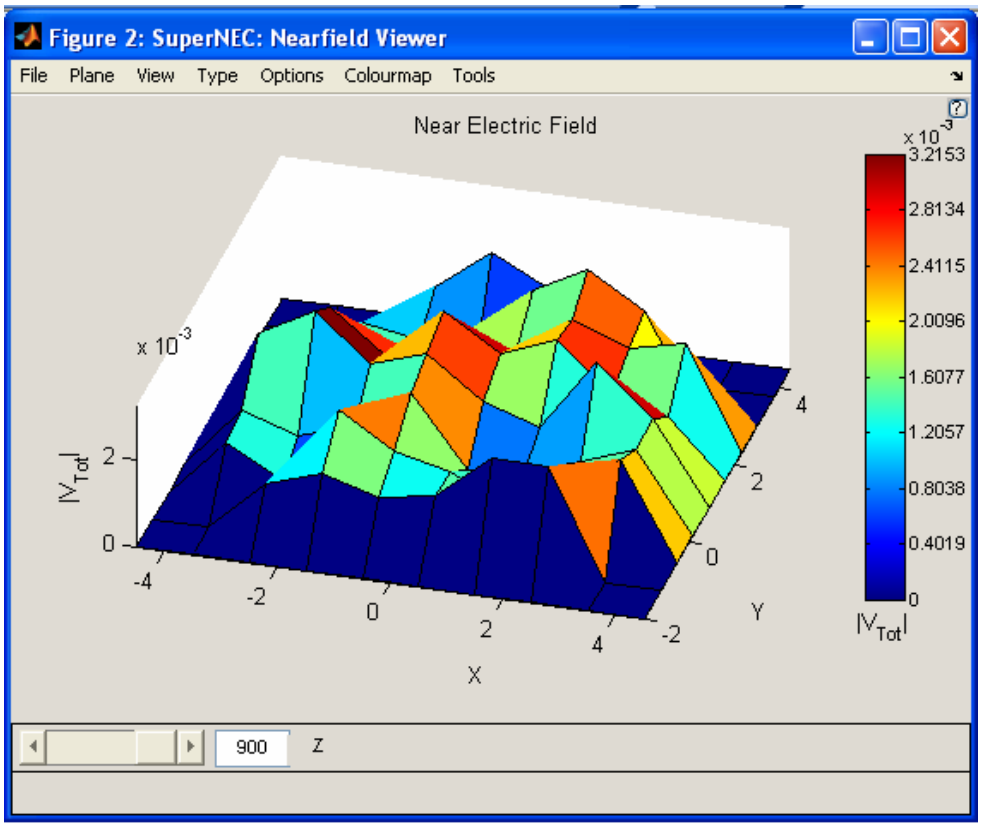
Συχνότητα 400MHz – Απόσταση 100m



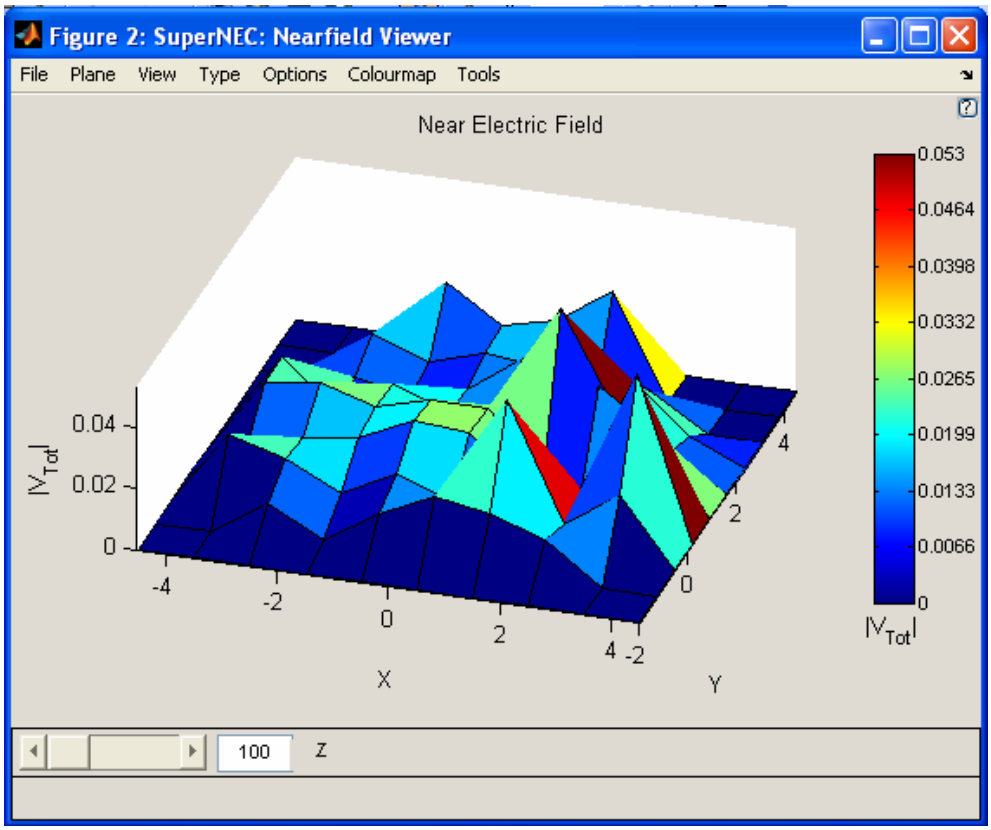
Συχνότητα 400MHz – Απόσταση 500m



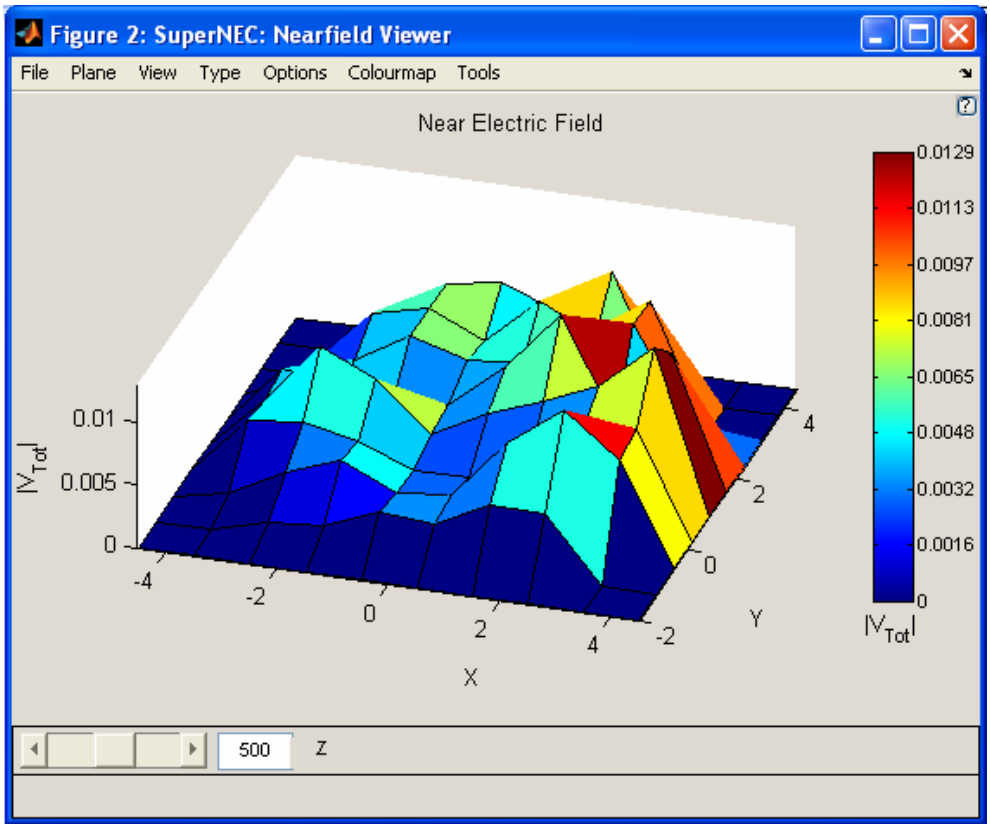
Συχνότητα 400MHz – Απόσταση 900m



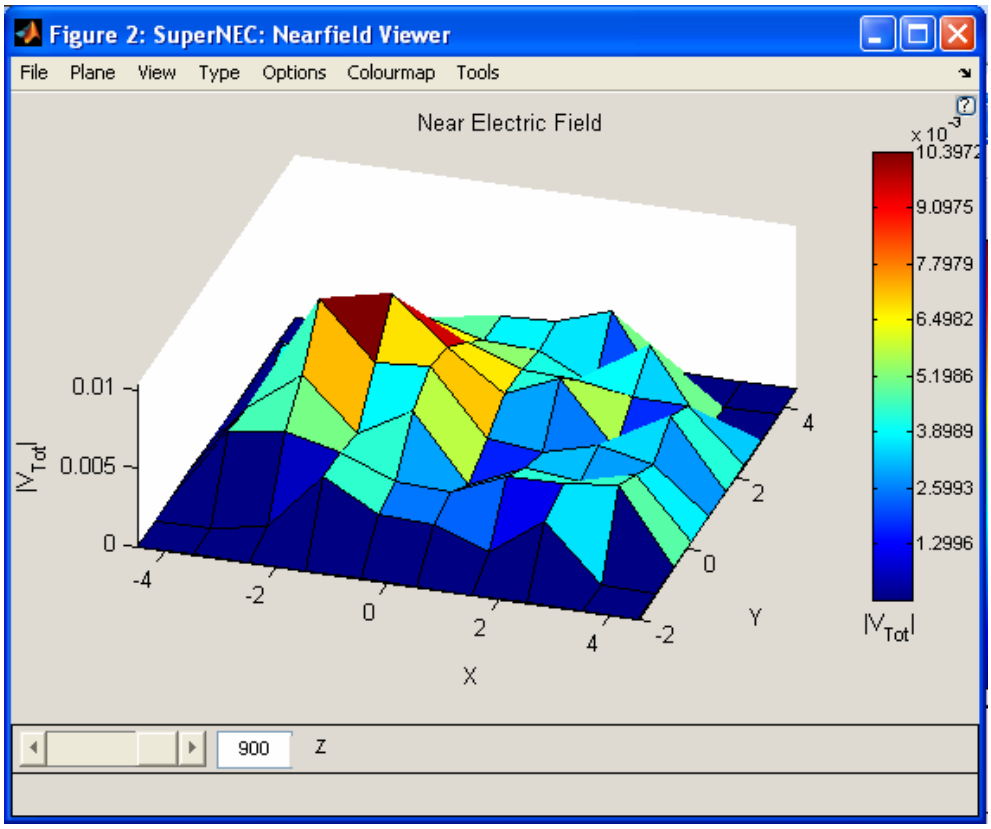
Συχνότητα 900MHz – Απόσταση 100m



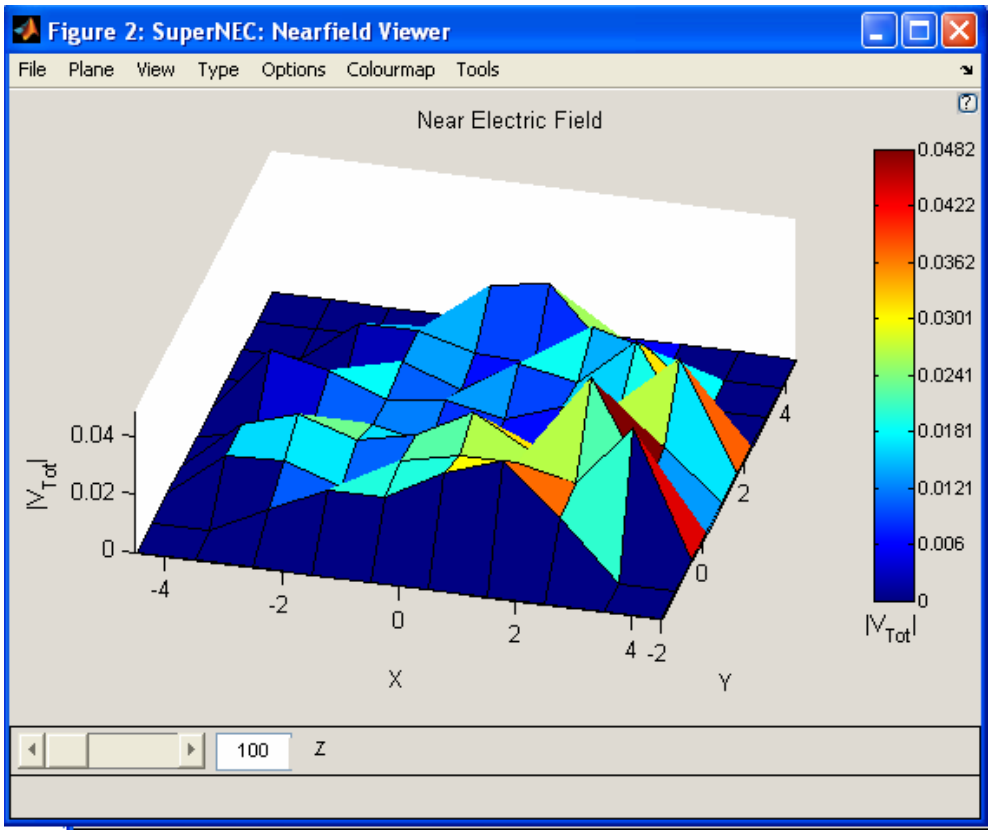
Συχνότητα 900MHz – Απόσταση 500m



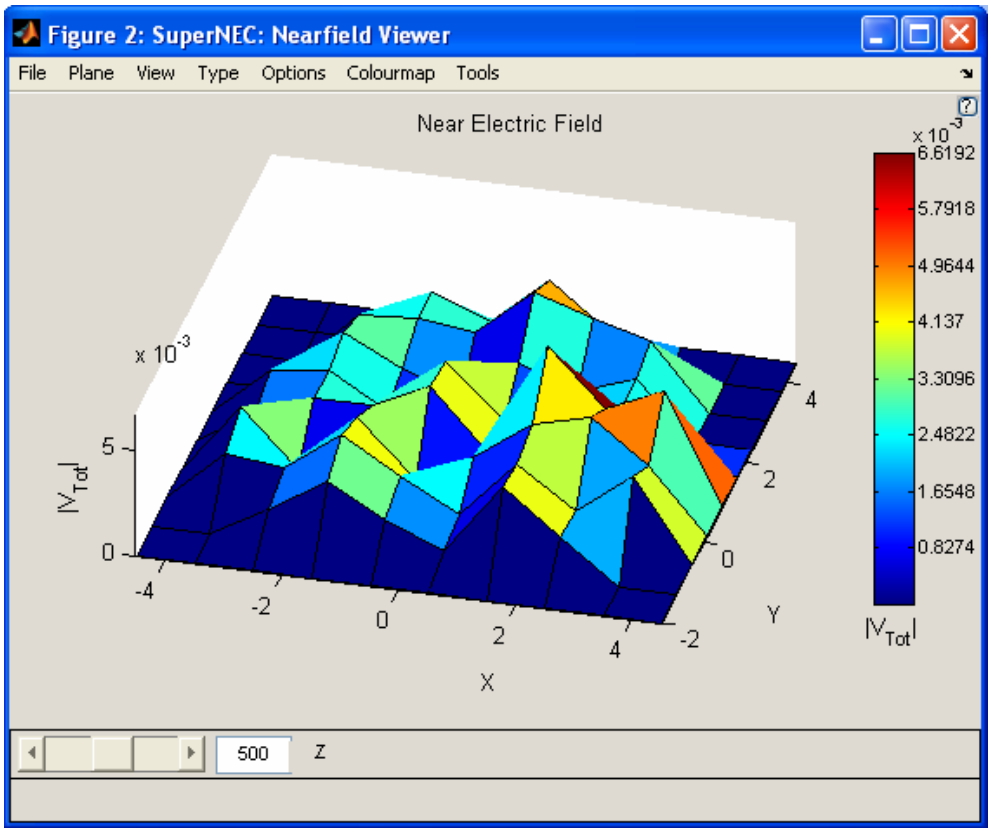
Συχνότητα 900MHz – Απόσταση 900m



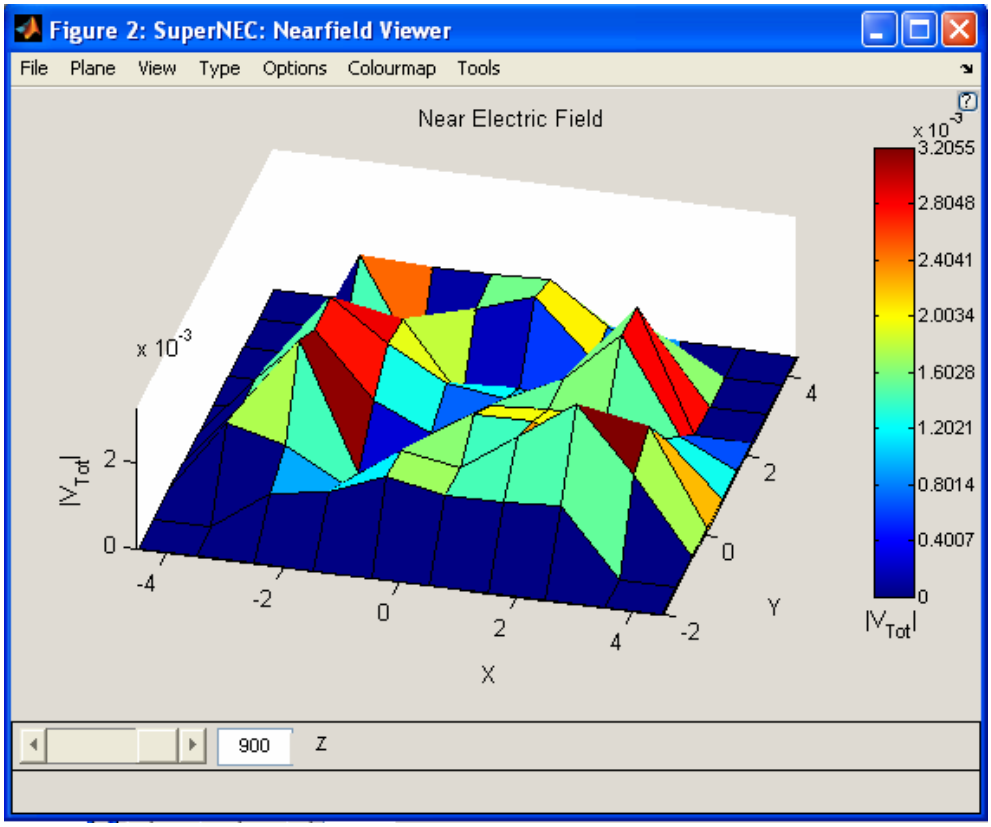
Συχνότητα 1800MHz – Απόσταση 100m



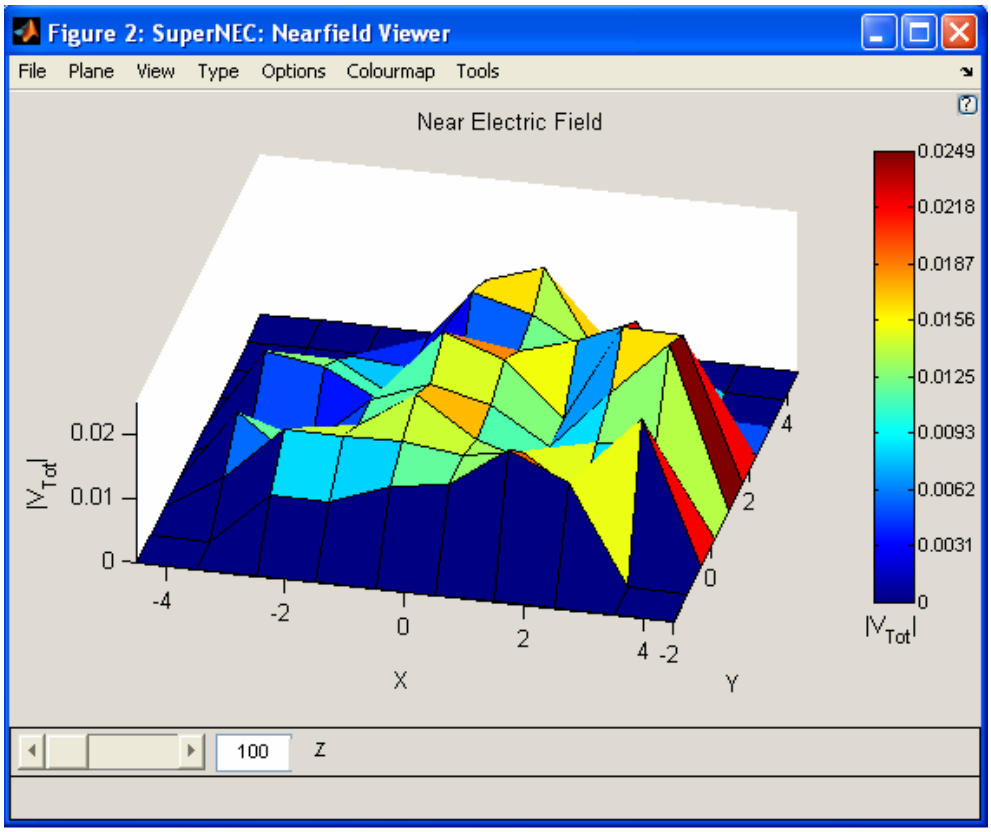
Συχνότητα 1800MHz – Απόσταση 500m



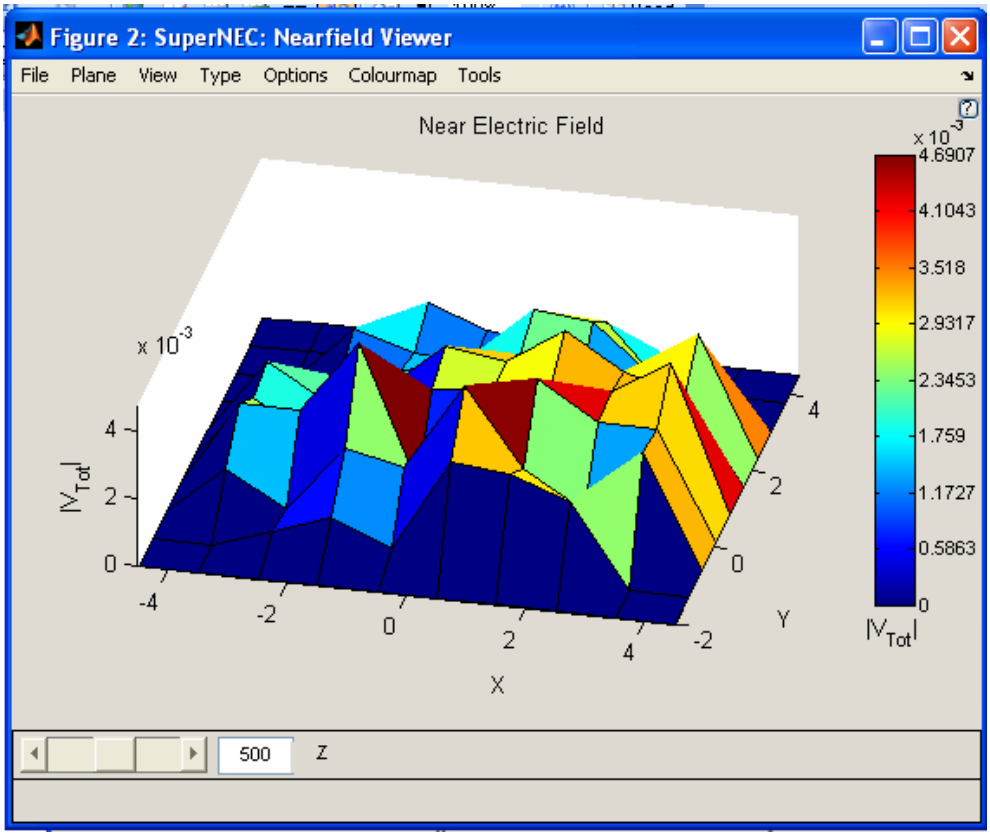
Συχνότητα 1800MHz – Απόσταση 900m



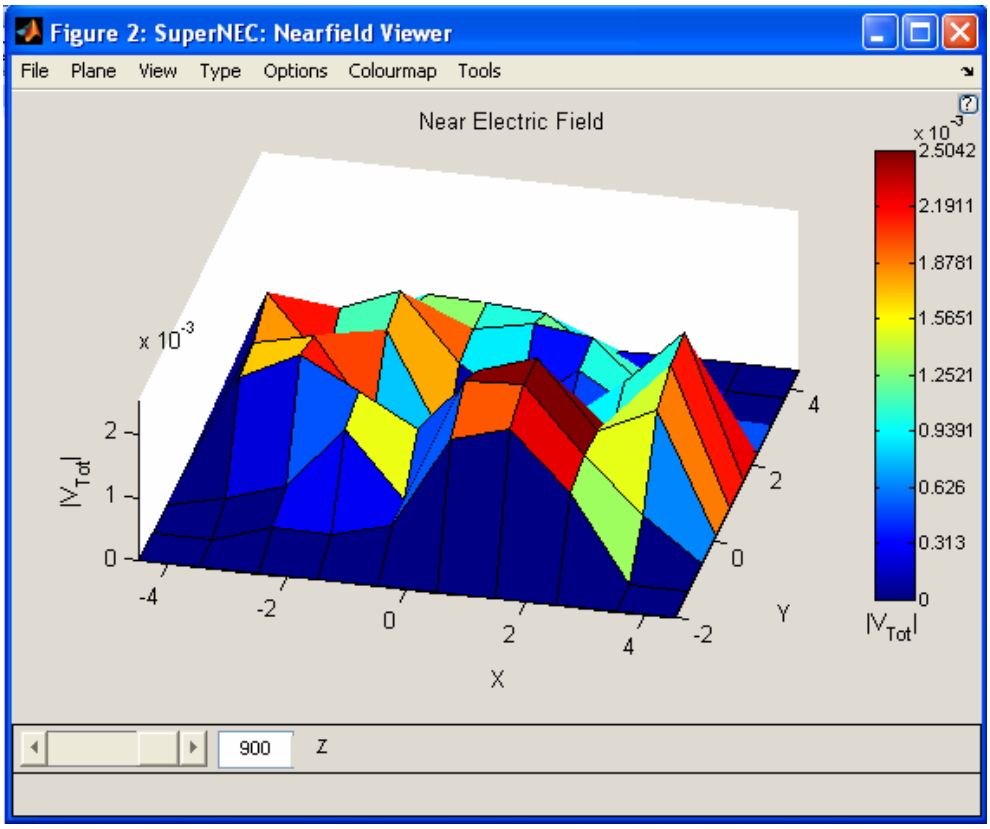
Συχνότητα 2100MHz – Απόσταση 100m



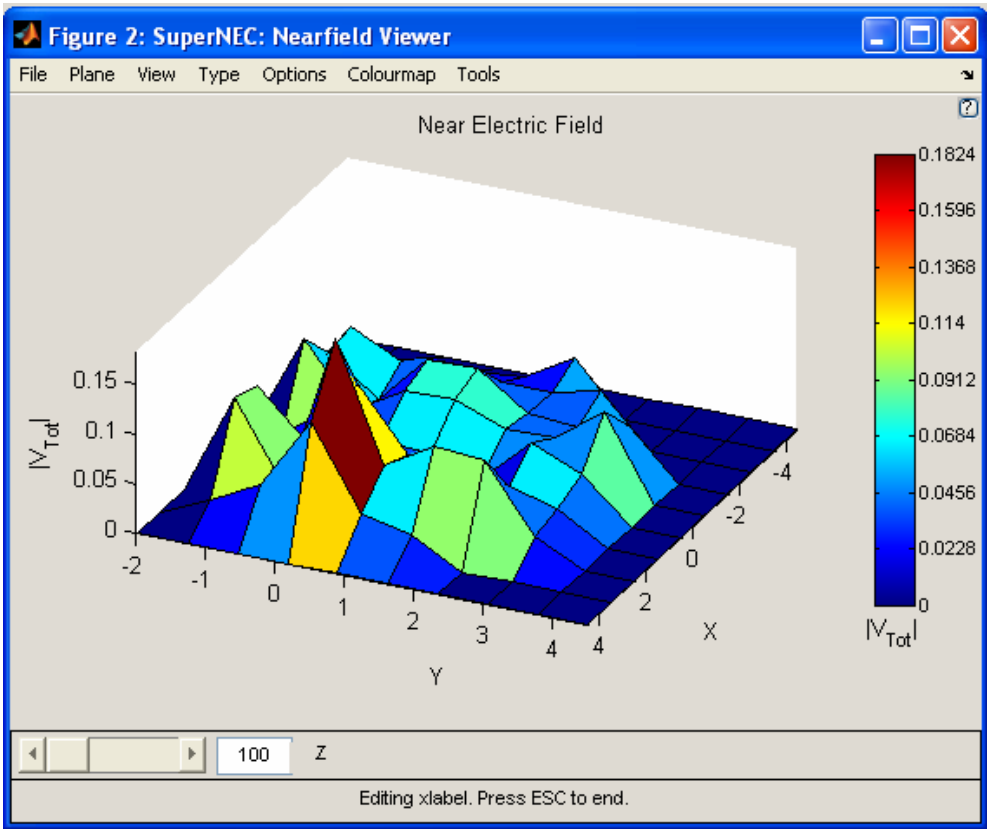
Συχνότητα 2100MHz – Απόσταση 500m



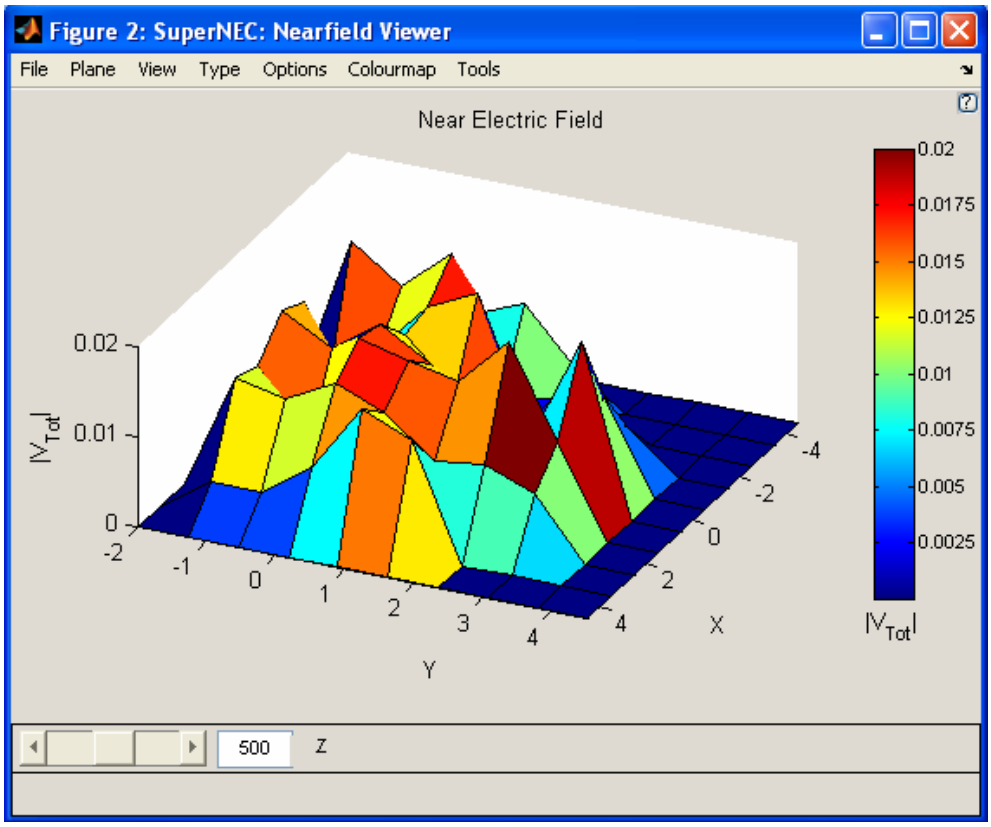
Συχνότητα 2100MHz – Απόσταση 900m



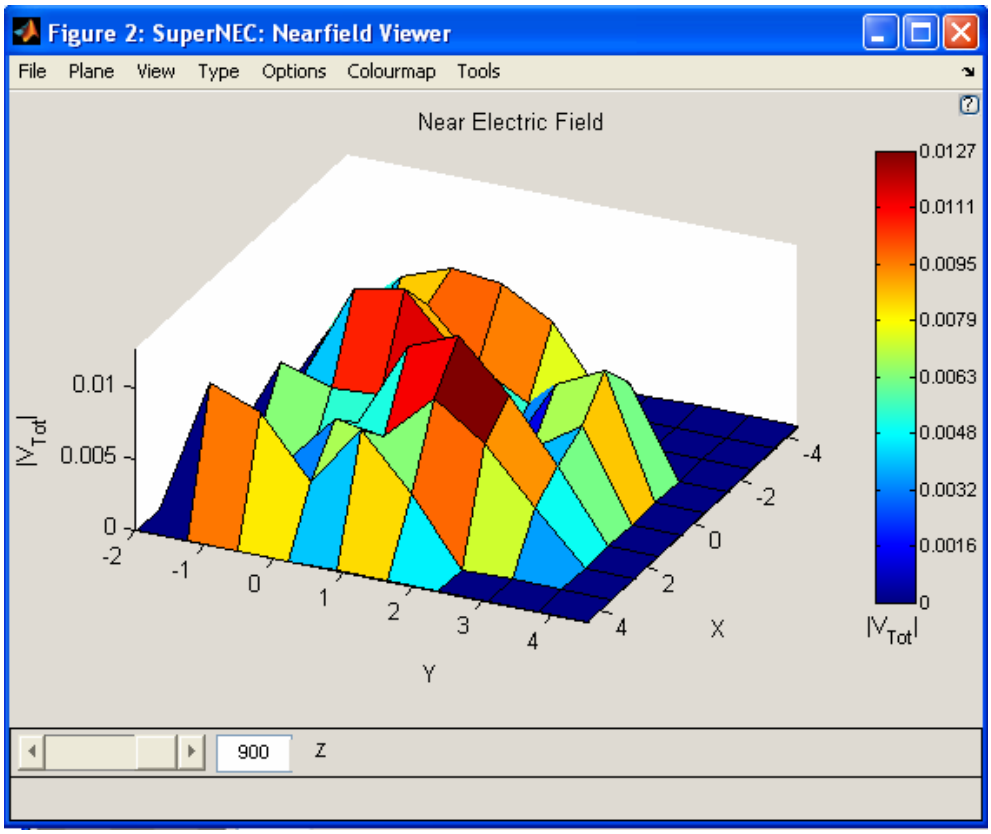
Συχνότητα 3500MHz – Απόσταση 100m



Συχνότητα 3500MHz – Απόσταση 500m



Συχνότητα 3500MHz – Απόσταση 900m



5.7 Συμπεράσματα

Τα παραπάνω διαγράμματα δίνουν στο μελετητή μια εκτίμηση των επιπέδων της εξασθένησης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε περιβάλλον τούνελ. Επίσης δίνεται μια εκτίμηση των επιπέδων που κυμαίνεται η ισχύς λήψης σε συγκεκριμένα σημεία ενδιαφέροντος στη διατομή της σήραγγας για αποστάσεις από μερικά μέτρα ως ένα χιλιόμετρο.

Μελετώντας τα παραπάνω διαγράμματα και συγκρίνοντας τις τιμές της ισχύος λήψης με τα όρια ασφαλείας ισχύος που έχουν θεσμοθετηθεί από διεθνείς οργανισμούς προτυποποίησης για τις περιπτώσεις των βιολογικών κινδύνων που αντιμετωπίζει ο άνθρωπος, αλλά και με τα όρια αδιάκοπης και ασφαλούς λειτουργίας των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων που γίνονται θύματα ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής στο υπό εξέταση περιβάλλον, είναι δυνατόν να εκτιμηθεί κατά πόσον η ισχύς λήψης βρίσκεται κάτω από τα κατώτατα όρια για την κάθε περίπτωση.

Αν τα παραπάνω διαγράμματα εξεταστούν ποιοτικά, τα συμπεράσματα που εξάγονται είναι μάλλον αναμενόμενα. Τα διαγράμματα ισχύος συναρτήσει της απόστασης δείχνουν σε κάθε περίπτωση πως η ισχύς λήψης μειώνεται καθώς μεγαλώνει η απόσταση του σημείου λήψης από το σημείο που βρίσκεται η κεραία εκπομπής. Τα fluctuations που εμφανίζονται στις μετρήσεις είναι επίσης αναμενόμενα, καθώς είναι αποτέλεσμα του φαινομένου της θετικής και της αρνητικής συμβολής των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων εξαιτίας της πολυδιαδρομικής διάδοσης που εμφανίζεται από τις ανακλάσεις στα τοιχώματα του τούνελ. Μπορούμε επίσης να παρατηρήσουμε ότι τα fluctuations παύουν να εμφανίζονται από μια απόσταση-κατώφλι και έπειτα. Αυτό συμβαίνει διότι από εκείνη την απόσταση και πέρα ισχύει ο νόμος του αντίστροφου της τετάρτης δύναμης που αναλογεί στο πολυδιαδρομικό περιβάλλον.

Τα διαγράμματα εξασθένησης συναρτήσει της συχνότητας για κάθε υπό μελέτη σημείο και για κάθε απόσταση που εξετάστηκε δείχνουν ότι η τάση της εξασθένησης είναι να μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας. Οπότε στην περίπτωση που εξετάζουμε, αυτά τα δυο μεγέθη πρέπει να θεωρούνται *αντιστρόφως ανάλογα*. Αν συγκρίνουμε τα πειραματικά

αποτελέσματα με τα θεωρητικά μοντέλα που εξετάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα: η περίπτωση του πρώτου μοντέλου της προσέγγισης του κυματοδηγού που αναφέρεται στον ρυθμό διάδοσης TE_{11} αντιστοιχεί σε αύξουσα συμπεριφορά της εξασθένησης συναρτήσει της συχνότητας, δηλαδή έρχεται σε αντίθεση με τα πειραματικά αποτελέσματα της προσομοίωσης. Η περίπτωση όμως του ρυθμού TE_{01} αντιστοιχεί σε ανάλογα με την προσομοίωση συμπεράσματα. Το δεύτερο μοντέλο της προσέγγισης των Marcatili και Schmeltzer επίσης δείχνει φθίνουσα εξάρτηση της εξασθένησης συναρτήσει της συχνότητας. Το τρίτο μοντέλο που έχει εξαχθεί από ανάλογο πρόγραμμα προσομοίωσης παρουσιάζει το ίδιο αποτέλεσμα με την προσομοίωση στο Supernec. Τέλος, το τέταρτο μοντέλο της φυσικής διάδοσης στο οποίο αναφέρονται οι ρυθμοί TM_{01} και TE_{10}, για την περιοχή συχνοτήτων που μας ενδιαφέρουν, παρουσιάζουν αύξουσα συμπεριφορά της εξασθένησης σε εξάρτηση από τη συχνότητα οπότε πρέπει να απορριφθούν. Συμπερασματικά, τα μοντέλα που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και να δώσουν αποτελέσματα που να συνάδουν με αυτά της προσομοίωσης είναι κυρίως τα μοντέλα 2 και 3, δηλαδή η προσέγγιση των Marcatili και Schmeltzer καθώς και ο τύπος της εξασθένησης που έχει προέλθει από εφαρμογή της point-matching τεχνικής. Η χρήση των τύπων αυτών των μοντέλων μπορεί να δώσει μόνο μια εκτίμηση του επιπέδου της εξασθένησης.

Τέλος, τα διαγράμματα της κατανομής της ισχύος σε όλη τη διατομή του τούνελ μπορούν να δώσουν μια παραστατική εικόνα για το πως διαδίδονται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε ένα περιβάλλον πολλαπλών ανακλάσεων και η μη ομαλή και προβλέψιμη μορφή των πεδίων δίνουν ένα δείγμα της δυσκολίας που εμφανίζει η θεωρητική μελέτη ενός τέτοιου περιβάλλοντος.

5.8 Πρόταση

Η πρόταση των συγγραφέων αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η λήψη μετρήσεων των επιπέδων ισχύος on site στο τούνελ του μετρό της Αττικής, προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματα των πραγματικών τιμών της εξασθένησης με αυτά που υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα προσομοίωσης Supernec και να επαληθευτεί η συμπεριφορά των φαινομένων που παρατηρήθηκαν.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Ι. Δ. Κανελλόπουλος, "*Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε γήινο περιβάλλον*", Εκδόσεις Τζιόλα 2003

[2] Χ. Καψάλης, Π. Κωττής, "*Κεραίες – Ασύρματες ζεύξεις*", Εκδόσεις Τζιόλα 2005

[3] Α.Κανατάς, Φ.Κωνσταντίνου, "*Συστήματα κινητών ραδιοεπικοινωνιών*", Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2001

[4] Ν.Ουζούνογλου, "*Εισαγωγή στα μικροκύματα*", Εκδόσεις Παπασωτηρίου 1994

[5] Χ. Καψάλης, Π.Τρακαδάς, "*Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα*", Εκδόσεις Τζιόλα 2006

[6] D. Didascalou (2000), "*Ray-optical wave propagation modeling in arbitrarily shaped tunnels*", PhD dissertation, Universitat Karlsruhe (TH), Germany

[7] Louis Deryck, "Natural propagation of electromagnetic waves in tunnels", IEEE Transactions on vehicular tech., August 1978

[8] E. D. Damosso, S. De Padova, "Propagation and radiation of VHF radio signals in motorway tunnels", IEEE Transactions on vehicular tech., May 1976

[9] Paul Delogne, "Basic mechanisms of tunnel propagation", Radio Science Vol.11, April 1976

[10] J. Chiba, T. Inaba, Y. Kuwamoto, O. Banno, R. Sato, "Radio communication in tunnels", IEEE Transactions on microwave theory and techniques, June 1978

[11] D. Didascalou, J. Maurer, W. Wiesbeck, "Subway tunnel guided electromagnetic wave propagation at mobile communications frequencies", IEEE Transactions on antennas and propagation, November 2001

[12] Y. Yamaguchi, T. Abe, T. Sekiguchi, J. Chiba, "Attenuation constants of UHF radio waves in arched tunnels", IEEE Transactions on microwave theory and techniques, August 1985

[13] Y. P. Zhang, "Novel model for propagation loss prediction in tunnels", IEEE Transactions on microwave theory and techniques, September 2003

[14] Martine Lienard, Pierre Degauque, "Propagation in wide tunnels at 2GHz: A statistical analysis", IEEE Transactions on vehicular technology, November 1998

[15] E. A. Marcatili, R. A. Schmeltzer, "Hollow metallic and dielectric waveguides for long distance optical transmission and lasers", Bell Syst. Tech. J. vol.43 July 1964

[16] Clayton R. Paul, "*Introduction to Electromagnetic Compatibility*", Wiley Series in Microwave and Optical Engineering

[17] "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300GHz)", Health Physics April 1998, Volume 74, Number 4Q494-522 – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

[18] ΕΛΟΤ 1422-3:2005 ''Συνεγκατάσταση κεραιών ραδιοεπικοινωνιών – Μέρος 3:Τεχνικές δοκιμών και μετρήσεων – Όρια''

[19] ΕΛΟΤ ΕΝ 50061 Τροπ.1 ''Ασφάλεια εμφυτευμένων καρδιακών βηματοδοτών''

[20] Achim Bahr, “Protection of persons in mobile radio electromag”, EMC and Technology, Newsletter 2/2005