

Τμήμα  
Μηχανικών  
Πληροφορικής τ.ε.  
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα  
Δυτικής Ελλάδας

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Εξαγωγή μοντέλου ραδιοκάλυψης της περιοχής της Ναυπάκτου βάσει πεδιομετρήσεων στάθμης ισχύος λήψης φορητής συσκευής».

### Επιμέλεια / Συγγραφή:

Σεχρεμέλης Λουκάς & Χριστακόπουλος Ευάγγελος  
Α.Μ. 1560 Α.Μ. 1616

### Επιβλέπων καθηγητής:

Ασαρίδης Ηλίας

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή  
Αντίρριο, \_\_\_\_\_ Ιουνίου 2016

--	--	--

## Ευχαριστίες

Ευχαριστώ την οικογένειά μου, τους δασκάλους και τους καθηγητές που μου έδωσαν την ευκαιρία να μορφωθώ, να αποκτήσω παιδεία και να φτάσω στο σημείο να αποφοιτήσω από ένα ανώτερο εκπαιδευτικό ίδρυμα για να συνεχίσω την αναζήτηση της γνώσης. Ιδιαίτερες ευχαριστίες αξίζουν και στον επιβλέπων καθηγητή της παρούσας εργασίας κ. Ηλία Ασαρίδη που χωρίς την βοήθειά του δεν θα είχε περατωθεί.

---

Σεχρεμέλης Λουκάς

Για τη διεκπεραίωση της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή μας κύριο Ασαρίδη Ηλία, τους καθηγητές, τους φίλους μου και την οικογένεια μου για τη συνεργασία και την πολύτιμη συμβολή τους στην ολοκλήρωση της.

---

Χριστακόπουλος Ευάγγελος

“I would trade all of my technology for an afternoon with Socrates”

Steve Jobs February 24, 1955 – October 5 , 2011

## Πίνακας περιεχομένων

<b>Εισαγωγή</b> .....	<b>5</b>
<b>Περίληψη</b> .....	<b>6</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>7</b>
<b>1. Το Δίκτυο GSM</b> .....	<b>8</b>
1.1. Ιστορική αναδρομή .....	8
1.1.1. 1 <sup>ης</sup> Γενιάς GSM .....	9
1.1.2. 2 <sup>ης</sup> Γενιάς GSM .....	10
1.1.3. 3 <sup>ης</sup> Γενιάς GSM .....	12
1.1.4. 4 <sup>ης</sup> Γενιάς GSM.....	12
<b>1.2. Κυτταρική Κάλυψη</b> .....	<b>13</b>
1.2.1 Εισαγωγή.....	13
1.2.2. Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων .....	13
1.2.3. Κυτταρική Διάσπαση .....	14
1.2.4. Συχνότητες λειτουργίας.....	15
1.2.4.1. GSM 900.....	15
1.2.4.2. GSM 1800.....	16
1.2.5. Ρυθμός Μεταφοράς Δεδομένων .....	17
1.2.6. Είδη κυψελών.....	17
<b>1.3. Αρχιτεκτονική GSM</b> .....	<b>18</b>
1.3.1. Κινητός Σταθμός (MS).....	18
1.3.2. Βασικό Υποσύστημα Σταθμού (BSS) .....	18
1.3.3. Υποσύστημα Δικτύου Μεταγωγής (NNS) .....	19
1.3.4. Μονάδα Αναγνώρισης Συνδρομητή (SIM) .....	21
<b>1.4. Τεχνολογίες Πολυπλεξίας και Σηματοδοσίας</b> .....	<b>22</b>
1.4.1. Πολυπλεξία Χρόνου (TDMA) .....	22
1.4.2. Πολυπλεξία Συχνοτήτων (FDMA).....	22
1.4.3. Πολυπλεξία Κώδικα (CDMA) .....	23
1.4.4. Φυσικά και Λογικά Κανάλια.....	23
1.4.4.1. Κανάλια Ελέγχου .....	24
1.4.4.2. Κανάλια Ελέγχου Κοινής Χρήστης (CCCH).....	27
1.4.4.3. Αφιερωμένα Κανάλια Ελέγχου (DCCH) .....	29
<b>2. Μοντέλα Απωλειών Ραδιοκάλυψης</b> .....	<b>33</b>
2.1. Εισαγωγή.....	33
2.1.1. Απώλειες Λόγω Εδάφους.....	35
2.1.1.1. Ανάκλαση .....	35
2.1.1.2. Περίθλαση.....	35
2.1.3. Διάδοση Σε Επιφάνεια Με Εμπόδια.....	36

2.1.4. Αρχή Huygen .....	38
2.1.5. Ελλειψοειδές Ζώνες Fresnel.....	41
2.1.6. Μιγαδικό Ολοκλήρωμα Fresnel .....	46
2.1.6.1. Απώλειες Περίθλασης.....	48
2.1.7. Μέθοδος Bullington .....	50
2.1.8. Μέθοδος Epstein – Peterson .....	51
2.1.9. Μέθοδος Deygout .....	52
2.1.10. Μοντέλο Egli .....	53
2.1.11. Μέθοδος Joint Radio Committee (JRC).....	54
2.1.12. Μοντέλο Blomquist – Ladell .....	56
2.1.13. Σκέδαση .....	57
2.1.14. Μοντέλο RCS (Radar Cross Section).....	57
2.2. Μοντέλα Διάδοσης.....	62
2.2.1. Μοντέλο Okumura – Hata.....	63
2.2.2. Μοντέλο Cost-231 Hata .....	64
2.2.3. Μοντέλο Rayleigh.....	64
2.2.4. Μοντέλο Ikegami .....	65
2.2.5. Μοντέλο Longley-Rice .....	66
2.2.6. Μοντέλο Walfisch – Bertoni.....	67
2.2.7. Μοντέλο Cost-231 Walfisch – Ikegami .....	68
2.2.8. Μοντέλο Keenan-Montley .....	70
2.2.9. Μοντέλο δύο ακτινών .....	71
2.2.10. Μοντέλο Uni-Land.....	73
<b>3. Εμπορικά Συστήματα Καταγραφής Ποιότητας Δικτύων Κινητής Τηλεφωνίας .....</b>	<b>82</b>
3.1. Ascom Tems Portfolio .....	82
3.2. Nemo Network Testing Solutions .....	84
3.3. SwissQual Network Benchmarking, Optimization and Service Monitoring.....	85
<b>4. Εργαλεία Εξαγωγής Μοντέλου Ραδιοκάλυψης .....</b>	<b>86</b>
Android – Εφαρμογή “Network Cell Info Lite .....	86
Λειτουργικό Σύστημα Android.....	86
4.1.2. Εφαρμογή Network Cell Info .....	87
4.2. Matlab .....	88
<b>5. Ημι-εμπειρικό μοντέλο ραδιοκάλυψης.....</b>	<b>89</b>
5.1. Παρουσίαση μετρήσεων.....	89
5.2. Διαδικασία εξαγωγής μοντέλου .....	97
5.3. Υπολογισμός του εκθέτη απωλειών.....	102
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>108</b>

## Εισαγωγή

Κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα κατά την διάδοσή του υπόκειται στους νόμους της φυσικής. Για αυτό τον λόγο παρουσιάζονται κατά την διάδοσή του φαινόμενα εξασθένισης και διάθλασης που οφείλονται είτε σε εμπόδια είτε σε μακρινή απόσταση του δέκτη από τον πομπό και έχουν σαν αποτέλεσμα την εισαγωγή θορύβου στο σήμα πριν αυτό φτάσει στο δέκτη. Η εμφάνιση αυτών των φαινομένων απαιτεί τον σχεδιασμό και την λήψη μέτρων σχετικά με την εκπομπή ενός σήματος όσων αφορά την ισχύ εκπομπής του για να καλύψει μία περιοχή και να φτάσει στο δέκτη με δυνατότητα εξαγωγής της πληροφορίας από αυτό.

Για να γίνει επίλυση των προβλημάτων σε μία ραδιοκάλυψη απαιτούνται πληροφορίες όπως η συχνότητα του σήματος εκπομπής, το ανάγλυφο του εδάφους, η έκταση της περιοχής κάλυψης, τα ύψη των κεραιών και η ύπαρξη φυσικών ή τεχνητών εμποδίων (βουνά, κτίρια κλπ.). Είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθεί κάποιος συγκεκριμένος τύπος για μια διάδοση καθώς το σήμα εμφανίζει τυχαίες διακυμάνσεις στην ένταση του σήματος ανά σημείο ιδιαίτερα όσον αφορά τα οχήματα που κινούνται.

Εξαιτίας αυτών χρησιμοποιείται η πρόβλεψη της έντασης ενός σήματος μέσω μεθόδων στατιστικής ανάλυσης. Σε αρκετά στατιστικά μοντέλα ραδιοκάλυψης γίνεται χρήση των τύπων του μοντέλου διάδοσης ελευθέρου χώρου και επίπεδης επιφάνειας. Για να βγουν συμπεράσματα σχετικά με το μοντέλο κάλυψης που χρησιμοποιείται σε μία περιοχή θα πρέπει οι μετρούμενες τιμές να παρουσιάζουν μέγιστη απόκλιση 8 dB σε κάθε σημείο σε σχέση με τις εκτιμώμενες από το μοντέλο τιμές.

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εξαγωγή ενός ημι-εμπειρικού μοντέλου ραδιοκάλυψης στηριζόμενου σε πραγματικές μετρήσεις της ισχύος λήψης σήματος κινητής τηλεφωνίας από το λιμάνι της Ναυπάκτου.

Αρχικά παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική, τα χαρακτηριστικά και ο τρόπος λειτουργίας ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας GSM. Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση των κυριότερων και πιο χρησιμοποιημένων μοντέλων ραδιοκάλυψης. Έπειτα, γίνεται μία αναφορά σε διαδεδομένα συστήματα εμπορικής καταγραφής και παρακολούθησης της ποιότητας των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Εν συνεχεία γίνεται μία παρουσίαση των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν για την συλλογή των απαραίτητων δεδομένων για την παρούσα εργασία. Και τέλος αναλύεται η διαδικασία της εξαγωγής του μοντέλου ραδιοκάλυψης.

## Λέξεις Κλειδιά

Κυψελωτά / Κυτταρικά Δίκτυα, GSM, Δίκτυο κινητών επικοινωνιών, Μέτρηση ισχύος σήματος, Ποιότητα δικτύου, Android, GPS. Google Maps. Matlab, Network Cell Info

## **Abstract**

The purpose of this graduation thesis is to export a Semi-Empirical Radio Coverage Model, from the port of Nafpaktos, based on real network measurements.

At the beginning there is a reference regarding the history, the architecture and the principles of operation of a GSM mobile network. After that there is a radio coverage models analysis. At the next chapter there is a presentation of the most popular commercial systems for network monitoring. Furthermore we enumerate the tools used for this project and then we analyze in detail the followed procedure for the extraction of the radio coverage model.

## **Key Words**

GSM, Mobile Networks, Cellular Networks, Network Quality, Signal Power Measurement, GPS, Google Maps, Matlab, Android, Network Info Cell app.



# 1. Το Δίκτυο GSM

## 1.1. Ιστορική αναδρομή

Η ανακάλυψη της ασύρματης διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στα τέλη του 1800 οδήγησε στην ανάγκη για ύπαρξη ενός τηλεφωνικού δικτύου το οποίο δεν θα αποτελούταν από τηλεφωνικά καλώδια ενώ θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και από κινητούς κόμβους. Οι πρώτοι χρήστες μιας απλοϊκής μορφής δικτύου κινητής τηλεφωνίας είναι η Βρετανική αστυνομία και η αστυνομία του Detroit το έτος 1921. Το δίκτυο εκείνο χρησιμοποιούσε συχνότητες στο εύρος των 2MHz.

Το 1940 γίνεται για πρώτη φορά εκχώρηση συχνοτήτων στις περιοχές των 30 και 40 MHz από την Ομοσπονδιακή επιτροπή Επικοινωνιών των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής δεδομένης της ραγδαίας αύξησης των χρηστών που επιθυμούσαν την χρήση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Η εξέλιξη της τεχνολογίας στην κατασκευή ηλεκτρονικών κυκλωμάτων μαζί με την χρήση της διαμόρφωσης FM επέτρεψαν την ανακάλυψη της αμφίδρομης κινητής ραδιοεπικοινωνίας αμέσως μετά τον Δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο. Τα εργαστήρια της Bell κατόρθωσαν την δημιουργία ενός κοινού φορέα εξυπηρέτησης με αποτέλεσμα την εξυπηρέτηση πολλών χρηστών ταυτόχρονα οι οποίοι βρίσκονταν και σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές.

Η σύνδεση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας με το δίκτυο σταθερής τηλεφωνίας εκείνη την εποχή γινόταν χειροκίνητα. Η κάλυψη ήταν αρκετά περιορισμένη και πολλές φορές γινόταν με την χρήση ενός μόνο σταθμού ενώ η ποσότητα φάσματος ήταν εξαιρετικά μικρή με αποτέλεσμα την υποστήριξη μικρού αριθμού χρηστών με βάση τα σημερινά δεδομένα. Τα συστήματα αυτά δεν είχαν θωράκιση απέναντι στις παρεμβολές ενώ η συνεχής συμφόρηση των καναλιών τους σε ώρες αιχμής είχε οδηγήσει σε μείωση της ποιότητας των υπηρεσιών και στην κατάρρευσή τους.

Από το 1950 και μετά τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας άρχισαν να γίνονται αυτόματα με αποτέλεσμα την μείωση τους κόστους λειτουργίας τους παρόλα αυτά η λειτουργία τους με αναλογική συμβατική ασύρματη επικοινωνία δεν επέτρεπε την δυναμική αύξηση της χωρητικότητάς τους, την θωράκιση τους απέναντι στις παρεμβολές και την αντιμετώπιση της κατάρρευσής τους κατά τις περιόδους αιχμής.

Τα τερματικά των πρώτων δικτύων κινητής τηλεφωνίας είχαν μεγάλες διαστάσεις, ζύγιζαν πολλά κιλά ενώ το κόστος τους ήταν ιδιαίτερα αυξημένο. Χαρακτηριστικό αποτελεί πως τα πρώτα τερματικά τοποθετούνταν σε αυτοκίνητα καθώς εκτός των διαστάσεών τους και του βάρους τους είχαν ανάγκη και από εξωτερική τροφοδοσία.

### 1.1.1. 1<sup>ης</sup> Γενιάς GSM

Στα μέσα της δεκαετίας του 1970 άρχισε η ανάπτυξη συστημάτων κινητής τηλεφωνίας που αποτελούνταν από ένα σταθμό εκπομπής και πολλών σταθμών λήψης για την δυνατότητα κάλυψης μεγαλύτερων περιοχών. Σε αυτό βοήθησε η εξέλιξη των μικροεπεξεργαστών. Η εμφάνιση των κυψελωτών δικτύων κινητής τηλεφωνίας επέτρεψε για πρώτη φορά την χρήση πολλών σταθμών εκπομπής και λήψης φέρνοντας την επανάσταση στις κινητές τηλεπικοινωνίες λόγω της κάλυψης ακόμα μεγαλύτερων περιοχών μέσω της αλληλοκάλυψης αυτών.

Τα κυψελωτά δίκτυα βασίζονται στην επαναχρησιμοποίηση των διαθέσιμων συχνοτήτων από πολλούς σταθμούς βάσης. Η ίδια συχνότητα ωστόσο χρησιμοποιείται από σταθμούς με μεγάλη απόσταση μεταξύ τους για την αποφυγή εμφάνισης φαινομένων δημιουργίας παράσιτων. Η χρήση τέτοιων δικτύων προσφέρει μεγάλο κέρδος σε χωρητικότητα αλλά αυξάνει την πολυπλοκότητα του δικτύου καθώς κάθε συσκευή θα πρέπει να είναι σε θέση να επιλέξει με ποιον σταθμό βάσης θα ανταλλάξει δεδομένα με το βέλτιστο τρόπο.

Τα πρώτα δημόσια κυψελωτά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας αναπτύχθηκαν από κάθε χώρα ξεχωριστά για την δική της κάλυψη. Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής το πρώτο δίκτυο τέτοιου είδους ξεκίνησε την λειτουργία του το 1979 στην πολιτεία του Ιλλινόις και ονομάστηκε Advanced Mobile Phone Service (AMPS). Η Ιταλία έκανε την αρχή για την Ευρώπη το 1973 χρησιμοποιώντας το σύστημα Radio Telefono Mobile Integrato (RTMI). Στην βόρεια Ευρώπη η συνεργασία ορισμένων οργανισμών τηλεπικοινωνιών με κάποιους κατασκευαστές είχε σαν αποτέλεσμα την δημιουργία του Nordic Mobile Telephone ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας για την κάλυψη της Σκανδιναβίας. Το σύστημα έκανε πρεμιέρα στην Σουηδία τον Σεπτέμβριο του 1981 ενώ αργότερα έκανε την εμφάνισή του στη Φιλανδία, την Νορβηγία και την Δανία. Στην Βρετανία σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε το Total Access Communication System (TACS) το οποίο ξεκίνησε την λειτουργία του τον Φεβρουάριο του 1983 με

100 αρχικούς σταθμούς βάσης. Στην Δυτική Γερμανία χρησιμοποιήθηκε το C-Netz (Radio Telephone Network C) το οποίο αποτελούσε την πρώτη γενιά αναλογικής κινητής τηλεφωνίας στη Γερμανία με έναρξη λειτουργίας το 1985. Η Γαλλία ακολούθησε το 1986 με το δικό της σύστημα κινητής τηλεφωνίας το Radiocom 2000.

Η χρήση διαφορετικών τεχνολογιών και συστημάτων δικτύων κινητής τηλεφωνίας σε κάθε χώρα εμφάνισε άμεσα προβλήματα ασυμβατότητας μεταξύ των δικτύων αλλά και του εξοπλισμού δημιουργώντας προβλήματα στην ύπαρξη ενός συμβατού Ευρωπαϊκού κοινών προτύπων δικτύου.

Η ραγδαία αύξηση στην ζήτηση κινητών τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών άρχισε να δημιουργεί προβλήματα στην χωρητικότητα των τότε δικτύων παρόλο που ήταν ικανά να καλύψουν εκατοντάδες χιλιάδες συνδρομητές. Τα αναλογικά δίκτυα χρησιμοποιούσαν φάσμα συχνοτήτων στα 450 MHz και 900 MHz και δεν υπήρχε διάθεση για την εκχώρηση και άλλων συχνοτήτων ενώ άλλες τεχνολογίες που υπόσχονταν μεγαλύτερη χωρητικότητα ήταν αρκετά ακριβές και ασύμφορες.

Από το 1980 και μετά το μέγεθος των τερματικών άρχισε να μικραίνει με την ανάπτυξη της τεχνολογίας. Αρχικά τα τερματικά τοποθετούνταν σε αυτοκίνητα λόγω του μεγέθους τους και της ανάγκης για παροχή ενέργειας. Από το 1988 άρχισαν να εμφανίζονται οι πρώτες συσκευές κινητής τηλεφωνίας χειρός με βάρος 400gr και μέγεθος που δεν χώραγε σε τσέπη.

### **1.1.2. 2<sup>ης</sup> Γενιάς GSM**

Η αύξηση του αριθμού των συνδρομητών που έκαναν χρήση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας σε συνάρτηση με την ανάγκη για μεγαλύτερες χωρητικότητες των δικτύων έφεραν την ανακάλυψη των ψηφιακών συστημάτων. Τα ψηφιακά συστήματα εισήγαγαν σε συνδυασμό με την πολυπλεξία συχνοτήτων (FDMA) μια νέα τεχνολογία την πολυπλεξία χρόνου (TDMA). Κατά την χρήση του δικτύου ο συνδρομητής χρησιμοποιούσε κάθε φορά μία χρονοθυρίδα (timeslot) στο ίδιο κανάλι με αποτέλεσμα την αύξηση χωρητικότητας των δικτύων καθώς σε κάθε συχνότητα υπήρχε πλέον και αριθμός χρονοθυρίδων με αποτέλεσμα την εξυπηρέτηση μεγαλύτερου αριθμού συνδρομητών από κάθε κανάλι.

Το 1982 η Επιτροπή Ευρωπαϊκών Ταχυδρομείων και Τηλεγράφων (Conference of European Posts and Telegraphs) όρισε μια ομάδα μελέτης με την ονομασία Groupe Special Mobile (GSM) για να αναπτύξει ένα πανευρωπαϊκό ψηφιακό σύστημα κινητής τηλεφωνίας βασισμένο στην κυτταρική και την TDMA τεχνολογία το οποίο θα έπρεπε να παρέχει καλύτερη ποιότητα φωνής, μικρότερο κόστος λειτουργείας καθώς και τερματικά με μικρότερο κόστος, δυνατότητα περιαγωγής (roaming) και συμβατότητα με την τεχνολογία μετάδοσης φωνής ISDN.

Το GSM άρχισε να λειτουργεί στην περιοχή των 900 MHz και κάθε μπάνα φορέα έχει εύρος 200 Khz ενώ περιλαμβάνει 8 χρονοθυρίδες. Βασίζεται στην μεταγωγή κυκλώματος και κάθε timeslot χρησιμοποιείται από μία επικοινωνία φωνής με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση 8 συνδρομητών από κάθε μπάνα φορέα.

Η εμπορική διάθεση του GSM ξεκίνησε στα τέλη του 1991 ενώ μόλις 2 χρόνια μετά γινόταν χρήση του από 36 δίκτυα σε 22 χώρες μεταξύ αυτών και η Ελλάδα με τα δίκτυα Telestet και Panafon. Στην Αμερική έγινε χρήση του δικτύου AMPS ενώ στην Βρετανία του TACS τα οποία είχαν παρόμοια χαρακτηριστικά με το GSM.

Λόγω της ανάπτυξης του διαδικτύου μέσω των σταθερών τηλεπικοινωνιακών δικτύων δημιουργήθηκε η ανάγκη για μεταφορά πακέτων και μέσω των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Η χρήση ενός μόνο timeslot για μεταφορά δεδομένων και η χρήση του βάση χρόνου και όχι όγκου δεδομένων οδήγησε στην μεταφορά δεδομένων με πολύ μικρή ταχύτητα και στη συχνή απώλειά τους κατά την μεταφορά. Λύση σε αυτό το πρόβλημα ήρθε να δώσει το HSCSD μία τεχνολογία για μεταφορά δεδομένων μέσω του GSM με δυνατότητα χρήσης πολλαπλών timeslots για μια μεταφορά δεδομένων με αποτέλεσμα όμως την δέσμευση παραπάνω timeslots τα οποία δεν ήταν διαθέσιμα για μεταφορά φωνής.

Η ανακάλυψη του GPRS ενός δικτύου που στήνεται πάνω στο GSM επέτρεψε την αύξηση της ταχύτητας μεταφοράς των δεδομένων σε συνεργασία με εξωτερικά δίκτυα όπως για παράδειγμα το internet.

### 1.1.3. 3<sup>ης</sup> Γενιάς GSM

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 3ης γενιάς (3G) έκαναν την εμφάνισή τους στα τέλη του 2004 και αποτελούνται από τα συστήματα UMTS, MBS και WLANS. Επιτρέπουν την μετάδοση δεδομένων σε ρυθμούς άνω των 2 mbps με αποτέλεσμα την αξιόπιστη διαχείριση πολυμεσικών υπηρεσιών σε πραγματικό χρόνο, την γρήγορη περιήγηση στο διαδίκτυο και την χρήση τεχνολογιών καθαρής φωνής τύπου HD Voice. Στηρίζονται τόσο στην μεταγωγή κυκλώματος όσο και στην μεταγωγή πακέτου και εξασφαλίζουν καλύτερη εκμετάλλευση των συχνοτήτων.

Τα δίκτυα τρίτης γενιάς κάνουν χρήση της τεχνολογίας W-CDMA, που βασίζεται στην χρήση διαφορετικών κωδικών για την εξυπηρέτηση διαφορετικών χρηστών, σε συνδυασμό με τις τεχνολογίες FDMA και TDMA. Χρησιμοποιούν φορέα καναλιού με εύρος 5 MHz για να επιτύχουν υψηλό ρυθμό μεταφοράς δεδομένων.

### 1.1.4. 4<sup>ης</sup> Γενιάς GSM

Από το 2010 η κινητή τηλεφωνία αναβαθμίζεται ακόμη περισσότερο και ενσωματώνει την χρήση της τεχνολογίας Long Term Evolution (LTE) η οποία στήνεται πάνω στα υπάρχοντα 3G δίκτυα, μειώνοντας έτσι το κόστος εγκατάστασης, και εξασφαλίζει ρυθμό μεταφοράς δεδομένων έως και 100 mbps ο οποίος ξεπερνάει τους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων ακόμα και της τεχνολογίας VDSL. Από τα δίκτυα 4ης γενιάς ξεκινάει και η σταδιακή κατάργηση της κυβελωτής μορφής των δικτύων GSM με την χρήση περισσότερων κεραιών αναμετάδοσης πετυχαίνοντας καλύτερη κάλυψη και άρα μείωση εξασθένισης σήματος και διαλείψεων του.

Η ανάπτυξη των δικτύων LTE έχει σαν στόχο την συνεχή παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών σε κάθε κινητό συνδρομητή με ταχύτητες έως 1 gbps στο δρόμο και στα σπίτια και έως 100 mbps στα μέσα μαζικής μεταφοράς.

## 1.2. Κυτταρική Κάλυψη

### 1.2.1 Εισαγωγή

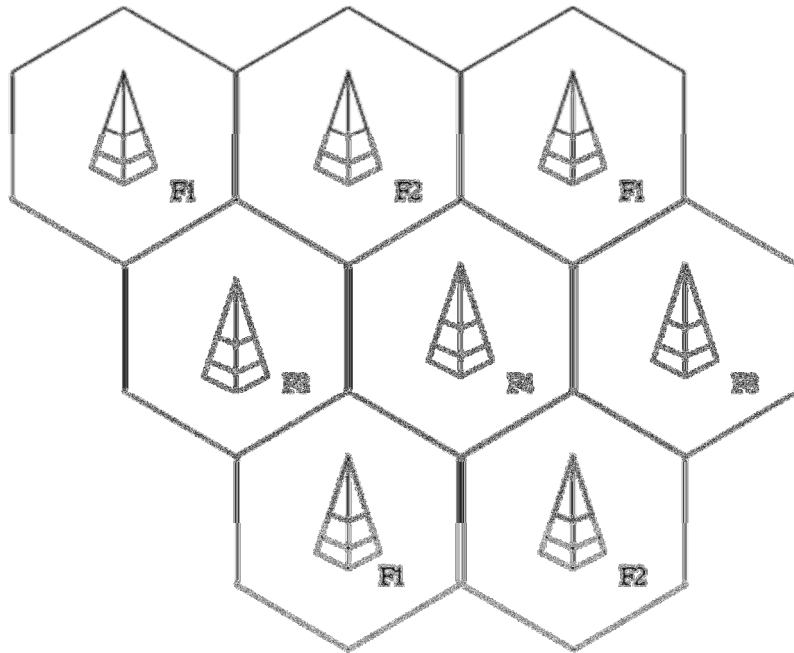
Τα πρώτα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας απαιτούσαν την χρήση ενός απλού πομποδέκτη με πολύ-κατευθυντική (omni) κεραία ο οποίος τοποθετούταν κυρίως σε ύψωμα, αναλόγως και της ιδιομορφίας της γεωγραφικής περιοχής κάλυψης, για να εξασφαλίζεται αφενός η κάλυψη της υπό εξυπηρέτηση περιοχής και αφετέρου η ικανοποιητική στάθμη σήματος από τις κινητές συσκευές.

Ένας πομποδέκτης ήταν ικανός για κάλυψη μιας περιοχής με έκταση έως και 40 χιλιόμετρα. Σε περίπτωση που η στάθμη του σήματος ήταν χαμηλότερη από την απαιτούμενη για την κάλυψη των 40 χιλιομέτρων τότε υπήρχε σοβαρό ενδεχόμενο πρόκλησης παρεμβολών σε γειτονικά συστήματα κινητής τηλεφωνίας τα οποία χρησιμοποιούσαν την ίδια συχνότητα και βρίσκονταν σε αποστάσεις από 95 έως 160 χιλιόμετρα. Σαν αποτέλεσμα οι πομποδέκτες που έκαναν χρήση ίδιων συχνοτήτων με γειτονικούς τοποθετούνταν σε απόσταση ασφαλείας και εξυπηρετούσαν κινητές συσκευές που βρίσκονταν μέσα σε περιοχή 30 χιλιομέτρων για να μειωθούν τα φαινόμενα παρεμβολών και εξασθένισης του σήματος. Για την περαιτέρω ανάπτυξη της κινητής τηλεφωνίας και για να εξαληφθούν φαινόμενα παρεμβολών και εξασθένισης σήματος αναπτύχθηκαν οι τεχνολογίες επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων και κυτταρικής διάσπασης.

### 1.2.2. Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων

Η επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση ραδιοδιαύλων που χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες και βρίσκονται κατοχυρωμένοι σε διαφορετικές περιοχές σε επαρκή απόσταση μεταξύ τους έτσι ώστε να μην εμφανίζονται φαινόμενα παρεμβολών. Η διαφορά των κυψελωτών δικτύων έναντι των συμβατικών είναι πως για την κάλυψη της ίδιας γεωγραφικής περιοχής χρησιμοποιούνται περισσότεροι πομποδέκτες με χαμηλότερη ισχύ σε σημεία κλειδιά για την επαρκή ηλεκτρομαγνητική κάλυψη της περιοχής. Κάθε γεωγραφική περιοχή κάλυψης διαιρείται σε τομείς οι οποίοι ονομάζονται κύτταρα. Κάθε κύτταρο

περιλαμβάνει ένα σταθμό πομποδέκτη ο οποίος είναι υπεύθυνος για την εξυπηρέτηση των κινητών συσκευών που βρίσκονται υπό την κάλυψή του.



Εικόνα 1 Διαμοιρασμός των συχνοτήτων ανάμεσα στα κύτταρα

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρείται ο διαμοιρασμός των συχνοτήτων ανάμεσα στα κύτταρα τηρώντας τις αποστάσεις ασφαλείας μεταξύ τους έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η μη εμφάνιση φαινομένου παρεμβολών. Κάθε κύτταρο με ίδιο νούμερο (π.χ. F1) χρησιμοποιεί τις ίδιες συχνότητες με τα αντίστοιχα.

Ο αριθμός των εξυπηρετούμενων συνδρομητών από το σύστημα εξαρτάται τόσο από τις διαθέσιμες συχνότητες όσο και από τον αριθμό των κυττάρων που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη της περιοχής εξυπηρέτησης.

### 1.2.3. Κυτταρική Διάσπαση

Η αύξηση των συνδρομητών σε μία περιοχή δημιουργεί προβλήματα υπερφόρτωσης του δικτύου με αποτέλεσμα την αδυναμία εξυπηρέτησης των συνδρομητών. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το φαινόμενο εφαρμόζεται η κυτταρική διάσπαση. Η κυτταρική διάσπαση εφαρμόζεται με τεχνικά μέσα και έχει ως σκοπό την δυνατότητα χρήσης

περισσότερων συχνοτήτων μέσα στην περιοχή εξυπηρέτησης με αποτέλεσμα την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου.

Αν  $C$  ορίζεται ο αριθμός των διαθέσιμων συχνοτήτων συνολικά,  $N$  ορίζεται ως ο συνολικός αριθμός των κυττάρων στην περιοχή εξυπηρέτησης τότε ο αριθμός των διαθέσιμων συχνοτήτων ανά κύτταρο (με την μέθοδο της επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων) ορίζεται ο  $S=C/N$ . Επομένως κάθε κύτταρο περιέχει  $S$  συχνότητες. Η ζήτηση όμως για εξυπηρέτηση τις ώρες αιχμής μπορεί να υπερβαίνει τον μέγιστο αριθμό συνδρομητών προς εξυπηρέτηση που μπορεί να καλύψει το δίκτυο βάση των ανωτέρω συχνοτήτων. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι απαραίτητη η κυτταρική διάσπαση για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυξάνοντας την χωρητικότητα του δικτύου.

Λόγω του περιορισμένου αριθμού συχνοτήτων που έχουν δοθεί προς χρήση για τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας οι τεχνικές κυτταρικής διάσπασης και επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων είναι απαιτούμενα εργαλεία για την εξυπηρέτηση μεγάλου όγκου συνδρομητών.

## **1.2.4. Συχνότητες λειτουργίας**

### **1.2.4.1. GSM 900**

Το 1990 παραχωρήθηκε από την ITU ένα ζεύγος συχνοτήτων στα 890 MHz και στα 935 MHz με συνολικό εύρος 25 MHz έκαστος. Η περιοχή μεταξύ των 890 MHz και 915 MHz χρησιμοποιήθηκε για την μεταφορά δεδομένων από την κινητή συσκευή προς το σταθμό βάσης ενώ η περιοχή μεταξύ 935 MHz και 960 MHz χρησιμοποιήθηκε για την μεταφορά δεδομένων από τον σταθμό βάσης στην κινητή συσκευή.

Οι ζώνες των 25 MHz διαιρούνται κάθε μία σε 125 κανάλια (το ένα παραμένει ελεύθερο) με εύρος ζώνης 200 KHz για κάθε κανάλι. Με την χρήση της τεχνολογίας TDMA (πολυπλεξία χρόνου) επιτυγχάνεται η χρήση είτε 8 καναλιών φωνής πλήρη ταχύτητας ανά συχνότητα είτε 16 καναλιών μισής ταχύτητας. Ο χρόνος χωρίζεται σε 8 χρονοθυρίδες με διαδοχικές περιόδους ριπών ανά 4,615 ms οι οποίες αποτελούν ένα πλαίσιο TDMA. Το σύστημα επιτυγχάνει ρυθμό μεταφοράς δεδομένων 270,833 kbps.



Το 2000 η ITU αποφάσισε να δώσει περισσότερες εύρος συχνοτήτων για να αυξηθεί η χωρητικότητα στα δίκτυα που έκαναν χρήση του GSM 900 με αποτέλεσμα την εμφάνιση του E-GSM. Το E-GSM λειτουργεί όπως το GSM 900 παρόλα αυτά κάνει χρήση μεγαλύτερου εύρους συχνοτήτων και συγκεκριμένα από 880 MHz έως 915 MHz για το Up-Link και 925 MHz έως 960 MHz για το Down-Link.

#### **1.2.4.2. GSM 1800**

Το σύστημα DCS 1800 χρησιμοποιεί τις ίδιες αρχές λειτουργίας με το σύστημα GSM 900 αλλά χρησιμοποιεί διαφορετικά ζεύγη συχνοτήτων. Τα ζεύγη που έχουν δοθεί από την ITU αποτελούνται από τις συχνότητες 1710 MHz έως 1785 MHz για την μεταφορά δεδομένων από την κινητή συσκευή στον σταθμό βάσης και τις συχνότητες 1805 MHz έως 1880 MHz για την μεταφορά δεδομένων από το σταθμό βάσης στην κινητή συσκευή. Το εύρος των 75 MHz κάθε ζεύγους διαιρείται σε 375 κανάλια (το ένα παραμένει ελεύθερο) με εύρος 200 KHz έκαστος. Πολλά σημερινά δίκτυα στην Ευρώπη κάνουν χρήση τόσο των συχνοτήτων του GSM 900 όσο και των συχνοτήτων του GSM 1800 αυξάνοντας έτσι την χωρητικότητα των δικτύων τους.

Αξίζει να σημειωθεί πως η ισχύς εκπομπής των κινητών συσκευών μειώθηκε από τα 2 Watt μέγιστο που ίσχυε για τα δίκτυα GSM 900 στο 1 Watt μέγιστο που ισχύει για τα δίκτυα GSM 1800.

### 1.2.5. Ρυθμός Μεταφοράς Δεδομένων

Στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας που βασίζονται στο GSM χρησιμοποιούνται κωδικοποιητές φωνής για την συμπίεση του ήχου στα 3.1 KHz για να επιτευχθούν ρυθμοί μεταφοράς δεδομένων μεταξύ 5.6 kbps και 13 kbps. Για την κωδικοποίηση χρησιμοποιείται η τεχνολογία Linear Predicting Coding η οποία επιτρέπει την ευκολότερη αναγνώριση των σημαντικών τμημάτων του ήχου θέτοντας έτσι προτεραιότητα στην διαφύλαξη αυτών.

### 1.2.6. Είδη κυψελών

Υπάρχουν 5 διαφορετικοί τρόποι κυτταρικής κάλυψης μίας περιοχής. Οι κυψέλες τύπου Macro χρησιμοποιούν σταθμούς βάσης που βρίσκονται κυρίως σε ψηλά μέρη όπως ταράτσες κτιρίων ή στύλους. Οι κυψέλες τύπου Micro αποτελούνται από σταθμούς βάσης με ύψος κάτω του μέσου όρου των γειτονικών κτιρίων και συνήθως βρίσκονται σε αστικές περιοχές. Οι κυψέλες τύπου Pico χρησιμοποιούνται για την κάλυψη περιοχών όπου συναντάται σκίαση του σήματος του βασικού δικτύου ή μεγάλη μερίδα συνδρομητών και εξυπηρετούν λίγα μέτρα. Οι κυψέλες τύπου umbrella περιλαμβάνουν σταθμούς βάσης που τοποθετούνται κυρίως σε βουνά και υπερκαλύπτουν το σήμα των Macro και Micro ενώ αντιμετωπίζουν και τα κενά του σήματος στις σκιασμένες περιοχές. Τέλος για την καλύτερη κάλυψη εργασιακών και άλλων εμπορικών χώρων υπάρχουν οι κυψέλες τύπου Femto οι οποίες περιλαμβάνουν σταθμό βάσης που συνδέεται με το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας μέσω internet ή άλλων εξωτερικών τεχνολογιών.

Στην θεωρία το GSM μπορεί να καλύψει ακόμα και περιοχές με έκταση 35 χιλιομέτρων αλλά στην πράξη η κάλυψη σε ελεύθερες από εμπόδια περιοχές δεν ξεπερνάει τα λίγα χιλιόμετρα ενώ σε αστικά κέντρα δεν ξεπερνά τα 300 μέτρα. Η κάλυψη εξαρτάται κυρίως από την ισχύ εκπομπής, την συχνότητα εκπομπής αλλά και το χρόνο μεταφοράς του σήματος από και προς το σταθμό βάσης και την κινητή συσκευή.

Στο GSM χρησιμοποιείται η διαμόρφωση σήματος GMSK όπου πραγματοποιείται η διαμόρφωση ενός φέροντος σήματος το οποίο αρχικά έχει εξομαλυνθεί με την χρήση

ενός γκαουσιανού χαμηλοπέρατου φίλτρου. Αυτή η επεξεργασία μειώνει την πιθανότητα εμφάνισης φαινομένων παρεμβολής από γειτονικά κανάλια.

### **1.3. Αρχιτεκτονική GSM**

Το GSM χωρίζεται σε 3 υποσυστήματα: το κινητό σταθμό, το βασικό υποσύστημα σταθμού και το υποσύστημα δικτύου, τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους κάνοντας χρήση συγκεκριμένων πρωτοκόλλων και διεπαφών.

#### **1.3.1. Κινητός Σταθμός (MS)**

Το υποσύστημα αυτό αποτελείται από την κινητή συσκευή των συνδρομητών. Υπάρχει τεράστια ποικιλία συσκευών με διαφορετικές ικανότητες λειτουργίας παρόλα αυτά η αρχή λειτουργίας τους παραμένει η ίδια. Κάθε τέτοια συσκευή έχει μέγιστη ισχύ εκπομπής τα 2 Watt για την Ευρώπη και τα 1,6 Watt για την Αμερική και την Αυστραλία.

#### **1.3.2. Βασικό Υποσύστημα Σταθμού (BSS)**

Το βασικό υποσύστημα σταθμού (BSS) είναι ο συντονιστής των κεραιών μιας γεωγραφικής περιοχής και είναι υπεύθυνος για την διαχείριση των κλήσεων, των σημάτων σηματοδότησης και την προώθηση των πακέτων διαδικτυακής κίνησης. Χωρίζεται και αυτό σε 3 υποσυστήματα, το βασικό σταθμό πομποδέκτη (BTS), το βασικό σταθμό ελέγχου και την μονάδα υπερκωδίκευσης ρυθμού και προσαρμογής.

Ο Βασικός σταθμός (BTS) πομποδέκτη είναι υπεύθυνος για την επικοινωνία μεταξύ του κινητού σταθμού και του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Ένα BTS δύναται να ελέγχει μία ή και περισσότερες κεραιές με ισχύ εκπομπής από τα 40 Watt μέχρι τα 500 W. Κατά την διάρκεια έναρξης μιας κλήσης το BTS μεταφέρει το σήμα για κλήση από τον συνδρομητή A στο τηλεπικοινωνιακό κέντρο του παρόχου όπου αναγνωρίζεται ο πάροχος του συνδρομητή B για να προωθηθεί σε αυτόν. Ο πάροχος του συνδρομητή B στέλνει στο σήμα στο πλησιέστερο σταθμό βάσης που καλύπτει τον συνδρομητή και τέλος ο σταθμός βάσης προωθεί το σήμα στην κινητή συσκευή του συνδρομητή B. Μία GSM κεραία ενός σταθμού βάσης έχει παλμικό πεδίο με

κανάλια διάρκειας 4,616 ms ή 9,232 ms αναλόγως του αν είναι χωρισμένα σε 8 ή 16 διαστήματα (χρονοθυρίδες) διάρκειας 0,577 ms για το καθένα. Κάθε κανάλι μπορεί να εξυπηρετήσει δηλαδή 8 ή 16 συνδρομητές. Τα 8 ή 16 αυτά διαστήματα αποτελούν ένα πλαίσιο TDMA και αντιστοιχούν σε 156 bits.

Ο Βασικός σταθμός ελέγχου είναι ο διαχειριστής του BSS και φροντίζει για τις κεντρικές λειτουργίες του και τον έλεγχο του υποσυστήματος. Συγκεντρώνει και ελέγχει τα σήματα από ένα σύνολο BTS ενώ εκχωρεί και απελευθερώνει κανάλια. Επίσης είναι υπεύθυνο για την προώθηση των σημάτων στο MSC.

Η μονάδα υπεκωδίκευσης ρυθμού και προσαρμογής (TRAU) είναι από τα σημαντικότερα στοιχεία ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας καθώς από αυτό εξαρτάται η αποτελεσματικότητα χρήσης των διαθέσιμων συχνοτήτων και τελικά ο αριθμός των κλήσεων που δύναται να πραγματοποιηθούν χρησιμοποιώντας ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων. Ο αριθμός αυτός αυξάνεται με μεθόδους συμπίεσης δεδομένων οι οποίες εφαρμόζονται στην κινητή συσκευή και στο TRAU.

### **1.3.3. Υποσύστημα Δικτύου Μεταγωγής (NNS)**

Το υποσύστημα αυτό είναι υπεύθυνο για την διαχείριση των λειτουργιών μεταγωγής του συστήματος. Εκτελεί τις κυριότερες λειτουργίες μεταγωγής, διατηρεί βάση δεδομένων με τους συνδρομητές και διαχειρίζεται την κινητικότητα των χρηστών. Το NNS αποτελεί τον συνδετικό κρίκο μεταξύ του δικτύου κινητής τηλεφωνίας GSM και των άλλων τηλεπικοινωνιακών παρόχων (π.χ. δίκτυο σταθερής τηλεφωνίας) και εξασφαλίζει την επικοινωνιακή σύνδεση των κινητών σταθμών με κινητούς σταθμούς σε άλλα δίκτυα ή και στο ίδιο ενώ ελέγχει και τα πρωτόκολλα σηματοδοσίας. Οι λειτουργίες μεταγωγής στο υποσύστημα εκτελούνται από το MSC ενώ τα στοιχεία των συνδρομητών για προσβάσεις και υπηρεσίες αποθηκεύονται στην HLR. Οι πληροφορίες των εποχικών συνδρομητών αποθηκεύονται στην VLR.

Το MSC είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση των απαραίτητων ενεργειών μεταγωγής για κινητούς σταθμούς σε συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή κάλυψης που ονομάζεται MSC Area. Συγκεκριμένα διαχειρίζεται τους απαραίτητους πόρους για την διαδικασία εγγραφής θέσης, την αδιάλειπτη εκτέλεση των λειτουργιών διαπομπής την χρέωση των συνδρομητών και τον έλεγχο της επικοινωνίας με την απελευθέρωση των συνδέσεων. Επίσης στο MSC εκτελείται έλεγχος κλήσεων,

ακύρωση ακουστικής ηχούς και λειτουργίες δρομολόγησης. Τέλος η φυσική διασύνδεση του δικτύου κινητής τηλεφωνίας με άλλα σταθερά δίκτυα (ISDN, PSTN) βρίσκεται στο MSC ενώ εκεί λαμβάνουν χώρα και όλες οι απαραίτητες λειτουργίες για την επίτευξη αυτού.

Η HLR αποτελεί την κεντρική βάση δεδομένων ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Περιέχει πληροφορίες συνδρομητών σχετικά με παραμέτρους αυθεντικότητας, την θέση της κινητής συσκευής (σε ποιο MSC βρίσκεται), και τυχών συμπληρωματικές υπηρεσίες που λαμβάνει ο χρήστης. Δεδομένου πως το κινητό κινείται ανάμεσα σε διαφορετικές περιοχές MSC, η HLR ενημερώνεται συνεχώς για την νέα θέση του κινητού μέσω των MSC/VLR. Οι πληροφορίες που αποθηκεύονται στην HLR επιτρέπουν και την σωστή δρομολόγηση των εισερχόμενων κλήσεων στο κατάλληλο κέντρο μεταγωγής. Στην βάση δεδομένων HLR αποθηκεύονται επίσης πληροφορίες όπως το η ταυτότητα IMSI, ο αριθμός MSIDN και η διεύθυνση της VLR. Ένα δίκτυο μπορεί να περιλαμβάνει πολλές HLR αναλόγως του μεγέθους και την πολυπλοκότητάς του. Η εγγραφή ενός συνδρομητή στην HLR πραγματοποιείται αυτόματα με την αγορά συνδρομής σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας.

Η VLR αποτελεί το σύστημα αποθήκευσης των πληροφοριών των εποχικών συνδρομητών με δυναμικό τρόπο όταν αυτοί βρίσκονται σε περιοχή κάλυψής της. Όταν μια ενεργοποιημένη κινητή συσκευή με περιαγωγή εισέλθει σε περιοχή ελέγχου άλλου MSC τότε η νέα VLR ζητά πληροφορίες για την καινούργια θέση της κινητής συσκευής και ενημερώνει την HLR για αυτή ενώ στη συνέχεια σβήνεται η θέση από την προηγούμενη VLR. Στην VLR μεταξύ άλλων περιλαμβάνεται ο αριθμός MSRN, η ταυτότητα TMSI, η περιοχή εντοπισμού της κινητής συσκευής, ο αριθμός MS ISDN, η διεύθυνση HLR και η ταυτότητα IMSI.

Το GMSC συλλέγει την πληροφορία για την θέση μιας κινητής συσκευής και επικοινωνώντας με το κατάλληλο HLR βάση του αριθμού καταλόγου του συνδρομητή ζητά των εντοπισμό δεδομένων και δρομολογεί την κλήση στο κατάλληλο MSC. Όλες οι εισερχόμενες κλήσεις προς το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας δρομολογούνται σε ένα ή περισσότερα GMSC που συνδέουν τα συστήματα GSM/PLMN με εξωτερικά δίκτυα. Τέλος διαχειρίζεται κανάλια σηματοδότησης του δικτύου SS7 για αλληλεπίδραση με άλλα υποσυστήματα του NSS.

Το OMSS εξασφαλίζει την ασφάλεια του συστήματος. Για να διατηρηθεί η ασφάλεια είναι απαραίτητος ο έλεγχος ταυτότητας των διάφορων τηλεπικοινωνιακών οντοτήτων. Είναι επίσης υπεύθυνο για την απομακρυσμένη λειτουργία και συντήρηση του δικτύου μέσω της χρήσης NMCs. Χωρίζεται σε 2 υποσυστήματα για την εκτέλεση των λειτουργιών.

- Το AUC (Authentication Centre): Στο συγκεκριμένο υποσύστημα επιτυγχάνεται η πρόσβαση του συστήματος μέσω της HLR και γίνεται έλεγχος αν στον κινητό σταθμό επιτρέπεται η χορήγηση συγκεκριμένων υπηρεσιών. Πιστοποιεί την αυθεντικότητα των χρηστών και βοηθά στην κρυπτογράφηση των δεδομένων των συνδρομητών για την ασφαλή διακίνηση των δεδομένων.
- Το EIR (Equipment Identity Register): είναι μια βάση δεδομένων που διατηρεί πληροφορίες σχετικά με τους νόμιμους, τους παράνομους και τους τυχών ελλαττωματικούς κινητούς σταθμούς. Η EIR παρέχει στο MSC μέσω σημάτων σηματοδοσίας λίστες με αριθμούς που τους επιτρέπεται η χρήση του δικτύου, με αριθμούς υπό παρακολούθηση και με αριθμούς που τους απαγορεύεται η πρόσβαση στο δίκτυο.

Η συνολική επιτήρηση, συντήρηση και παραμετροποίηση του συστήματος γίνεται μέσω του κέντρου λειτουργίας και συντήρησης (OMC).

#### **1.3.4. Μονάδα Αναγνώρισης Συνδρομητή (SIM)**

Η κάρτα SIM είναι μια έξυπνη αποσπώμενη κάρτα που τοποθετείτε στις κινητές συσκευές και επιτρέπει την αναγνώριση της ταυτότητας του συνδρομητή. Αυτή η κάρτα διατίθεται από τον παροχέα και αποτελεί την ταυτότητα για έναν συνδρομητή αφού περιλαμβάνει απαραίτητες πληροφορίες για αυτόν και για το δίκτυο του με το οποίο συνδέεται, καθώς και μια περιορισμένη ποσότητα μνήμης. Από τη στιγμή που θα αφαιρεθεί από τη κινητή μονάδα, η κινητή μονάδα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί πέραν από κλήσεις ανάγκης εκτατού ανάγκης (112). Μια κάρτα SIM διαθέτει έναν μικροεπεξεργαστή, μια μνήμη ROM που χρησιμοποιείται για τις λειτουργίες του δικτύου (αναγνωριστικά, πιστοποίηση κτλ.) και μια μνήμη EPROM που την χρησιμοποιεί ο χρήστης για τα δικά του προσωπικά δεδομένα.

## **1.4. Τεχνολογίες Πολυπλεξίας και Σηματοδοσίας**

### **1.4.1. Πολυπλεξία Χρόνου (TDMA)**

Η τεχνική TDMA χρησιμοποιείται ευρέως στα ψηφιακά συστήματα κινητών επικοινωνιών. Με την τεχνική αυτή, κάθε χρήστης καταλαμβάνει μία συγκεκριμένη χρονοθυρίδα (time-slot) στην οποία μπορεί να εκπέμψει. Οι χρονοθυρίδες αυτές έχουν πολύ μικρή διάρκεια και επαναλαμβάνονται συνεχώς με κυκλικό τρόπο. Έτσι, η κάθε συσκευή περιμένει μέχρι να έρθει η σειρά της να εκπέμψει, περιμένοντας όλους τους άλλους χρήστες να εκπέμψουν τα δικά τους σήματα. Όταν έρθει η σειρά ενός χρήστη, η συσκευή του εκπέμπει για όσο χρόνο διαρκεί η χρονοθυρίδα του και κατόπιν διακόπτει τη μετάδοση, έως ότου ξαναέρθει η σειρά της δικής του χρονοθυρίδας. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η εκπομπή στην TDMA είναι διακοπτόμενη. Αυτό ίσως φαίνεται παράδοξο, αλλά καθώς ο χρήστης της κινητής τηλεφωνίας δεν το αντιλαμβάνεται διότι οι εναλλαγές των χρονοθυρίδων γίνονται με πολύ γρήγορο ρυθμό (εκατοντάδες φορές το δευτερόλεπτο), ώστε η συνομιλία να φαίνεται συνεχής. Με την τεχνική αυτή, με έναν πομποδέκτη ο σταθμός βάσης μπορεί να εξυπηρετήσει πολλούς χρήστες. Το βασικότερο πλεονέκτημα της TDMA είναι η μεγαλύτερη χωρητικότητα και φασματική απόδοση.

### **1.4.2. Πολυπλεξία Συχνοτήτων (FDMA)**

Η τεχνική FDMA χρησιμοποιήθηκε κυρίως στα παλιά αναλογικά συστήματα κινητής τηλεφωνίας, και σύμφωνα με αυτήν, σε κάθε χρήστη ανατίθεται μία διαφορετική συχνότητα. Οι χρήστες δηλαδή, χρησιμοποιούν ταυτόχρονα το κοινό μέσο, αλλά διαχωρίζονται μεταξύ τους στο πεδίο της συχνότητας. Η τεχνική αυτή χαρακτηρίζεται από χαμηλή χωρητικότητα αλλά έχει το πλεονέκτημα του χαμηλού κόστους υλοποίησης για τις κινητές συσκευές, καθώς απαιτείται ένας απλός FM πομποδέκτης. Αντίθετα, το κόστος του σταθμού βάσης είναι ιδιαίτερα υψηλό, καθώς απαιτούνται τόσοι πομποδέκτες, όσες και διαθέσιμες συχνότητες. Ένα άλλο βασικό μειονέκτημα της FDMA είναι η υψηλή κατανάλωση ισχύος.

Ένα σημαντικό όμως πλεονέκτημα της FDMA είναι ότι δεν απαιτεί ιδιαίτερα κυκλώματα συγχρονισμού μεταξύ των σταθμών βάσης και των κινητών σταθμών, όπως απαιτείται από την τεχνική TDMA.

### **1.4.3. Πολυπλεξία Κώδικα (CDMA)**

Η τεχνική Διαμοιρασμού Κώδικα είναι η πιο σύγχρονη από τις άλλες δύο. Σε αυτήν, όλοι οι χρήστες χρησιμοποιούν ταυτόχρονα το κοινό μέσο τόσο στο πεδίο της συχνότητας, όσο και στο πεδίο του χρόνου. Στην τεχνική CDMA, το εύρος συχνοτήτων είναι κοινό για όλους τους χρήστες, οι οποίοι διαχωρίζονται μεταξύ τους διότι ο κάθε χρήστης κωδικοποιεί τα σήματά του με ένα μοναδικό ψηφιακό κωδικό. Οι κωδικοί αυτοί είναι προσεκτικά σχεδιασμένοι ώστε να έχουν ένα σημαντικό χαρακτηριστικό, που ονομάζεται ορθογωνιότητα. Η ιδιότητα αυτή των κωδικών επιτρέπει στα σήματα από διαφορετικούς χρήστες να παραμένουν ανεξάρτητα μεταξύ τους. Έτσι, όταν ο δέκτης επιχειρεί να αποκωδικοποιήσει τα σήματα ενός χρήστη, εφαρμόζει τον μοναδικό του κωδικό-κλειδί, με αποτέλεσμα τα σήματα όλων των υπολοίπων χρηστών να εξαλείφονται. Όπως είναι φανερό, εξαιτίας της κοινής χρήσης των συχνοτήτων από όλους τους χρήστες, η τεχνική αυτή αναφέρεται και ως καθολική επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων.

### **1.4.4. Φυσικά και Λογικά Κανάλια**

Το GSM χρησιμοποιεί ένα TDMA πλαίσιο το οποίο επιτρέπει 8 φυσικά κανάλια ανά συχνότητα φορέα στο GSM.

Φυσικό κανάλι καλείτε κάθε χρονοθυρίδα σε ένα TDMA πλαίσιο. Το κάθε ένα από αυτά τα φυσικά κανάλια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μεταφέρει πληροφορία φωνής, δεδομένων και σηματοδοσίας στην διεπαφή του αέρα.

Οι πληροφορίες αυτές δομούνται και μεταφέρονται μέσω των λεγόμενων λογικών καναλιών.

Τα λογικά κανάλια χρειάζονται όμως τα φυσικά κανάλια, επομένως απεικονίζονται στα φυσικά κανάλια με χρονική πολυπλεξία απεικόνισης. Ο τρόπος που γίνεται η απεικόνιση αυτή είναι μέσω της δημιουργίας ρίπων ( bursts ) στην διεπαφή του αέρα.

Υπάρχουν διαφορετικά είδη λογικών καναλιών , αναλόγως της λογικής πληροφορίας



που μεταφέρουν, επομένως και αυτά απεικονίζονται αντίστοιχα στα φυσικά κανάλια με διαφορετικά bursts.

Τα λογικά κανάλια χωρίζονται σε 3 κατηγορίες στα :

- Κανάλια ελέγχου
- Κανάλια πληροφορίας
- Κανάλια κοινού ελέγχου

#### **1.4.4.1. Κανάλια Ελέγχου**

Τα κανάλια αυτού του τύπου δε μεταφέρουν πληροφορίες χρηστών, αλλά χρησιμοποιούνται για την ανταλλαγή μηνυμάτων ελέγχου μεταξύ του δικτύου και των ραδιοπομπών για να εξασφαλιστεί ότι η διαχείριση της επικοινωνίας γίνεται με αποδοτικό τρόπο και ότι όλα πάνε καλά.

Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται για την μετάδοση πληροφορίας και σηματοδοσίας προς τις φορητές συσκευές είτε αυτές βρίσκονται σε κατάσταση αναμονής είτε είναι απασχολημένες μέσα στο κύτταρο.

Υπάρχουν τρεις διαφορετικές κατηγορίες καναλιών ελέγχου :

1. BCH - κανάλια εκπομπής
2. CCCH - κανάλια ελέγχου κοινής χρήσης
3. DCCH – αφιερωμένα κανάλια ελέγχου

#### **Κανάλια Εκπομπής (BCH)**

Αυτά τα λογικά κανάλια μεταδίδονται μόνο από τα BTSs και ο σκοπός τους είναι να παρέχουν αρκετή πληροφόρηση στους κινητούς σταθμούς έτσι ώστε να μπορούν να συγχρονιστούν με το δίκτυο. Τα MSs δε μεταδίδουν ποτέ σε ένα BCH.

Τα κανάλια εκπομπής χωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες:

- Το κανάλι FFCH - Κανάλι διόρθωσης συχνότητας
- Το κανάλι SCH - Κανάλι συγχρονισμού
- Το κανάλι BCCH - Κανάλι εκπομπής Ελέγχου

### **Λογικό Κανάλι FCCH**

Ο τύπος αυτός αντιστοιχεί σε μια frequency correction burst. Το λογικό κανάλι FCCH περιέχει αδιαμόρφωτη πληροφορία η οποία περιέχει συνεχείς ακολουθίες μηδενικών .

Η απεικόνιση στο φυσικό κανάλι γίνεται με την χρήση ριπής Frequency Correction Bursts. Εντός της ριπής περιέχονται ακολουθίες από μηδενικά bits. Αυτό εξυπηρετεί 2 σκοπούς :

A) αρχικά η φορητή συσκευή διαβάζοντας ένα κανάλι FCCH αντιλαμβάνεται ότι έχουμε την εκπομπή ενός λογικού καναλιού BCCH στον φυσικό φορέα TRX στο φυσικό κανάλι timeslot 0.

B) η φορητή συσκευή από τη συνεχή ακολουθία των μηδενικών bits μπορεί να ανακτήσει την συχνότητα του φέροντος TRX.

### **Λογικό Κανάλι SCH**

Αφού έχει επιτευχθεί αναγνώριση του φορέα TRX του λογικού καναλιού BCCH, η φορητή μονάδα MS πρέπει να συγχρονιστεί στην δομή του πλαισίου των 8 θυρίδων της διεπαφής του αέρα. Επιπροσθέτως η φορητή μονάδα πρέπει να επιβεβαιώσει την ταυτότητα του κυττάρου μιας και κάθε κύτταρο χρησιμοποιεί περισσότερες από μια συχνότητες οι οποίες επαναχρησιμοποιούνται μέσα στο δίκτυο. Άρα πλήρης συγχρονισμός με το BTS.

Έτσι το κανάλι SCH απεικονίζεται στο φυσικό κανάλι χρησιμοποιώντας ριπή synchronization Burst και είναι γνωστό τόσο από τη φορητή μονάδα στο downlink όσο και από το BTS.

## **Λογικό Κανάλι BCCH**

Ένα από τα βασικότερα κανάλια του δικτύου είναι το λογικό κανάλι BCCH. Είναι αρκετά σημαντικό δεδομένου ότι ο κυτταρικός σχεδιασμός περιλαμβάνει ξεχωριστή μπάνα συχνοτήτων για την επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων φορέων TRX για το BCCH καθώς και ξεχωριστές για τους φορείς TRX που μεταφέρουν κανάλια ομιλίας.

Το BCCH χρησιμοποιείται από το κυψελοειδές πρότυπο GSM για την αποστολή πληροφοριών σχετικά με την ταυτότητα του δικτύου, και αυτή η πληροφορία χρησιμοποιείται από έναν κινητό σταθμό με σκοπό να του επιτραπεί η πρόσβαση στο δίκτυο.

Εντός του καναλιού αυτού υπάρχουν οι πληροφορίες οι οποίες αφορούν παραμέτρους για την ορθή λειτουργία της φορητής μονάδας εντός του κυττάρου και στις 2 καταστάσεις idle και busy mode. Αυτές οι πληροφορίες περιλαμβάνουν τον κώδικα του δικτύου κινητής τηλεφωνίας (MNC), πληροφορίες σχετικά το LAC (Location Area Code) καθώς επίσης και μια λίστα με τις συχνότητες που χρησιμοποιούνται από τα γειτονικά κύτταρα διότι δεν πρέπει στην ίδια περιοχή να υπάρχει κύτταρο με τον ίδιο συνδυασμό συχνότητας και BSIC. Οι πληροφορίες που περιλαμβάνει αφορούν παραμέτρους επιλογής κυττάρου εξυπηρέτησης, παραμέτρους υπολογισμού λειτουργικών διαδικασιών, γειτονικές συχνότητες BSIC κυττάρων, για την εκτέλεση μετρήσεων σε κατάσταση αδράνειας, οι οποίες και οδηγούν στην επανεπιλογή cell καθώς και στην εκτέλεση μετρήσεων, όταν το σύστημα χρησιμοποιείται, οι οποίες οδηγούν σε handovers το PLMN id του δικτύου. Επίσης το BCCH περιλαμβάνει την ταυτότητα περιοχής θέσης και την ταυτότητα του κυττάρου (CGI).

Το λογικό κανάλι BCCH απεικονίζεται σε φυσικό κανάλι μέσω ριπής normal burst και μεταδίδεται μόνο από τα BTS στα κινητά τηλέφωνα. Όταν ένα MS βρεθεί εντός ενός καινούργιου κυττάρου είναι επιτακτική ανάγκη να διαβάσει πρώτα το λογικό κανάλι FCCH ώστε να μάθει την συχνότητα του φορέα TRX και να διαβάσει το SCH ώστε να συγχρονιστεί στο frame και να μπορεί ενταχθεί στο timeslot ώστε να μην υπάρχει άλλο κύτταρο με την ίδια συχνότητα ή με το ίδιο BSIC και φυσικά στο τέλος να διαβάσει το BCCH.

#### 1.4.4.2. Κανάλια Ελέγχου Κοινής Χρήστης (CCCH)

Τα κοινά κανάλια ελέγχου - Common Control CHannels (CCCH). Οι τύποι αυτοί λογικών καναλιών χρησιμοποιούνται για την εγκατάσταση μιας σύνδεσης μεταξύ ενός MS και ενός BTS. Χωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες:

- Κανάλι τυχαίας πρόσβασης - Random Access CHannel (RACH).
- Κανάλι χορήγησης πρόσβασης - Access Grant CHannel (AGCH).
- Κανάλι Ειδοποίησης - Paging CHannel (PCH)

#### Κανάλι Τυχαίας Πρόσβασης (RACH)

Αυτό χρησιμοποιείται από το MS για να ζητήσει ένα αποκλειστικό κανάλι από το δίκτυο. Το RACH δε χρησιμοποιείται ποτέ από το BTS ενώ αντιστοιχεί σε μια random access burst.

Το RACH κανάλι είναι ο διαβιβαστής της επικοινωνίας μεταξύ της φορητής μονάδας με το δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα όταν η φορητή μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση αδράνειας, δεν γνωρίζει τίποτα σχετικά με την δομή του κυττάρου. Έτσι κάποιος πρέπει να αναλάβει την επικοινωνία και να ειδοποιεί το δίκτυο ότι χρειάζεται να συνδεθεί και να ανταλλάξουν μηνύματα σηματοδότησης.

Η διαδικασία αυτή θυμίζει αρκετά αίθουσα συνεδριάσεων. Σε ένα συνέδριο υπάρχουν πολλά ακόμα που παρακολουθούν τον ομιλητή να εξηγεί και να μεταφέρει πληροφορίες. Εάν ένας σύνεδρος θέλει να θέσει κάποια ερώτηση η να τοποθετηθεί σε ένα θέμα δεν μπορεί να διακόψει την ομιλία του ομιλητή αλλά πρέπει να περιμένει να πάρει την άδεια να μιλήσει.

Έτσι κάνει και η φορητή μονάδα. Η φορητή μονάδα λέει στο κανάλι RACH να ζητήσει άδεια επικοινωνίας και αυτά επιτυγχάνετε με ένα μήνυμα σηματοδότησης στην χρονοθυρίδα- timeslot από το κανάλι RACH στο BTS.

Η ίδια διαδικασία συμβαίνει όταν μια φορητή μονάδα θέλει να στείλει πρώτη χωρίς να περιμένει να ανταποκριθεί όπως στην προηγούμενη περίπτωση πχ πραγματοποίηση κλήσης από ένα συνδρομητή. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται MOCC Mobile Originating Call Connection. Το κανάλι απεικονίζεται στο φυσικό

κανάλι μέσω ριπής access burst και μεταδίδεται μόνο από την φορητή μονάδα MS προς τον σταθμό βάσης BTS στο uplink.

### **Κανάλι Χορήγησης Πρόσβασης (AGCH)**

Το κανάλι AGCH παίζει τον ρόλο του σήματος αδειοδότησης , δηλαδή όπως όταν σύνεδρος σηκώσει το χέρι του για να λάβει τον λόγο να μιλήσει και να πάρει άδεια από το προεδρείο έτσι και σε ένα τηλεπικοινωνιακό ασύρματο δίκτυο τον ρόλο αδειοδότησης του σήματος από το προεδρείο προς τον σύνεδρο το παίζει το κανάλι AGCH .

Η συγκεκριμένη τεχνική είναι σχετικά απλή , όταν ο σταθμός βάσης διαβάσει στο uplink RACH κανάλι τη μεταφερόμενη αίτηση επικοινωνίας μιας φορητής συσκευής τότε πρώτα βρίσκει και δεσμεύει το απαιτούμενο κανάλι επικοινωνίας το οποίο χρειάζεται για να χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία του BTS και του MS. Στην συνέχεια σηματοδοτεί το σήμα προς το MS τοποθετώντας το εντός ενός λογικού μηνύματος στο κανάλι AGCH. Το λογικό αυτό μήνυμα ονομάζεται Immediate Assignment Message. Το λογικό κανάλι ACGH απεικονίζεται στο φυσικό κανάλι μέσω ριπής Normal Burst και μεταδίδεται μόνο από τον σταθμό βάσης στην φορητή μονάδα στο downlink.

### **Κανάλι Ειδοποίησης (PCH)**

Η διαδικασία ειδοποίησης (paging )συμβαίνει για να εντοπιστεί και να ειδοποιηθεί μία συσκευή από το δίκτυο ότι υπάρχει τερματιζόμενη υπηρεσία προς αυτή.

Η διαδικασία αυτή βασίζεται στην αποστολή μηνυμάτων ειδοποίησης συνδρομητή χρησιμοποιώντας το IMSI του καλούμενου συνδρομητή. Το δίκτυο στέλνει ένα μήνυμα ειδοποίησης σε όλα τα BSC και σε όλα τα κύτταρα που βρίσκονται στο ίδιο LAC με τον συνδρομητή που αναζητείται. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα το MS ακούει το κανάλι PCH για να εξετάσει αν υπάρχει κάποια τερματιζόμενη υπηρεσία προς αυτό (π.χ. κλήση ή sms).

Οι πληροφορίες που περιλαμβάνονται σε ένα μήνυμα paging αφορούν τους λόγους ειδοποίησης, το IMSI, το TMSI και άλλες πληροφορίες.

Το λογικό κανάλι PCH απεικονίζεται στο φυσικό κανάλι μέσω ριπής Normal Burst και μεταδίδεται μόνο από το BTS προς τις φορητές μονάδες στο downlink.

#### **1.4.4.3. Αφιερωμένα Κανάλια Ελέγχου (DCCH)**

Τα αφιερωμένα κανάλια ελέγχου αποτελούνται από:

- Το κανάλι SDCCH
- Το κανάλι SACCH
- Το κανάλι FACCH
- Το κανάλι CBCH

#### **Κανάλι Ελέγχου SDCCH**

Συνεχίζοντας το παράδειγμα του συνέδρου μένει ένα σημείο προς μελέτη. Σε αυτό το παράδειγμα ο ακροατής μιλάει και μέσω του αέρα η πληροφορία φθάνει στον ομιλητή και μέσω τον ακουστικών φωνητικών πληροφοριών έχουμε την μεταφορά της πληροφορίας χωρίς κάποια άλλη συνεννόηση.

Κάτι τέτοιο πρέπει να κάνει η MS συσκευή, με την διαφορά ότι εδώ τα πράγματα δεν είναι αυτονόητα μεταξύ της επικοινωνίας, οπότε αφού η συσκευή έλαβε το μήνυμα εξουσιοδότησης της επικοινωνίας πρέπει να βρει πως θα ξεκινήσει να αποστείλει την πληροφορία.

Ο μόνος τρόπος να γίνει αυτό σε ένα GSM δίκτυο είναι να δεσμεύσει κάποιο άλλο κανάλι ,ένα λογικό κανάλι το οποίο θα απεικονίζεται σε κάποιο φυσικό κανάλι μέσω του οποίου θα αρχίσει την επικοινωνία. Όμως δεν ξέρει ποιο είναι αυτό το κανάλι και σε ποια συχνότητα θα πρέπει να συνδεθεί- συντονιστεί ώστε να το δεσμεύσει και να το χρησιμοποιήσει. Εδώ βοηθάει το λογικό μήνυμα Immediate Assignment Message που αποστέλλεται μέσω του SDCCH καναλιού.

Αυτό το κανάλι πέρα από την αδειοδότηση επικοινωνίας εσωκλείει και την πληροφορία της συχνότητας, της χρονοθυρίδας και του υποκαναλιού το οποίο έχει δεσμευτεί γι αυτήν την επικοινωνία.

Επομένως το SDCCH κανάλι χρησιμοποιείται και για την αποστολή στο uplink και για την λήψη στο downlink του MS και του BTS. Είναι ένα κατεξοχήν κανάλι επικοινωνίας αποστολής μηνυμάτων σηματοδοσίας στην διεπαφή του αέρα και χρησιμοποιείται πάντα στην φάση του call setup. Επιπλέον αυτό το κανάλι χρησιμοποιείται στην αποστολή και λήψης SMS. Η απεικόνιση του SDCCH καναλιού στο φυσικό κανάλι γίνεται μέσω της ριπής Normal Burst.

### **Κανάλι Ελέγχου SACCH**

Το λογικό κανάλι SACCH είναι ένα ειδικό κανάλι. Για να συνδεθεί μία φορητή μονάδα στο δίκτυο θα πρέπει να περάσει επιτυχώς δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η αποστολή όλων των απαιτούμενων μηνυμάτων σηματοδοσίας ώστε να αποκτήσει την πρόσβαση (πρώιμη φάση του call setup) και εν συνεχεία στη δεύτερη φάση να δεσμεύσει ένα κανάλι ομιλίας TCH (TCH reservation) το οποίο και θα χρησιμοποιήσει στη φάση της μετάδοσης της φωνητικής πληροφορίας (ύστερη φάση call setup). Σε όλη αυτή τη φάση της εκτέλεσης τα σηματοδοσίας κλήσης το μοναδικό κανάλι που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία είναι το κανάλι SDCCH.

Όμως μετά την έναρξη φωνητικής επικοινωνίας η φορητή μονάδα δεν μπορεί πλέον να ξαναχρησιμοποιήσει ένα κανάλι SDCCH, διότι έχει συντονιστεί ενδεχομένως σε άλλη συχνότητα και άλλη χρονοθυρίδα στην οποία βρίσκεται το TCH και είναι συνεχώς απασχολημένο με την αποστολή και λήψη ριπών φωνής για το αδιάλειπτο της επικοινωνίας. Έτσι εάν το δίκτυο χρειάζεται να επικοινωνήσει με τη φορητή μονάδα μέσω μηνυμάτων σηματοδοσίας θα ήταν αδύνατο να γίνει (βασικά η φορητή μονάδα δεν έχει χρόνο να συντονίζεται σε άλλη συχνότητα και σε άλλο timeslot που βρίσκεται το SDCCH).

Το κανάλι SACCH χρησιμοποιείται στη διάρκεια που η φορητή μονάδα είναι συνδεδεμένη με το δίκτυο (busy mode) για δύο λόγους. Στο downlink χρησιμοποιείται από το δίκτυο, ώστε να αποστείλει το BTS στο MS ενημέρωση σχετικά με την καθυστέρηση την οποία υφίσταται η λήψη το uplink frames από το σταθμό βάσης BTS λόγω της απόστασης της φορητής μονάδος (πληροφορία η οποία ονομάζεται Time Advance TA και η οποία χρησιμοποιείται από τη φορητή μονάδα για να αποστείλει τα επόμενα frames με χρονική προπόρευση), πληροφορίες που αφορούν τις παραμέτρους του BCCH οι οποίες δεν μπορούν να ληφθούν κατά τη

διάρκεια της επικοινωνίας σε busy mode, την αποστολή μηνυμάτων ελέγχου ισχύος εκπομπής (Power Control) ή τη λήψη ενός Mobile Terminating SMS. Όλοι οι αναγνώστες θα έχουν την εμπειρία τουλάχιστον μία φορά στα χρονικά που χρησιμοποιούν τη συσκευή τους να λάβουν ένα SMS με τη χαρακτηριστική ηχητική τονική ενημέρωση ενός διακριτικού ήχου από τη συσκευή ενόσω είναι συνδεδεμένοι σε μία κλήση. Αυτό το γραπτό μήνυμα ελήφθη μέσω του καναλιού SACCH.

Στο uplink χρησιμοποιείται από τη φορητή μονάδα για την αποστολή μηνυμάτων προς το BTS τα οποία αφορούν μετρήσεις της ισχύος λήψης (signal strength, SS ή στην ορολογία της 3GPP RXlev) του κυττάρου εξυπηρέτησης - serving cell - και των γειτονικών κυττάρων, μετρήσεις της ποιότητας επικοινωνίας (Quality, RXqual) του κυττάρου εξυπηρέτησης οι οποίες στην ουσία απεικονίζουν το Bit Error Rate BER ή το Block Error Rate BLER της επικοινωνίας.

Οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιούνται από το δίκτυο (συνήθως BSC και περιστασιακά BTS) ώστε να υπολογιστούν ο λόγος C/I της downlink επικοινωνίας και η ποιότητα επικοινωνίας, υπολογισμοί οι οποίοι οδηγούν σε αποφάσεις εκτέλεσης handover. Εφόσον η χρήση του SACCH είναι αμφίδρομη το συναντάμε και στο uplink και στο downlink και η απεικόνιση του στο φυσικό κανάλι timeslot γίνεται μέσω ριπής Normal Burst.

### **Κανάλι Ελέγχου FACCH**

Η κινητικότητα του συνδρομητή επιβάλλει τη διατήρηση της κλήσης για όσο χρονικό διάστημα ο χρήστης επιθυμεί να παραμείνει συνδεδεμένος. Αυτό ονομάζεται δυνατότητα διατήρησης της επικοινωνίας (retainability) ή αδιάλειπτη επικοινωνία της κλήσης, αποτελεί ένα από τα κριτήρια της ποιότητας υπηρεσίας του δικτύου (Quality of Service QoS) και επιτυγχάνεται με τη διαδικασία της εκτέλεσης των handovers.

Ένα handover είναι μια διαδικασία κατά την οποία μία φορητή συσκευή κινείται στο δίκτυο με συνέπεια την ανάγκη μεταγωγής της κλήσης από ένα κύτταρο (το επονομαζόμενο κύτταρο εξυπηρέτησης serving cell) σε ένα άλλο (το επονομαζόμενο target cell). Εφόσον όμως ο συνδρομητής είναι συνδεδεμένος σε μία φωνητική κλήση, αυτό αυτομάτως σημαίνει ότι η φορητή συσκευή είναι συντονισμένη σε μία



συχνότητα και σε ένα timeslot του πολυπλαισίου της διεπαφής αέρα (FDMA/TDMA). Επομένως μεταγωγή κλήσης σημαίνει συντονισμός σε άλλη συχνότητα και άλλο timeslot με ταυτόχρονη αλλαγή του μονοπατιού σύνδεσης.

Θα πρέπει να προβλεφθεί μια διαδικασία ενημέρωσης της φορητής συσκευής από το δίκτυο σχετικά με τη μεταγωγή. Το κανάλι το οποίο αναλαμβάνει να μεταφέρει τις απαραίτητες πληροφορίες είναι το FACCH. Εφόσον η συσκευή είναι συνδεδεμένη στο service cell και λαμβάνει κάθε 4,615 ms ριπές από φωνητικές πληροφορίες θα πρέπει να σταλούν και κάποιες πληροφορίες διασύνδεσης αυτό συμβαίνει μέσω υποκλοπής κάποιων από τα δεδομένα πληροφορίας που στέλνονται. Ο χρόνος υποκλοπής είναι ίσος με 20 ms και αντιστοιχεί σε 4 frames . έτσι το κανάλι FACCH δεν αποστέλλεται σε συνεχή χρονικά διαστήματα αλλά δρα ως υποκλοπέας του TCH επικοινωνίας στο serving cell ώστε να ενημερωθεί η συσκευή για την συχνότητα συντονισμού.

### **Κανάλι Ελέγχου CBCH**

Το κανάλι αυτό χρησιμοποιείται μόνο για μεταφορά μηνυμάτων broadcasting (SMSCB) μέσω του downlink για ενημέρωση σχετικά με φυσικές καταστροφές ή ατυχήματα κλπ. Χρησιμοποιεί το ίδιο φυσικό κανάλι με το SDCCH.

## 2. Μοντέλα Απωλειών Ραδιοκάλυψης

### 2.1. Εισαγωγή

Η μελέτη στο πως διαδίδονται τα ραδιοκύματα αποτελείται από τα πιο σύνθετα προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής μετάδοσης. Η διάδοση σε πραγματικό περιβάλλον αποτελεί ένα σύστημα με πολλούς παράγοντες το οποίο δεν επιδέχεται αναλυτική επίλυση. Η μελέτη, η κατανόηση και η δυνατότητα σχεδιαστικής παρέμβασης σε αυτό το σύστημα προϋποθέτει την παραμετροποίησή του. Η ανάλυση αυτή δίνει την δυνατότητα της σύνθεσης των επιμέρους παραγόντων-φαινομένων σε διαφορετικούς ανά περίπτωση συνδυασμούς στα πραγματικά προβλήματα ραδιοζεύξεων που υπάρχουν κάθε φορά.

Πάντως σε κάθε περίπτωση πρέπει να μεταφέρεται επαρκής ισχύς από τον πομπό στον δέκτη, έτσι ώστε να είναι δυνατή η <<ανάγνωση>> του κάθε φορά λαμβανόμενου σήματος. Επομένως, ένα από τα πιο κρίσιμα ζητήματα είναι αυτό των αποσβέσεων-απωλειών ,κατά τη διάρκεια της όδευσης από τον πομπό στο δέκτη. Συνεπώς, για κάθε επιμέρους παράγοντα, που επηρεάζει τη διάδοση ραδιοκυμάτων, ένα από τα πιο σημαντικά συμπεράσματα είναι ο τρόπος με τον οποίο συνεισφέρει στη συσσώρευση των απωλειών.

### Απώλειες Διαδρομής (Path loss)

Οι απώλειες διαδρομής είναι ο λόγος της εκπεμπόμενης ισχύος προς την λαμβανόμενη ισχύ. Για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιούμε διάφορα μοντέλα. Οι απώλειες διαδρομής χαρακτηρίζουν κυρίως την εξασθένηση της μέσης τιμής του λαμβανόμενου σήματος σε σχέση με την απόσταση πομπού-δέκτη όπως επίσης εξαρτώνται από την συχνότητα, από το ύψος των κεραιών του σταθμού βάσης και του κινητού τερματικού, από τη μορφολογία της περιοχής και από τις ανθρώπινες κατασκευές των απωλειών διαδρομής.

## Μοντέλο Ελεύθερου Χώρου (Free Space)

Το πιο απλό μοντέλο μιας ραδιοζεύξης είναι αυτό της διάδοσης στον ελεύθερο χώρο. Δηλαδή σε ένα χώρο άπειρης έκτασης με ομοιογενή χαρακτηριστικά με μηδενικές απώλειες. Η διάδοση και οι απώλειες σύμφωνα με αυτό το μοντέλο ονομάζονται διάδοση ελεύθερου χώρου, αντίστοιχα. Αν μια κεραία εκπομπής βρίσκεται σε ελεύθερο χώρο, δηλαδή μακριά από την Γη ή από οποιαδήποτε εμπόδια, τότε αν έχει κέρδος  $G_T$  στην κατεύθυνση της κεραίας λήψης, η πυκνότητα ενέργειας σε μια απόσταση  $d$  της διαλεχθείσας κατεύθυνσης είναι :

$$W = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2}$$

όπου  $P_T$  η ισχύς τροφοδοσίας. Η διαθέσιμη ισχύς στην κεραία λήψης, η οποία έχει ενεργό επιφάνεια:

$$A = \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi}$$

Είναι τότε  $P_R = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} A = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} \left( \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi} \right)$

όπου  $G_R$  το κέρδος της κεραίας λήψης.

Σχηματίζουμε το λόγο (με την εξίσωση Friis):

$$\frac{P_R}{G_T} = G_T G_R \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή ως εξίσωση ελεύθερου χώρου (free space equation)<sup>2</sup>.

Χρησιμοποιώντας τη σχέση της ταχύτητας διάδοσης  $c = \lambda \times f$  όπου το  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος και η  $f$  είναι η συχνότητα καταλήγουμε στην εξίσωση :

$$\frac{P_R}{G_T} = G_T G_R \left( \frac{c}{4\pi f d} \right)^2$$

Ο λόγος  $P_T/P_R$  ονομάζεται απώλειες διάδοσης (ή απώλειες διαδρομής) στον ελεύθερο χώρο και εκφράζεται συνήθως σε dB. Από την εξίσωση παραπάνω μπορούμε να γράψουμε:

$$L_f(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{P_T}{P_R} \right) = -10 \log G_T G_R \left( \frac{4\pi f d}{c} \right)^2$$

Η εξίσωση δείχνει ότι η διάδοση ελεύθερου χώρου είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης  $d$ .

### **2.1.1. Απώλειες Λόγω Εδάφους**

Όπως φαίνεται το προηγούμενο μοντέλο δεν είναι επαρκές για τη μελέτη των πραγματικών προβλημάτων διότι ο χώρος διάδοσης κάθε άλλο παρά απεριόριστος είναι, εφόσον η διάδοση πραγματοποιείται πάνω από την γήινη επιφάνεια, που παρουσιάζει διαφοροποιήσεις ως προς τη μορφολογία της (λόφοι, βουνά, νερό, δέντρα). Η ύπαρξη της γήινης επιφάνειας επιδρά στη διάδοση, διότι εμφανίζονται φαινόμενα ανακλάσεων και περιθλάσεων, που προκαλούν απώλειες και παρεμβολές στο λαμβανόμενο σήμα. Επομένως, το μοντέλο της ελεύθερης διάδοσης χρήζει μιας επιπλέον διόρθωσης εφόσον λάβει υπόψη η επίδραση της γήινης επιφάνειας και των φυσικών ή τεχνικών εμποδίων πάνω της.

#### **2.1.1.1. Ανάκλαση**

Με τον όρο ανάκλαση περιγράφουμε το φαινόμενο που λαμβάνει χώρα όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει πάνω σε εμπόδιο με διαστάσεις πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με το μήκος κύματος. Η συμβολή των κυμάτων μπορεί να προκαλέσει ελαφριά ενίσχυση του σήματος ή διάλειαση λόγω της διαφορετικής φάσης που φτάνει το κύμα στον δέκτη. Η διαφορά φάσης προκύπτει επειδή η τελευταία επηρεάζεται από την απόσταση που έχει διατρέξει το κύμα και από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν κατά μήκος της τροχιάς του κύματος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φαινόμενο πολλαπλών διοδεύσεων (multipath propagation).

#### **2.1.1.2. Περίθλαση**

Η περίθλαση περιγράφει τα φαινόμενα που παρατηρούνται όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα ή αλληλεπιδρά με ένα εμπόδιο ή προσπύπτει. Τα οπτικά κύματα όταν προσπίπτουν σε ένα εμπόδιο δημιουργούν διακριτές ή σκιασμένες περιοχές. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ανάλογα με τη συχνότητα, το ραδιοηλεκτρικό μέγεθος του εμποδίου (σχέση μήκος κύματος με διαστάσεις) αλλά και τη γωνία πρόσπτωσης σε αυτό, μπορούν να «υπερπηδήσουν» το εμπόδιο με

αντίτιμο την εμφάνιση απωλειών που ονομάζονται απώλειες περίθλασης. Ο μηχανισμός όπου το ραδιοκύμα διαδίδεται πάνω και πίσω από τα εμπόδια βασίζεται στην αρχή του Huygen. Σύμφωνα με την εν λόγω αρχή κάθε σημείο ενός επιπέδου κύματος λειτουργεί σαν μια σημειακή πηγή σφαιρικής ακτινοβολίας. Δηλαδή, τμήμα του κύματος που προσπίπτει στην κορυφή ενός εμποδίου λειτουργεί σαν δευτερογενής πηγή ακτινοβολίας που επιτρέπει την ακτινοβολία και πίσω από το εμπόδιο.

### 2.1.3. Διάδοση Σε Επιφάνεια Με Εμπόδια

Όπως φαίνεται από τον ορισμό της, η περίθλαση αφορά την εκτροπή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από την ευθύγραμμη διάδοση. Θεωρητικά οι χαμηλές συχνότητες υφίστανται εντονότερη περίθλαση από τις πιο υψηλές (ακριβώς το αντίθετο συμβαίνει με την διάθλαση). Το φαινόμενο της περίθλασης όπως αναφέρθηκε είναι ένας πολύ βασικός μηχανισμός διάδοσης, και ένα δεν υπήρχε δεν θα ήταν δυνατή η διάδοση ηλεκτρομαγνητικών (αλλά και άλλων ειδών κυμάτων) γύρω από εμπόδια.

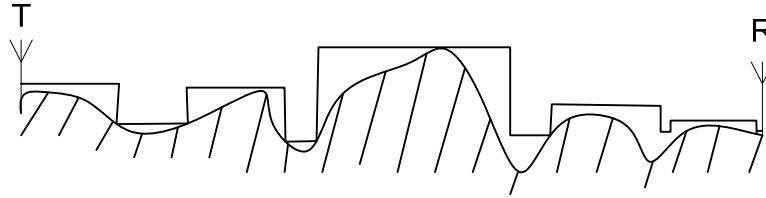
Όπως είναι λογικό στις περισσότερες ρεαλιστικές περιπτώσεις τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των περιοχών που εξετάζονται απέχουν πολύ από τις εξιδανικευμένες περιπτώσεις που περιγράφονται είτε στη διάδοση ελεύθερου χώρου (free space), είτε στη διάδοση σε λεία επίπεδη επιφάνεια (plane earth). Για παράδειγμα το έδαφος μεταξύ πομπού και δέκτη συνήθως παρουσιάζει μια σειρά από ανωμαλίες, οι οποίες σχηματικά περιγράφονται από την παρακάτω εικόνα :



Εικόνα 2 Δείγμα ρεαλιστικής περίπτωσης ασύρματης ζεύξης

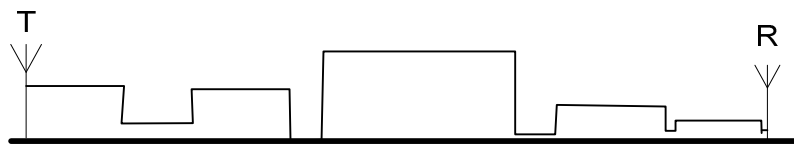
Η μεθοδολογία που ακολουθείται σε αυτές τις περιπτώσεις έχει να κάνει συνήθως με την αντιστοιχία του ανώμαλου εδάφους σε ένα αντίστοιχο ισοδύναμο έδαφος το οποίο αποτελείται εμπόδια. Στο παράδειγμα του σχήματος 10 μια τέτοια διαδικασία

μας οδηγεί σε ένα δεύτερο σχήμα στο οποίο οι εδαφικές ανωμαλίες περιβάλλονται από ορθογώνια εμπόδια δηλαδή :



Εικόνα 3 Οι εδαφικές ανωμαλίες προσεγγίζονται από επίπεδα εμπόδια

Το τελευταίο στάδιο στην μελέτη και επίλυση του προβλήματος έχει να κάνει με την απαλοιφή του ρεαλιστικού εδάφους και την συνέχεια της μελέτης στο προκύπτον σχήμα, το οποίο τώρα αποτελείται μόνο από ορθογώνια εμπόδια, και μπορούμε κάλλιστα να εφαρμόσουμε μια σειρά από ηλεκτρομαγνητικές ή εμπειρικές μεθόδους. Η τελική εικόνα στην συγκεκριμένη περίπτωση μοιάζει με την παρακάτω :



Εικόνα 4 Στο τελικό στάδιο το ανώμαλο έδαφος αποτελείται από ορθογώνια εμπόδια

Για την περαιτέρω μελέτη τέτοιων περιπτώσεων πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν μας τις παρακάτω βασικές έννοιες.

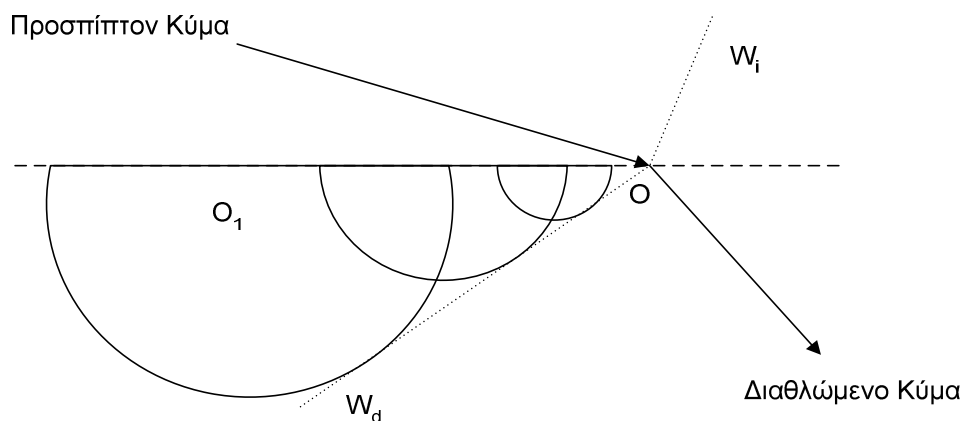
### 2.1.4. Αρχή Huygen

Όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα συναντάει ένα εμπόδιο ή μια ασυνέχεια, η οποία είναι τόσο μικρή ώστε να μπορεί να χαρακτηριστεί ως αιχμή, τότε από τις εξισώσεις του Maxwell μπορούμε να καταλήξουμε σε μία χρήσιμη λύση του προβλήματος η οποία ταυτίζεται με την εξαγωγή της αρχής του Huygen. Το κεντρικό νόημα της αρχής του Huygen είναι ότι κάθε σημείο του μετώπου του κύματος μπορεί να συμπεριφερθεί σαν μια πηγή δευτερεύοντος κύματος. Αν όλα αυτά τα δευτερεύοντα κύματα συνδυαστούν, δημιουργούν ένα νέο μέτωπο κύματος στην κατεύθυνση διάδοσης. Η περίθλαση οφείλεται στην διάδοση των δευτερευόντων κυμάτων στην περιοχή σκίασης του εμποδίου. Το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο θα είναι ίσο με το άθροισμα όλων των δευτερευόντων κυμάτων στο χώρο γύρω από το εμπόδιο.

Λεπτομερέστερη περιγραφή της αρχής του Huygen δίνει τρεις εκδοχές :

Η *πρώτη εκδοχή* αναφέρει ότι το μελλοντικό σχήμα ενός οποιουδήποτε μετώπου κύματος μπορεί να προβλεφθεί εάν υποθέσουμε ότι (α) κάθε σημείο του μετώπου εκπέμπει **σφαιρικό κύμα** και (β) σχηματίσουμε την περιβάλλουσα όλων των επιμέρους σφαιρικών κυμάτων που εκπέμπονται. Εάν το μέσο δεν έχει επιφάνειες ασυνέχειας, το αποτέλεσμα θα είναι η παραγωγή ενός νέου μετώπου που είναι παράλληλο με το αρχικό. Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να τονίσουμε ότι οι έννοιες της σκέδασης και της περίθλασης είναι σχεδόν ταυτόσημες με την διαφορά ότι η περίθλαση αναφέρεται σε αιχμηρά αντικείμενα ή εν γένει αιχμές.

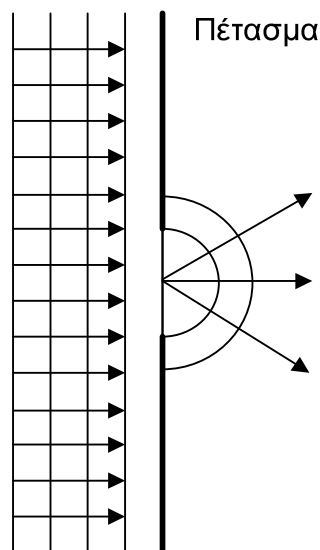
Υποθέτοντας ότι ένα επίπεδο κύμα προσπίπτει στην επίπεδη διαχωριστική επιφάνεια δύο ημιάπειρων ιστροπικών μέσων έχουμε την παρακάτω εικόνα :



Εικόνα 5 Ερμηνεία διάθλασης με την αρχή Huygen – Α' εκδοχή

Αυτό που φαίνεται στο σχήμα είναι ότι τη στιγμή που το μέτωπο  $W_i$  προσπίπτει στο σημείο  $O$  της διαχωριστικής επιφάνειας, οι προηγούμενες θέσεις το μετώπου  $O_1$  έχουν ήδη ακτινοβολήσει σφαιρικά κύματα, τα οποία στο σχήμα φαίνονται σαν ημισφαίρια. Η περιβάλλουσα των σφαιρικών κυμάτων δίνει το επίπεδο  $W_d$ , που είναι και το μέτωπο του διαθλώμενου κύματος. Προφανώς η κάθετη στο  $W_d$  ταυτίζεται με τη διεύθυνση διάδοσης του διαθλώμενου κύματος και διαφέρει από εκείνη του προσπίπτοντος.

Η δεύτερη εκδοχή αναφέρεται στο άνοιγμα που υπάρχει σε ένα αδιαφανές πέτασμα (εμπόδιο). Η αναφορά γίνεται στο σχήμα παρακάτω χωρίς απαραίτητα να επιμένουμε σε κυκλικό άνοιγμα ή σε επίπεδο προσπίπτον κύμα.



Εικόνα 6 Άνοιγμα και αδιαφανές πέτασμα - Β' Εκδοχή

Η δεύτερη εκδοχή αναφερόμενη στο παραπάνω σχήμα λέει ότι το κύμα δεξιά του πετάσματος διαδίδεται σαν κάθε στοιχειώδης επιφάνεια  $d\sigma$  του ανοίγματος να ήταν πηγή σφαιρικού κύματος, όπου το μιγαδικό πλάτος του σφαιρικού κύματος είναι σε μέτρο και σε φάση ίδιο με το μιγαδικό πλάτος του προσπίπτοντος κύματος στο σημείο  $d\sigma$ . Κάθε σημείο του ανοίγματος επανεκπέμπει σφαιρικά κύματα. Τα σφαιρικά κύματα που δημιουργούνται από την συμβολή των επανεκπομπών του ανοίγματος είναι γνωστά με την ονομασία «κροσσοί συμβολής». Επίσης έχουν γίνει δύο προσεγγίσεις. Η πρώτη αφορά ότι το προσπίπτον κύμα είναι ένα επίπεδο κύμα ενώ κάλλιστα θα μπορούσε να προέρχεται από μια σημειακή πηγή αριστερά του πετάσματος η οποία θα δημιουργούσε σφαιρικό κύμα. Η δεύτερη έχει να κάνει με την

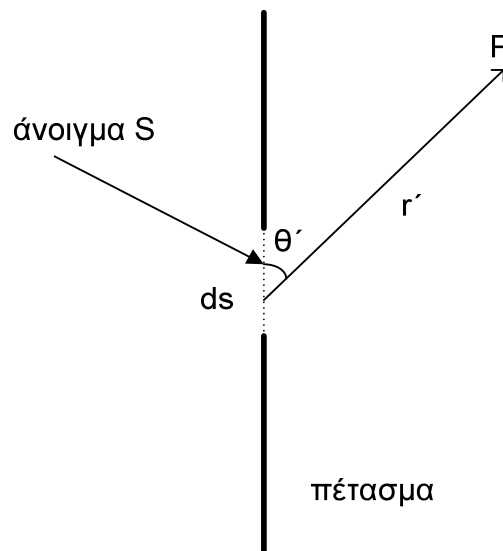


κυματική κατανομή στο άνοιγμα του πετάσματος η οποία σίγουρα θα εξαρτάται από το σχήμα ή το μέγεθος του ανοίγματος, κάτι που εδώ έχει αγνοηθεί.

Η τρίτη εκδοχή αποτελεί την μαθηματική έκφραση της δεύτερης εκδοχής. Χαρακτηριστικά αναφέρει ότι το κύμα  $f_p$  σε οποιοδήποτε σημείο P δεξιά του ανοίγματος επιφάνειας S δίνεται από το επιφανειακό ολοκλήρωμα :

$$f_p = \frac{j}{\lambda} \iint_S f_{\text{προσπ}} \cdot \frac{e^{-jkr'}}{r'} \cdot \sin \theta' \cdot d\sigma$$

Η παραπάνω αναφέρεται στο σχήμα που ακολουθεί :



Εικόνα 7 Μαθηματική διατύπωση αρχής Huygen - Γ' Εκδοχή

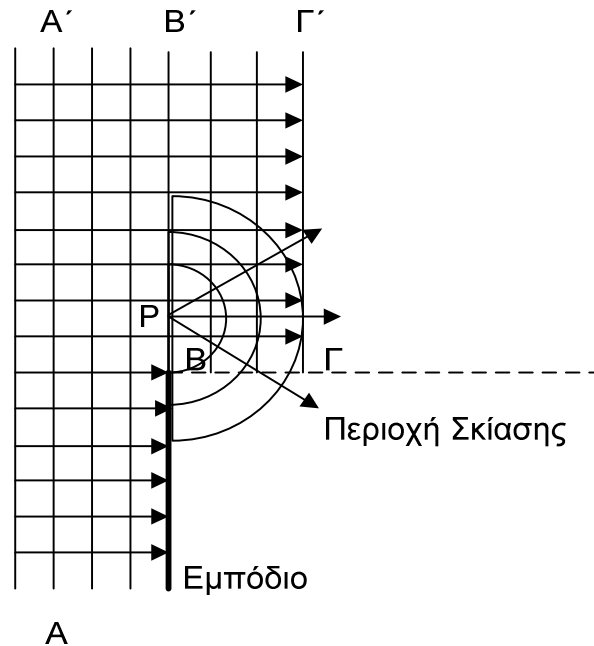
Από την παραπάνω προκύπτει ότι με δεδομένο το προσπίπτον κύμα  $f_{\text{προσπ}}$  μπορούμε να υπολογίσουμε το κύμα δεξιά του πετάσματος  $f_p$ . Το ολικό κύμα  $f_p$  προκύπτει από

την υπέρθεση όλων των συνεισφορά όλων των επιμέρους σφαιρικών κυμάτων  $\frac{e^{-jkr'}}{r'}$  που προέρχονται από τα σημεία του ανοίγματος. Τέλος αν τοποθετήσουμε την αρχή O των συντεταγμένων στο μέσο του ανοίγματος, τον άξονα Oz κάθετα στο πέτασμα και ενδιαφερόμαστε για την κατανομή του  $f_p$  κοντά στον άξονα Oz μπορούμε να ισχυριστούμε ότι  $\sin \theta' \cong 1$ .

Υποθέτουμε τώρα ότι επίπεδο προσπίπτον κύμα συναντά ένα αδιαπέραστο και τελείως απορροφητικό εμπόδιο. Στο σχήμα που ακολουθεί μόνο ένα ημιάπειρο μέτωπο του προσπίπτοντος κύματος ΓΓ' συνεχίζει ως έχει. Η απλή θεωρία

ακτινοβολίας δεν προβλέπει ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στην περιοχή ΒΓ. Η αρχή του Huygen όμως προβλέπει τη δημιουργία δευτερευόντων κυμάτων από όλα τα σημεία στο ΒΒ' και έτσι για παράδειγμα το σημείο Ρ συμβάλλει στην σκιασμένη περιοχή με το πεδίο να είναι το αποτέλεσμα της παρεμβολής όλων των δευτερευόντων κυμάτων. Στην πράξη γύρω από το άκρο του εμποδίου έχουμε καμπύλωση των ραδιοκυμάτων δηλαδή περίθλαση (diffraction).

Το σχήμα που περιγράφει την διαδικασία είναι το εξής :



Εικόνα 8 Περίθλαση στην άκρη ενός εμποδίου

### 2.1.5. Ελλειψοειδές Ζώνες Fresnel

Μερικές ενδιαφέρουσες αρχές σχετικές με την περίθλαση προκύπτουν αν θεωρήσουμε ένα πομπό (T) και ένα δέκτη (R) σε περιβάλλον ελεύθερου χώρου. Επίσης θεωρούμε ότι μεταξύ του πομπού και του δέκτη παρεμβάλλεται ένα εμπόδιο το οποίο εκτείνεται σε άπειρο βάθος και φτάνει σε ενεργό ύψος  $h$  δηλαδή βρίσκεται κατά  $h$  μέτρα πάνω από την ευθεία που ενώνει τον πομπό και τον δέκτη, η δε οριζόντια απόσταση του εμποδίου είναι  $d_1$  από τον πομπό και  $d_2$  από τον δέκτη. Η διαφορά δρόμων  $\Delta$  μεταξύ της «διαδρομής περίθλασης» και της υποθετικής, εάν υπήρχε, διαδρομής άμεσης οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη (line of sight) υπολογίζεται από τον τύπο :

$$\Delta = \frac{h^2}{2} \cdot \frac{(d_1 + d_2)}{d_1 \cdot d_2}$$

Στην παραπάνω εξίσωση έχουν υποθεθεί  $h \ll d_1, d_2$  και  $h \gg \lambda$

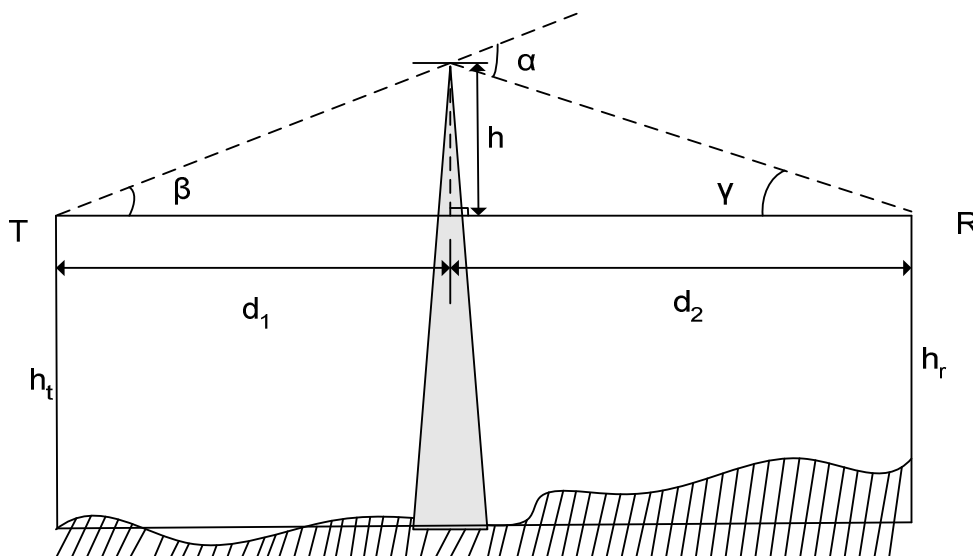
Η διαφορά δρόμων  $\Delta$  καλείται επιπλέον απόσταση.

Η διαφορά φάσης που αντιστοιχεί σε αυτή τη διαφορά δρόμων προκύπτει από τη σχέση :

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

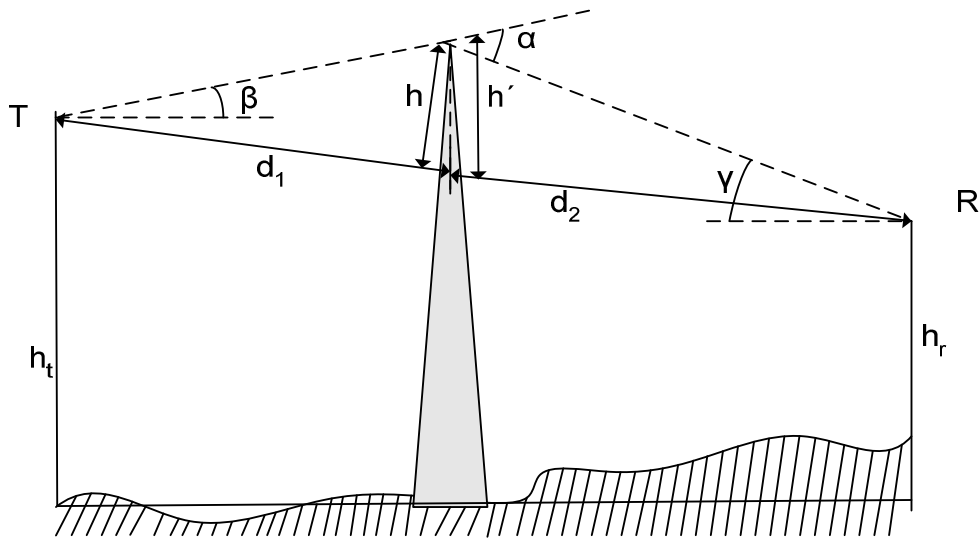
Αναφερόμενοι στα σχήματα που ακολουθούν έχουμε δύο περιπτώσεις γεωμετρίας. Η πρώτη αφορά την περίπτωση που πομπός και δέκτης βρίσκονται στο ίδιο ύψος, ενώ η δεύτερη την περίπτωση που πομπός και δέκτης βρίσκονται σε διαφορετικά ύψη.

Πρώτη περίπτωση :



Εικόνα 9 Γεωμετρία περίθλασης με πομπό και δέκτη στο ίδιο ύψος

Δεύτερη περίπτωση :



Εικόνα 10 Γεωμετρία περίθλασης με πομπό και δέκτη σε διαφορετικό ύψος

Από τα παραπάνω σχήματα προκύπτει άμεσα ότι αν  $\tan x = x$  που συμβαίνει για μικρές τιμές του  $x$ , τότε  $a = \beta + \gamma$  και η γωνία  $a$  προκύπτει από τη σχέση :

$$a = h \cdot \frac{(d_1 + d_2)}{d_1 \cdot d_2}$$

Μια πιο απλή έκφραση για την εξίσωση (3.50) προκύπτει εάν χρησιμοποιήσουμε την αδιάστατη παράμετρο Fresnel – Kirchoff η οποία ορίζεται από τη σχέση :

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

ή χρησιμοποιώντας τη σχέση :

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

όπου  $a$  εκφρασμένο σε ακτίνια (rad).

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει άμεσα η εξάρτηση της παραμέτρου Fresnel – Kirchoff από την διαφορά φάσης  $\phi$  κατά τον τύπο :

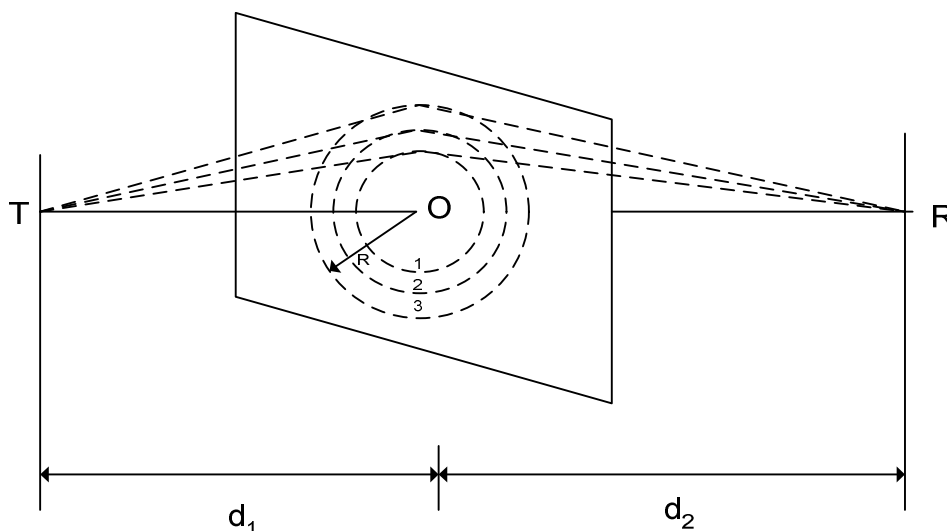
$$\phi = \frac{\pi}{2} \cdot v^2$$

Οι σχέσεις αυτές δείχνουν ότι η διαφορά φάσης  $\varphi$  εξαρτάται από το ύψος και την θέση του εμποδίου καθώς και από την θέση και απόσταση του πομπού και του δέκτη.

Απαραίτητη προϋπόθεση για να έχουμε μετάδοση σε συνθήκες ελεύθερου χώρου (free space) είναι η διατήρηση μιας περιοχής γνωστής ως πρώτη ζώνη Fresnel η οποία θα πρέπει να είναι ελεύθερη από εμπόδια. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι οι κεραιές πρέπει να υψωθούν τόσο όσο χρειάζεται για να είναι η πρώτη ζώνη Fresnel ελεύθερη από εμπόδια. Εάν οι κεραιές βρίσκονται σχετικά χαμηλά με την απευθείας διαδρομή μετάδοσης (line of sight) να περνά κοντά στην επιφάνεια της Γης σε κάποια ενδιάμεσα σημεία, τότε η απώλεια του σήματος είναι αρκετά μεγαλύτερη από την προβλεπόμενη απώλεια ελεύθερου χώρου, παρόλο που στην διαδρομή δεν υπάρχει κανένα εμπόδιο. Το ποσοτικό μέτρο που καθορίζει εάν έχουμε ή όχι εδαφικά εμπόδια και κατ' επέκταση αν έχουμε ή όχι απώλειες περίθλασης (diffraction losses), δίνεται από τις ελλειψοειδείς ζώνες Fresnel.

Οι ζώνες Fresnel αντιπροσωπεύουν συνεχόμενες περιοχές όπου τα δευτερεύοντα κύματα έχουν μήκος διαδρομής από τον πομπό στον δέκτη το οποίο είναι κατά ένα

ακέραιο πολλαπλάσιο της τάξης του  $n \cdot \frac{\lambda}{2}$  μεγαλύτερο από το συνολικό μήκος διαδρομής στην περίπτωση οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη (line of sight). Θεωρούμε ένα επίπεδο μεταξύ πομπού και δέκτη όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί :



Εικόνα 11 Ομόκεντροι κύκλοι που ορίζουν τις ελλειψοειδείς ζώνες Fresnel

Οι ομόκεντροι κύκλοι που έχουν σχεδιαστεί πάνω στο επίπεδο ανήκουν στον γεωμετρικό τόπο των εστιών δευτερευόντων κυμάτων τα οποία διαδίδονται προς τον δέκτη (R) έτσι ώστε το συνολικό μήκος διαδρομής να αυξάνεται κατά  $\frac{\lambda}{2}$  ανά διαδοχικό κύκλο. Οι κύκλοι αυτοί καλούνται ζώνες Fresnel και η δράση τους στο τελικά λαμβανόμενο σήμα μπορεί να είναι είτε ωφέλιμη είτε καταστροφική. Η ακτίνα της n-οστής ζώνης Fresnel  $r_n$  συναρτήσει των μεγεθών n,  $\lambda$ ,  $d_1$ ,  $d_2$  προκύπτει από τον τύπο :

$$r_n = \sqrt{\frac{n \cdot \lambda \cdot d_1 d_2}{(d_1 + d_2)}}$$

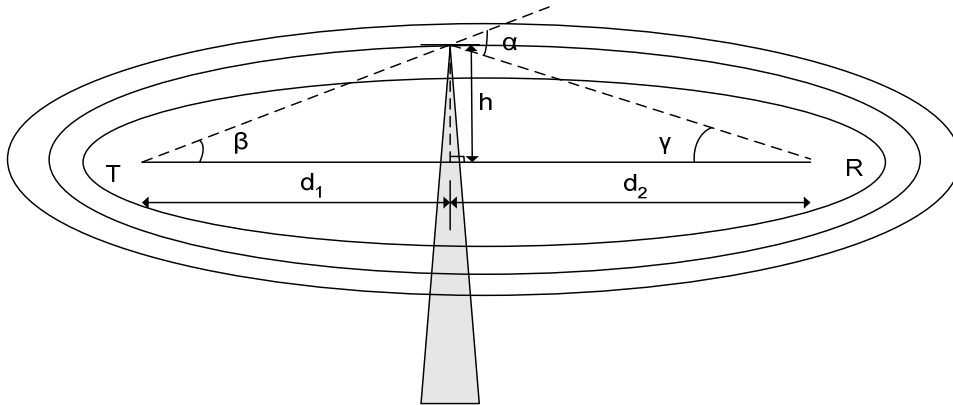
Η εξίσωση αυτή αποτελεί προσεγγιστική σχέση και ισχύει εφόσον  $d_1, d_2 \gg r_n$ . Το συνολικό μήκος διαδρομής που διέρχεται από κάθε κύκλο είναι  $n \cdot \frac{\lambda}{2}$ , δηλαδή ο μικρότερος κύκλος αντιστοιχεί στην περίπτωση  $n = 1$ . Για  $n = 1$  το πλέον μήκος διαδρομής που αντιστοιχεί θα είναι κατά  $\frac{\lambda}{2}$  μεγαλύτερο από την περίπτωση άμεσης οπτικής επαφής πομπού και δέκτη (line of sight), και αντίστοιχα για  $n = 2, 3, 4$  θα έχουμε πλεονάζον μήκος διαδρομής κατά  $\lambda, 3\frac{\lambda}{2}, 2\lambda$  κ.ο.κ, πάντα σε σχέση με την διαδρομή line of sight. Οι ακτίνες των ζωνών Fresnel μεγιστοποιούνται όταν το επίπεδο που βρίσκεται το εμπόδιο είναι στη μέση ακριβώς πομπού και δέκτη, ενώ ελαττώνονται όσο το επίπεδο πλησιάζει είτε προς τη μεριά του δέκτη, είτε προς τη μεριά του πομπού.

Στις συνήθεις περιπτώσεις οι απώλειες περίθλασης οφείλονται στην παρεμπόδιση των δευτερευόντων κυμάτων όταν αυτά διέρχονται από ένα εμπόδιο. Η παρεμπόδιση σημαίνει ότι μέρος της εκπεμπόμενης ενέργειας μπλοκάρεται στις ζώνες Fresnel με αποτέλεσμα ένα κλάσμα της ενέργειας να φτάνει τελικά στον δέκτη. Στον δέκτη φτάνει τελικά όση ενέργεια έχει καταφέρει να περάσει χωρίς να παρεμποδίζεται συνολικά από όλες τις ζώνες Fresnel.

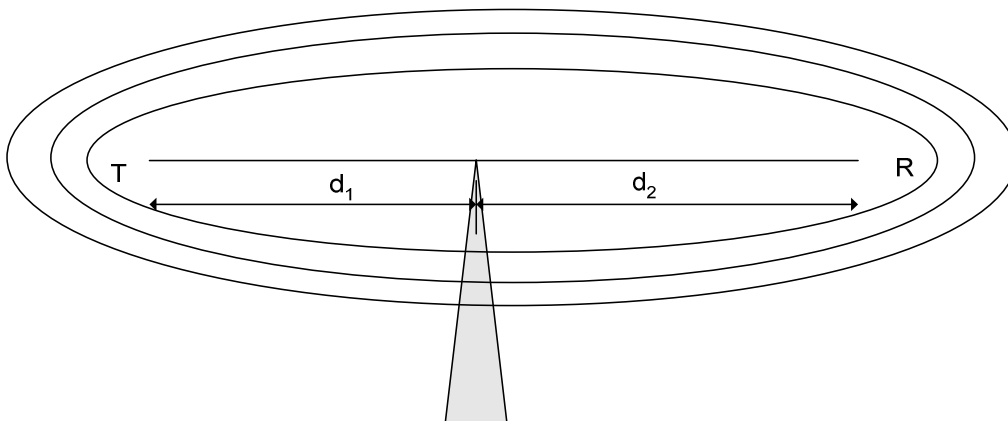
## 2.1.6. Μιγαδικό Ολοκλήρωμα Fresnel

Είδαμε ότι ενώνοντας όλα τα σημεία που έχουν την ιδιότητα να απέχουν παραπάνω σε σχέση με το μήκος διαδρομής line of sight κατά ένα ακέραιο πολλαπλάσιο  $\frac{\lambda}{2}$ , έχουμε την οικογένεια των ελλειψοειδών ζωνών Fresnel. Οι εστίες αυτών των ελλείψεων είναι οι θέσεις του πομπού (T) και του δέκτη (R) αντίστοιχα.

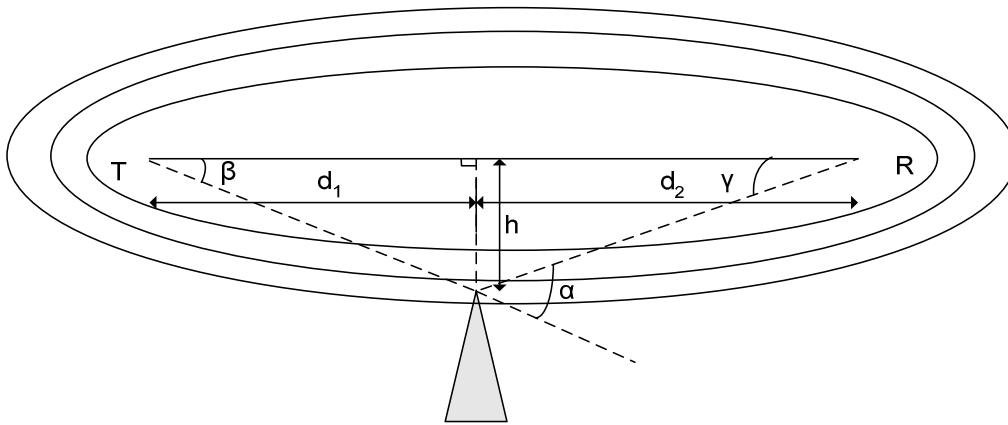
Ανάλογα με τις τιμές της γωνίας  $\alpha$  και της παραμέτρου Fresnel – Kirchoff  $v$ , έχουμε τις παρακάτω περιπτώσεις περίθλασης αιχμής :



Εικόνα 12 α. Γωνία  $\alpha > 0$  και παράμετρος  $v > 0$  (άρα  $h > 0$ )



Εικόνα 13 β. Γωνία  $\alpha = 0$  και παράμετρος  $v = 0$  (άρα  $h = 0$ )



Εικόνα 14 γ. Γωνία  $\alpha < 0$  και παράμετρος  $v < 0$  (άρα  $h < 0$ )

Στην πράξη εάν ο όγκος στον οποίο περικλείεται η πρώτη ζώνη Fresnel είναι απαλλαγμένος από εμπόδια, τότε οι απώλειες περίθλασης γίνονται μηδαμινές και μπορούν να αγνοηθούν. Σε ρεαλιστικά σενάρια αρκεί το 55% της 1<sup>ης</sup> ζώνης Fresnel να είναι ελεύθερο από εμπόδια, οπότε περαιτέρω «καθαρισμός» της ζώνης Fresnel από εμπόδια δεν έχει καμία ουσιαστική σημασία όσο αφορά τις απώλειες περίθλασης.

Στην πράξη η θεωρητική ανάλυση και ο ποσοτικός προσδιορισμός των απωλειών περίθλασης είναι ένα εξαιρετικά δύσκολο πρόβλημα. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται συνήθως θεωρητικές προσεγγίσεις και παράλληλα γίνονται εμπειρικές διορθώσεις. Παρόλα αυτά έχουν προταθεί εκφράσεις που δίνουν τις απώλειες περίθλασης για σχετικά απλές περιπτώσεις, όπως η περίπτωση του ενός εμποδίου που περιγράψαμε στα παραπάνω σχήματα. Αυτό είναι και το απλούστερο μοντέλο που ισχύει για τον υπολογισμό των απωλειών περίθλασης, ενώ σε πολλές περιπτώσεις όταν η σκίαση γίνεται από ένα μονάχα αντικείμενο όπως ένας λόφος ή ένα βουνό, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί άφοβα η σχηματική αναπαράσταση που παρουσιάσαμε πιο πάνω.

Ο ποσοτικός προσδιορισμός του ηλεκτρικού πεδίου γίνεται με τη βοήθεια του μιγαδικού ολοκληρώματος Fresnel  $F(v)$ , το οποίο αποτελεί και συνάρτηση της παραμέτρου Fresnel – Kirchoff  $v$ . Στηριζόμενοι στην αρχή του Huygen όπου το πεδίο υπολογίζεται στην περιοχή σκίασης του εμποδίου από την συμβολή των δευτερευόντων πηγών κύματος και αν  $E_0$  είναι η τιμή του πεδίου κάτω από συνθήκες ελεύθερου χώρου και απουσία τόσο του εδάφους, όσο και του εμποδίου, το περιθλώμενο πεδίο θα δίνεται από τη σχέση :

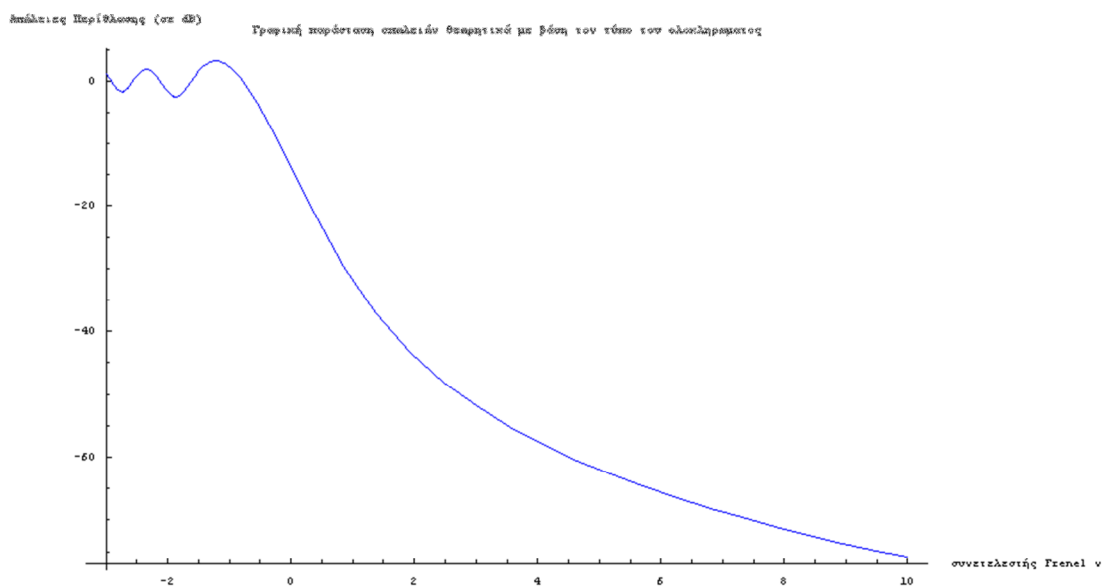


$$\frac{E_d}{E_o} = F(v) = \frac{(1+j)}{2} \int_v^{\infty} \exp\left(\frac{-j\pi t^2}{2}\right) dt$$

Το κέρδος περίθλασης που οφείλεται στην παρουσία του εμποδίου συγκρινόμενο με το ηλεκτρικό πεδίο ελεύθερου χώρου δίνεται από τη σχέση :

$$G_d(dB) = 20 \cdot \log_{10} |F(v)|$$

Η γραφική παράσταση του  $G_d$  συναρτήσει του  $v$  πραγματοποιήθηκε με το υπολογιστικό πακέτο Mathematica και φαίνεται παρακάτω :



Εικόνα 15 Γραφική παράσταση του  $G_d$  συναρτήσει του  $v$

Ο κώδικας για αυτή την γραφική παράσταση είναι η γραμμή :

```
Plot[{{20 * Log[Abs[(1 + j) / 2 * Integrate[Exp[-j * (pi / 2) * t^2], {t, v, Infinity}]]}}, {x, -3, 10},
PlotLabel -> "Γραφική παράσταση απωλειών θεωρητικά με βάση τον τύπο του ολοκληρωματος", PlotStyle -> RGBColor[0, 0, 1],
AxesLabel -> {"συντελεστής Fresnel v", "Απώλειες Περίθλασης (σε dB)"}, AxesOrigin -> {-3, -77}]
```

### 2.1.6.1. Απώλειες Περίθλασης

Το πρόβλημα του υπολογισμού των απωλειών περίθλασης είναι εξαιρετικά πολύπλοκο και δύσκολο σε βαθμό που για τον υπολογισμό τους συνήθως χρησιμοποιούνται γραφικές ή αριθμητικές λύσεις. Σε κάποιες άλλες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και νομογράμματα που μπορούν να αναζητηθούν στην βιβλιογραφία. Μια προσεγγιστική λύση στο θέμα έχει προταθεί από τον Lee, με τη

βοήθεια της οποίας επιτρέπεται ο υπολογισμός των απωλειών περίθλασης με κάποιο ενδεικτικό σφάλμα.

Ο τύπος του Lee δίνει τις απώλειες περίθλασης συναρτήσει της παραμέτρου Fresnel – Kirchoff  $v$  κατά τις σχέσεις που ακολουθούν :

$$G_d(dB) = 0 \quad v \leq -1$$

$$G_d(dB) = 20 \cdot \log_{10}(0,5 - 0,62 \cdot v) \quad -1 \leq v \leq 0$$

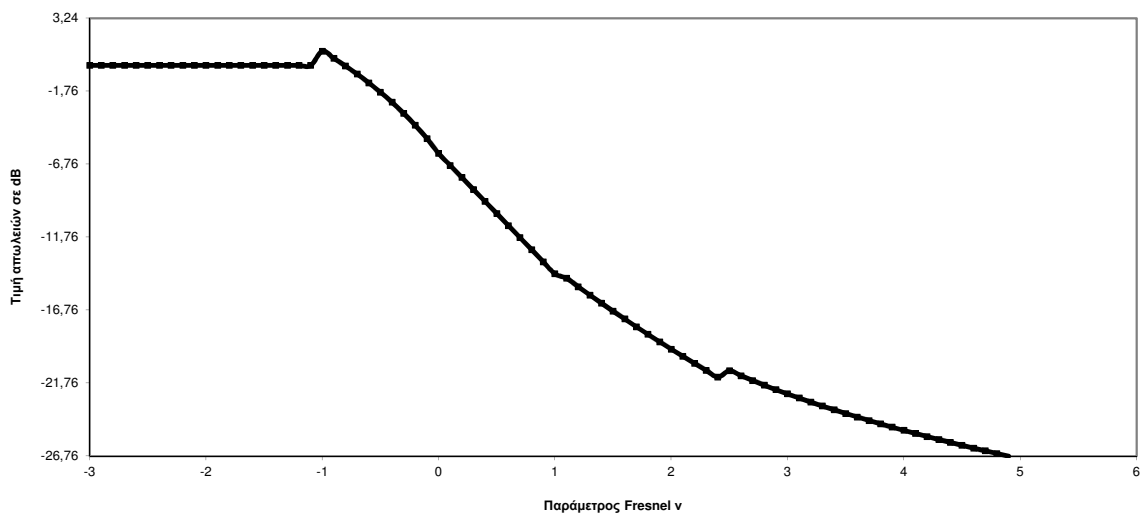
$$G_d(dB) = 20 \cdot \log_{10}(0,5 \cdot \exp(-0,95 \cdot v)) \quad 0 \leq v \leq 1$$

$$G_d(dB) = 20 \cdot \log_{10}\left(0,4 - \sqrt{0,1184 - (0,38 - 0,1 \cdot v)^2}\right) \quad 1 \leq v \leq 2,4$$

$$G_d(dB) = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{0,225}{v}\right) \quad v > 2,4$$

Μια πρόχειρη γραφική παράσταση των απωλειών περίθλασης όπως ορίζονται από τον τύπο του Lee χρησιμοποιώντας τυπικές τιμές ακολουθεί παρακάτω :

Γραφική παράσταση απωλειών περίθλασης με τον προσεγγιστικό τύπο του Lee

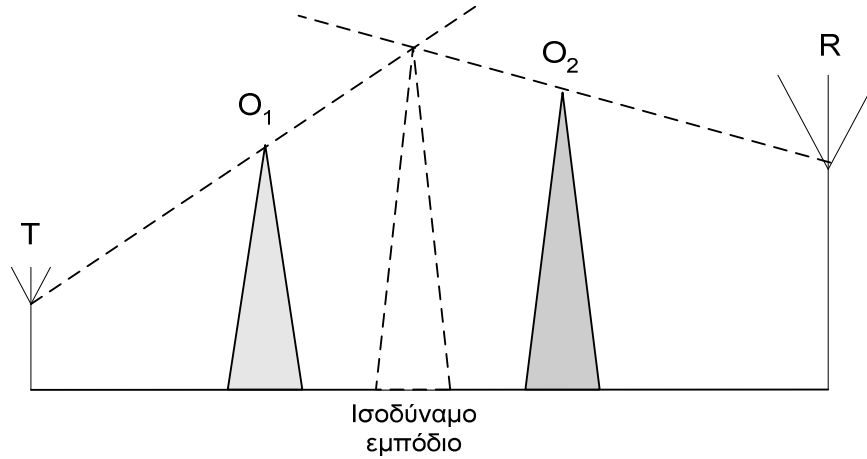


Εικόνα 16 Απώλειες περίθλασης με τον τύπο του Lee

Οι μέθοδοι που ακολουθούν αναφέρονται σε περιπτώσεις που έχουμε περισσότερα του ενός εμπόδια τα οποία εμποδίζουν την άμεση οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη.

### 2.1.7. Μέθοδος Bullington

Παρουσιάζουμε την μέθοδο Bullington αναφερόμενοι στο παρακάτω σχήμα :



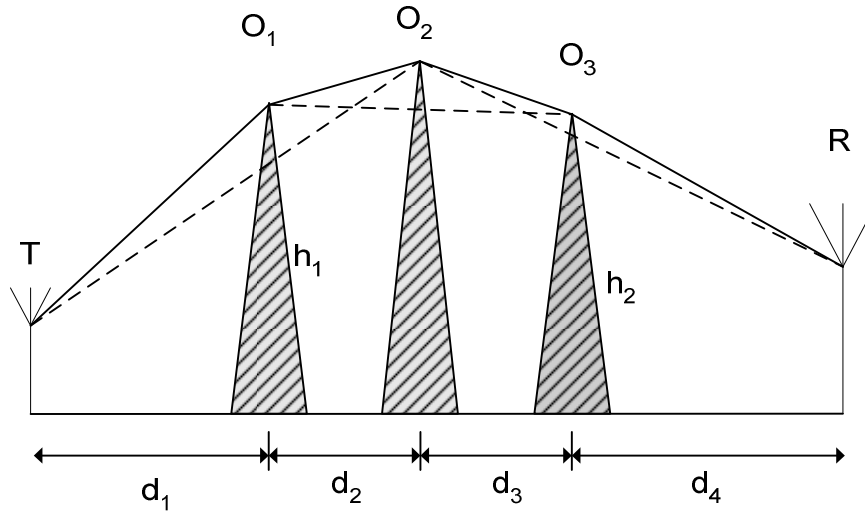
Εικόνα 17 Μέθοδος Bullington

Η μέθοδος Bullington αναφέρεται σε δύο εμπόδια  $O_1$  και  $O_2$  τα οποία εμποδίζουν την άμεση οπτική επαφή μεταξύ του πομπού (T) και του δέκτη (R). Η πρόταση που γίνεται για την επίλυση του προβλήματος είναι η αντικατάσταση των εμποδίων  $O_1$  και  $O_2$  από ένα ισοδύναμο εμπόδιο το οποίο τοποθετείται στο σημείο που τέμνονται οι ακτίνες από κάθε εμπόδιο χωριστά στην νοητή προέκταση του οριζοντα. Η θέση του «ισοδύναμου εμποδίου» καθορίζεται πλήρως τόσο οριζοντίως όσον αφορά τις αποστάσεις από τον πομπό (T) και τον δέκτη (R), όσο και καθέτως όσον αφορά το ύψος του.

Έτσι το πρόβλημα των δύο εμποδίων ανάγεται σε πρόβλημα ενός εμποδίου και μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις που προαναφέρθηκαν. Η απλότητα της μεθόδου έχει σαν αποτέλεσμα μερικές φορές τα αποτελέσματα να είναι περισσότερο αισιόδοξα από αυτό που τελικά συμβαίνει στην πράξη. Έτσι χρησιμοποιώντας την μέθοδο Bullington πρέπει να έχουμε υπόψιν μας ότι έχουμε πιθανότητα να οδηγηθούμε σε μεγάλα σφάλματα αφού βάσει της μεθόδου οδηγούμαστε στο να «αγνοούμε» βασικά εμπόδια αντικαθιστώντας τα με άλλα. Κατά συνέπεια πρέπει να την χρησιμοποιούμε με προσοχή.

### 2.1.8. Μέθοδος Epstein – Peterson

Θεωρούμε την παρακάτω διάταξη που περιλαμβάνει τρία εμπόδια  $O_1$ ,  $O_2$ ,  $O_3$  μεταξύ πομπού (T) και δέκτη (R) :



Εικόνα 18 Μέθοδος Epstein – Peterson

Η μέθοδος Epstein - Peterson ακολουθεί μια μεθοδολογία που θυμίζει την μέθοδο της επαλληλίας. Υπολογίζει χωριστά την εξασθένηση για κάθε εμπόδιο χωριστά και ισχυρίζεται ότι η συνολική απώλεια προκύπτει ως το άθροισμα των επιμέρους εξασθενήσεων. Υποθέτουμε ότι το ενεργό ύψος των εμποδίων  $O_1$  και  $O_3$  είναι  $h_1$  και  $h_2$  αντίστοιχα. Σχεδιάζουμε μια γραμμή από τον πομπό στην κορυφή του εμποδίου  $O_2$ . Οι απώλειες για το εμπόδιο  $O_1$  μπορούν να υπολογιστούν συναρτήσει των μεγεθών  $L_{O_1} = f(d_1, d_2, h_1)$ . Εν συνεχεία ενώνουμε τις κορυφές  $O_1$  και  $O_2$  και θεωρούμε ως ενεργό ύψος του  $O_2$  το ύψος πάνω από αυτή την νοητή γραμμή. Έτσι υπολογίζονται οι απώλειες για το εμπόδιο  $O_2$  συναρτήσει των μεγεθών  $L_{O_2} = f(d_2, d_3, h_2)$ . Με την ίδια λογική υπολογίζεται και η απώλεια για το εμπόδιο  $O_3$  ενώνοντας την κορυφή των  $O_2$ ,  $O_3$  με τον δέκτη (R), και η οποία προκύπτει συναρτήσει των μεγεθών  $L_{O_3} = f(d_3, d_4, h_2)$ . Η συνολική απώλεια προκύπτει από τη σχέση :

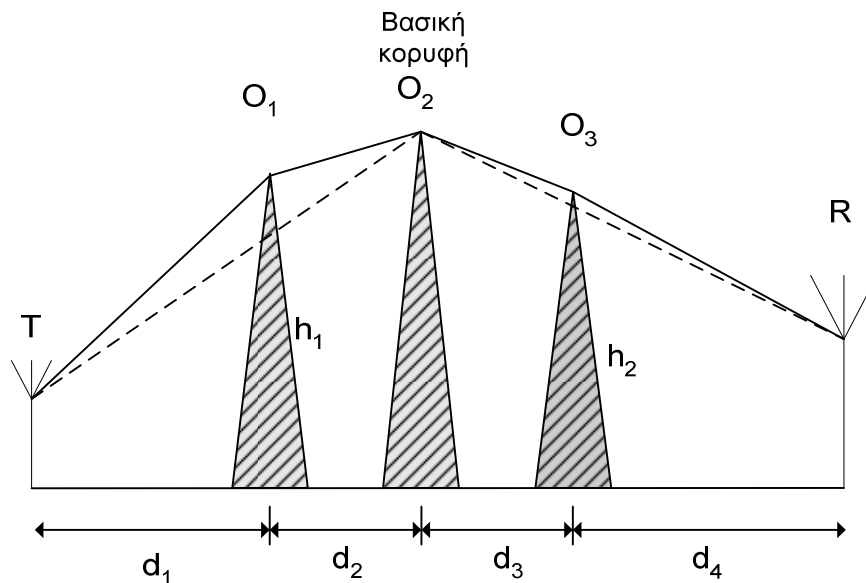
$$L = L_{O_1} + L_{O_2} + L_{O_3}$$

Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περίπτωση που έχουμε ένα ή περισσότερα εμπόδια να διεισδύουν κάτω από τη διαδρομή στις χαμηλότερες ζώνες Fresnel. Όταν

οι παράμετροι Fresnel – Kirchoff είναι πολύ μεγαλύτερες από τη μονάδα η μέθοδος παρουσιάζει σημαντικά σφάλματα.

### 2.1.9. Μέθοδος Deygout

Η μέθοδος Deygout ονομάζεται και μέθοδος βασικής κορυφής. Υποθέτουμε ότι έχουμε τρία εμπόδια όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Εικόνα 19 Μέθοδος Deygout (βασικής κορυφής)

Η κεντρική ιδέα στη μέθοδο Deygout είναι να βρούμε ποιο από τα εμπόδια (κορυφές) είναι το βασικό. Για αυτό το σκοπό υπολογίζεται για κάθε κορυφή χωριστά η παράμετρος Fresnel – Kirchoff  $v$ , θεωρώντας ότι οι υπόλοιπες δεν υπάρχουν. Στο σχήμα 25 οι υπολογισμοί θα γίνουν για τις διαδρομές  $TO_1R$ ,  $TO_2R$ ,  $TO_3R$ . Από τους υπολογισμούς κάποια κορυφή θα έχει την μεγαλύτερη τιμή  $v$ , και θα θεωρηθεί ως βασική. Για παράδειγμα αν προκύψει βασική κορυφή η  $O_2$ , οι απώλειες περίθλασης για τις  $O_1$  και  $O_3$  βρίσκονται ως προς μια γραμμή που ενώνει την βασική κορυφή με τον πομπό (T) και τον δέκτη (R). Προσθέτοντας αυτές τις απώλειες στην απώλεια βασικής κορυφής προκύπτει η συνολική απώλεια περίθλασης.

Αν η διαδρομή έχει περισσότερα εμπόδια και πάλι θα πρέπει να αθροίσουμε τις ξεχωριστά υπολογιζόμενες απώλειες από όλα τα εμπόδια κατά σειρά φθίνοντος  $v$ . Αν μεταξύ του πομπού (T) και της βασικής κορυφής ( $O_2$ ) υπάρχουν 2 εμπόδια πρέπει να βρούμε ποιο από τα δυο είναι η δευτερεύουσα βασική κορυφή βρίσκοντας την απώλεια περίθλασης και εν συνεχεία υπολογίζοντας την πρόσθετη απώλεια με την

μέθοδο που ήδη περιγράψαμε για τα υπόλοιπα εμπόδια. Συνήθως η συνολική απώλεια υπολογίζεται ως άθροισμα τριών συνιστωσών, των απωλειών βασικής κορυφής, και των δευτερευόντων βασικών κορυφών που βρίσκονται δεξιά και αριστερά της.

Η μέθοδος Deygout παρουσιάζει σφάλματα και αποκλίσεις όταν έχουμε μεγάλο αριθμό εμποδίων, ή όταν τα εμπόδια είναι πολύ κοντά μεταξύ τους. Για αυτές τις περιπτώσεις μπορούν να αναζητηθούν διορθωτικοί τύποι στην βιβλιογραφία.

### 2.1.10. Μοντέλο Egli

Το μοντέλο του Egli στην πραγματικότητα αποτελεί μια προσθήκη στο μοντέλο διάδοσης λείας επίπεδης επιφανείας (plane earth). Μετά από σειρά μετρήσεων πάνω από ανώμαλο έδαφος σε μικρή περιοχή ο Egli κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η μέση ισχύς είναι αντιστρόφως ανάλογη της τέταρτης δύναμης της απόστασης από τον πομπό (T). Εκτός αυτού όμως παρατήρησε ότι υπάρχει και ένας επιπλέον παράγοντας απώλειας β, ο οποίος εξαρτάται από τη συχνότητα και από τη φύση του εδάφους. Ο παράγοντας αυτός προστέθηκε πολλαπλασιαστικά στο μοντέλο διάδοσης επίπεδης επιφανείας (plane earth).

Η σχέση που έδωσε είναι η παρακάτω :

$$L = G_T \cdot G_R \cdot \left( \frac{h_T \cdot h_R}{d^2} \right)^2 \cdot \beta$$

Ο παράγοντας β δίνεται από τον τύπο :

$$\beta = \left( \frac{40}{f} \right)^2$$

όπου το f είναι σε MHz.

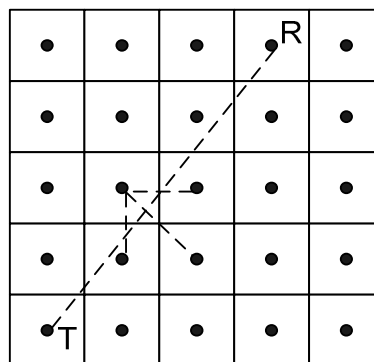
Δηλαδή σε αυτή τη σχέση τα 40 MHz έχουν θεωρηθεί η αναφορική συχνότητα στην οποία ανεξάρτητα από μεταβολές στην επιφάνεια του εδάφους η μέση απώλεια ταυτίζεται με την απώλεια του μοντέλου επίπεδης επιφανείας. Ο Egli θεωρεί ότι ο παράγοντας β είναι συνάρτηση της ανωμαλίας του εδάφους. Υποθέτοντας ότι το εδαφικό ύψος ακολουθεί κανονική λογαριθμική κατανομή γύρω από τη μέση τιμή του και συσχετίζοντας την σταθερή απόκλιση του β με αυτή της διακύμανσης του εδάφους προκύπτει μια οικογένεια ευθειών, η οποία δείχνει πώς το β εκτρέπεται από

τη μέση τιμή του στα 40 MHz, σαν συνάρτηση του εδαφικού παράγοντα και της συχνότητας μετάδοσης.

Σε γενικές γραμμές η μέθοδος Egli προέρχεται από εμπειρικές μετρήσεις και δεν λαμβάνει υπόψιν της απώλειες περίθλασης. Ακολουθεί το μοντέλο επίπεδης επιφανείας και θεωρεί λογαριθμική μεταβολή της μέσης απώλειας σήματος σε μια μικρή περιοχή.

### 2.1.11. Μέθοδος Joint Radio Committee (JRC)

Η μέθοδος Joint Radio Committee (JRC) προέρχεται από τους Edwards, Durkin και Dadson. Πίσω από την μέθοδο βρίσκεται ένα υπολογιστικό πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιεί τοπογραφικά δεδομένα λαμβάνοντας διαστήματα αναφοράς τάξης μισού χιλιομέτρου. Αναφερόμαστε στο σχήμα που ακολουθεί :



Εικόνα 20 Μέθοδος JRC - Πίνακας εδαφικών υψομέτρων

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα τοπογραφικά δεδομένα δημιουργείται η διαδρομή μεταξύ πομπού (T) και δέκτη (R) με τη μέθοδο των παρεμβολών σε γειτονικές γραμμές, στήλες και διαγώνιες. Οι θέσεις και τα ύψη των εμποδίων είναι καθορισμένα και ο αλγόριθμος εξετάζει κατά πόσο υπάρχει οπτική επαφή και εάν οι ζώνες Fresnel είναι ελεύθερες από εμπόδια στην παραπάνω διαδρομή. Εφόσον οι δύο προϋποθέσεις ικανοποιούνται η συνολική απώλεια προκύπτει από τον τύπο :

$$L = \max (L_F, L_P)$$

$L_F$  : Οι απώλειες ελεύθερου χώρου (free space loss)

$L_P$  : Οι απώλειες επίπεδης επιφανείας (plane earth)

Αν δεν υπάρχει οπτική επαφή, ή η ζώνη Fresnel δεν είναι ελεύθερη από εμπόδια ο αλγόριθμος υπολογίζει τις απώλειες περίθλασης  $L_D$  (diffraction loss) και η συνολική απώλεια δίνεται από :

$$L = \max (L_F, L_P) + L_D$$

Αν έχουμε μέχρι τρεις κορυφές για τον υπολογισμό του  $L_D$  χρησιμοποιούμε την μέθοδο Epstein–Peterson, ενώ για περισσότερες από τρεις κορυφές χρησιμοποιούμε τη μέθοδο Bullington ισοδύναμου εμποδίου. Κατά τον υπολογισμό των απωλειών επίπεδης επιφανείας υπάρχει περίπτωση να έχουμε σφάλματα εξαιτίας του γεγονότος ότι το επίπεδο αναφοράς για το ύψος της κεραίας λαμβάνεται αυτό που περνάει από τη βάση του πομπού με το μικρότερο ύψος εδάφους. Το πραγματικό επίπεδο ανάκλασης καθορίζεται με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων ως η γραμμή που ταιριάζει καλύτερα στο έδαφος μεταξύ πομπού και δέκτη.

Ένας επιπλέον περιορισμός της μεθόδου JRC είναι ότι δεν λαμβάνει υπ' όψιν τις απώλειες που οφείλονται στα δέντρα και στα κτίρια. Ωστόσο μπορούν να αναζητηθούν κατάλληλες τροποποιήσεις στην βιβλιογραφία.



### 2.1.12. Μοντέλο Blomquist – Ladell

Το μοντέλο Blomquist – Ladell (1974) προτείνει μια διαφορετική διατύπωση για τον υπολογισμό των απωλειών σύμφωνα με τον τύπο :

$$L = L_F + \sqrt{(L'_P - L_F)^2 + L_D^2}$$

$L_F$  : Οι απώλειες ελεύθερου χώρου (free space loss)

$L'_P$  : Οι τροποποιημένες απώλειες στις οποίες συμπεριλαμβάνονται απώλειες εξαιτίας της τροπόσφαιρας ή της καμπυλότητας της Γης.

$L_D$  : Οι απώλειες περίθλασης υπολογισμένες με τη μέθοδο Epstein – Peterson.

Όταν  $L_D \gg (L'_P - L_F)$  η (3.68) γράφεται :

$$L = L_F + L_D$$

Τέλος όταν η διαδρομή δεν έχει εμπόδια ( $L_D = 0\text{dB}$ ) δίνει :

$$L = L'_P$$

Μια σημαντική παρατήρηση είναι η ομοιότητα των σχέσεων του μοντέλου JRC με τις σχέσεις του μοντέλου Blomquist – Ladell.

### 2.1.13. Σκέδαση

Το φαινόμενο της σκέδασης συμβαίνει όταν το μέσο στο οποίο ταξιδεύει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα αποτελείται από μεγάλο πλήθος εμποδίων ανά μονάδα όγκου, που έχουν ίσες ή μικρότερες διαστάσεις σε σχέση με το μήκος κύματος. Αποτέλεσμα της σκέδασης είναι η επανεκπομπή της ενέργειας του πομπού προς πολλές και διαφορετικές κατευθύνσεις. Τα κύματα που οφείλονται στην σκέδαση παράγονται συνήθως από αιχμηρές επιφάνειες, μικρά αντικείμενα, ενώ ενδεικτικά παραδείγματα στην καθημερινή ζωή αποτελούν τα σήματα οδικής κυκλοφορίας, οι λαμπτήρες φωτισμού των δρόμων, το φύλλωμα των δένδρων κλπ.

Αποτέλεσμα της σκέδασης είναι η ενίσχυση του σήματος που λαμβάνεται στον δέκτη και η οποία δεν δικαιολογείται από τις μεθόδους διάδοσης της ανάκλασης ή της περίθλασης που περιγράψαμε παραπάνω.

Το μέτρο τραχύτητας μιας επιφάνειας καθορίζεται από το κριτήριο του Rayleigh. Δοθείσας της γωνίας πρόσπτωσης  $\theta_i$  και του μήκους κύματος  $\lambda$ , το κριτήριο καθορίζει μια επιφάνεια προεξοχής που έχει κρίσιμο ύψος  $h_c$  το οποίο δίνεται από τον τύπο :

$$h_c = \frac{\lambda}{8 \cdot \sin \theta_i}$$

Η επιφάνεια θεωρείται λεία αν το μέσο ύψος της προεξοχής της επιφανείας είναι μικρότερο από το κρίσιμο ύψος  $h_c$  ( $h < h_c$ ). Αν όμως το μέσο ύψος της προεξοχής της επιφάνειας είναι μεγαλύτερο από το κρίσιμο ύψος  $h_c$  ( $h > h_c$ ), τότε η επιφάνεια θεωρείται τραχεία.

### 2.1.14. Μοντέλο RCS (Radar Cross Section)

Όταν σε ένα ραδιοδιάυλο έχουμε μεγάλα σε διαστάσεις και απομακρυσμένα εμπόδια, η πρόβλεψη της ισχύος του σκεδαζόμενου σήματος απαιτεί ακριβή γνώση της θέσης των εμποδίων. Το σκεδαζόμενο πεδίο μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την γεωμετρική θεωρία της περίθλασης, ή ανάλογες θεωρίες από την οπτική φυσική. Εξίσου σημαντικός παράγοντας της σκέδασης είναι η παράμετρος της ραδιοτομής - Radar Cross Section (RCS). Ο παράγοντας RCS ορίζεται από τον λόγο της πυκνότητας ισχύος του σκεδαζόμενου σήματος κατά τη διεύθυνση του δέκτη προς

την πυκνότητα ισχύος του προσπίπτοντος ραδιοκύματος στο αντικείμενο που προκαλεί την σκέδαση. Το RCS έχει διαστάσεις επιφανείας ( $m^2$ ).

Εάν βασιστούμε στην δισδιάστατη εξίσωση ραντάρ μπορούμε να υπολογίσουμε σε αστικό περιβάλλον ποια θα είναι η λαμβανόμενη ισχύ εξαιτίας της σκέδασης στο μακρινό πεδίο τόσο του πομπού (T) όσο και του δέκτη (R). Η δισδιάστατη εξίσωση ραντάρ προβλέπει διάδοση ελεύθερου χώρου στην οποία το ηλεκτρομαγνητικό κύμα σκεδάζεται από ένα αντικείμενο και επιστρέφει ξανά πίσω στην πηγή εκπομπής του. Η έκφραση για το λαμβανόμενο σήμα δίνεται από τον τύπο :

$$P_R(dBm) = P_T(dBm) + G_T(dB) + 20 \log_{10}(\lambda) + RCS(dBm^2) - 30 \log_{10}(4\pi) - 20 \log_{10}(d_T \cdot d_R)$$

Η σχέση (3.72) αποτελεί την έκφραση για την λαμβανόμενη ισχύ στο μοντέλο RCS. Οι αποστάσεις  $d_T(m)$ ,  $d_R(m)$  εκφράζουν την απόσταση του σκεδαστή από τον πομπό και τον δέκτη αντίστοιχα. Η μεταβλητή RCS τοποθετείται σε μονάδες  $dB \cdot m^2$  και προσεγγίζεται από την επιφάνεια του σκεδαστή εκφρασμένη σε dB με αναφορά σε επιφάνεια εμβαδού  $1 m^2$ . Με το μοντέλο RCS μπορεί να προβλεφθεί η λαμβανόμενη ισχύς σε περιβάλλοντα όπου τον ρόλο του σκεδαστή παίζουν αντικείμενα μεγάλων διαστάσεων όπως κτίρια μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους. Τυπικές τιμές για το RCS ανάλογα με το αντικείμενο που προκαλεί την σκέδαση μπορούν να αναζητηθούν σε πίνακες.

## Πόλωση

Η πόλωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, δηλαδή η τροχιά που διαγράφεται από το άκρο του διανύσματος E επηρεάζει τους συντελεστές ανάκλασης, άρα και τον τρόπο που υπολογίζεται το ανακλώμενο πεδίο αφού μεταβολή στον συντελεστή ανάκλασης σημαίνει και μεταβολή στο μέτρο του πεδίου. Η πόλωση ή ο γεωμετρικός τύπος που διαγράφεται από το άκρο του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου στην περίπτωση που έχουμε να κάνουμε με ασύρματες επικοινωνίες μπορεί να είναι είτε ελλειπτική, είτε κυκλική (δεξιόστροφη ή αριστερόστροφη), και φυσικά αν είναι γραμμική θα είναι είτε κατακόρυφη είτε οριζόντια. Σε κάποιες περιπτώσεις είναι δυνατό να μπορέσουμε να αναλύσουμε μια κυκλική πόλωση ή μια ελλειπτική πόλωση στην γενική περίπτωση σε μία οριζόντια και μια κατακόρυφη.

Στα περισσότερα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών προτιμάται η γραμμική πόλωση και μάλιστα ο προσανατολισμός είναι οριζόντιος ή κάθετος ανάλογα με την

περίπτωση. Τα τελευταία χρόνια με την σχεδίαση έξυπνων κεραιών (smart antennas) υπάρχει η τάση η πόλωση που χρησιμοποιείται να γίνει κυκλική ή ελλειπτική. Προφανώς η ελλειπτική πόλωση έχει κάποια πλεονεκτήματα ειδικά εφόσον η δέσμη της κεραίας είναι πλέον κατευθυνόμενη και ίσως παρουσιάζει και λιγότερες απώλειες κατά την διάδοση. Το τίμημα για αυτό το κέρδος είναι αυξημένη πολυπλοκότητα της κεραίας του δέκτη αλλά και του πομπού.

## Η Έννοια Του Εμπειρικού Μοντέλου

Στις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις όπου μελετώνται είτε ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN's) είτε συστήματα κινητών τηλεπικοινωνιών έχει μεγάλη σημασία να

μπορεί ο μελετητής να προσδιορίσει ποσοτικά είτε τον λόγο  $\frac{P_R}{P_T}$  είτε ισοδύναμα την

έκφραση  $L = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_R}{P_T}$ , η οποία ταυτίζεται με τις απώλειες του σήματος σε dB

κατά την διάδοση του στον εκάστοτε χώρο που μελετάται. Η γνώση των παραπάνω μεγεθών επιτρέπει στον μελετητή να κάνει τις απαραίτητες ενέργειες ώστε να ικανοποιούνται μια σειρά από προδιαγραφές τις οποίες έχει ορίσει από πριν. Οι προδιαγραφές έχουν να κάνουν ενδεικτικά με την στάθμη του σήματος που πρέπει να υπερβαίνει μια ορισμένη τιμή, με τις τιμές του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου οι οποίες πρέπει να ικανοποιούν ορισμένες προδιαγραφές ασφαλείας, με την πυκνότητα ισχύος του σήματος που φτάνει σε κάθε σημείο του χώρου που μελετάται κλπ. Ειδικά για την πυκνότητα ισχύος που σε απόσταση  $d$  από τον πομπό δίνεται από τις σχέσεις :

$$S\left(\frac{W}{m^2}\right) = \frac{E^2(d)}{120\pi} \quad (3.1)$$

$$\text{ή} \quad S\left(\frac{W}{m^2}\right) = \frac{P_T \cdot G_T}{4\pi \cdot d^2} \quad (3.2)$$

πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε σύμφωνα με τους κανονισμούς ακτινοβολίας η πυκνότητα ισχύος να μην υπερβαίνει τον όρο

$$S\left(\frac{W}{m^2}\right) = \frac{f(MHz)}{200} \quad (3.3)$$

Συγκεντρώνοντας όλες τις παραπάνω έννοιες, και κυρίως τα μεγέθη άμεσου ενδιαφέροντος, όπως είναι ο λόγος λαμβανόμενου ( $P_R$ ) προς εκπεμπόμενου ( $P_T$ )

$$L = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_R}{P_T}$$

σήματος ή η έκφραση για τις απώλειες σήματος, μπορούμε να διατυπώσουμε εκτενώς μια σειρά από μοντέλα ράδιο-διάδοσης. Στα μοντέλα περιλαμβάνονται βασικά μεγέθη της ασύρματης ζεύξης όπως η συχνότητα, η απόσταση, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ήτοι το ύψος του πομπού και του δέκτη, χαρακτηριστικά εκπομπής όπως ισχύς πομπού και δέκτη ή τα κέρδη των κεραιών που εμπλέκονται στην ασύρματη ζεύξη. Οι μέθοδοι αυτοί, που στην ουσία είναι μια σειρά μαθηματικών τύπων, συγκροτούν την έννοια του *εμπειρικού μοντέλου*.

## Εξαγωγή Εμπειρικού Μοντέλου

Τα περισσότερα γνωστά εμπειρικά μοντέλα που σχετίζονται με την ασύρματη διάδοση έχουν προκύψει σαν συνδυασμός είτε αναλυτικών υπολογιστικών μεθόδων, είτε εμπειρικών μετρήσεων και προσεγγίσεων. Ο πυρήνας για την εξαγωγή ενός εμπειρικού μοντέλου είναι η όσο το δυνατόν καλύτερη αναπαραγωγή μιας ευθείας που έχει προκύψει κατόπιν μετρήσεων του λαμβανόμενου σήματος με τη βοήθεια ενός μαθηματικού τύπου. Γίνεται δηλαδή προσπάθεια μαθηματικής αναπαραγωγής των μετρήσεων. Με αυτό τον τρόπο ο κύριος άξονας ενός εμπειρικού μοντέλου έχει να κάνει με την ακρίβεια των πειραματικών μετρήσεων οι οποίες πραγματοποιούνται στο περιβάλλον που μελετάται. Αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι οι περισσότεροι πολύπλοκοι παράγοντες που υπεισέρχονται κατά την ασύρματη διάδοση γίνονται αντικείμενο της μέτρησης που λαμβάνει χώρα και όχι αντικείμενο πρόβλεψης από αυτόν που εκπονεί την μελέτη. Συγχρόνως όμως αποτελεί και μειονέκτημα, γιατί εσφαλμένες μετρήσεις από κάποιον παράγοντα που δεν λήφθηκε υπ' όψιν μπορούν να οδηγήσουν σε εσφαλμένα συμπεράσματα. Για αυτό το λόγο όταν πραγματοποιούνται μετρήσεις για την εξαγωγή ενός εμπειρικού μοντέλου γίνεται προσπάθεια να εξασφαλίζεται όσο αυτό είναι δυνατό η αξιοπιστία των μετρούμενων μεγεθών.

Ένας ενδεικτικός τρόπος είναι η μακρόχρονη μέτρηση του χώρου που πρόκειται να μελετηθεί εις βάρος της άμεσης εξαγωγής του εμπειρικού μοντέλου. Επιπλέον όταν πραγματοποιούνται μετρήσεις πρέπει να γίνονται σε πολλές και διαφορετικές συχνότητες, αφού τυχόν αλλαγή σε μια διαφορετική συχνότητα από τη συχνότητα

στην οποία εκτελείται η μέτρηση επηρεάζει κατά πολύ τα συμπεράσματα. Αυτή είναι μια ακόμα αδυναμία των εμπειρικών μοντέλων. Δηλαδή το γεγονός ότι έχουν προέλθει από σειρά μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε συγκεκριμένη συχνότητα και σε συγκεκριμένο περιβάλλον κάνει δύσκολη και επικίνδυνη την χρήση τους σε άλλες συχνότητες ή σε διαφορετικό περιβάλλον. Πολλά μοντέλα που ισχύουν σε ένα περιβάλλον ενδέχεται να είναι τελείως εσφαλμένα και να οδηγούν σε λάθος συμπεράσματα όταν εφαρμοστούν σε ένα άλλο περιβάλλον, μολονότι τα δύο περιβάλλοντα μπορεί παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες ως προς τα γεωμετρικά ή άλλα χαρακτηριστικά.

Σήμερα χρησιμοποιούνται ευρέως μερικά κλασικά μοντέλα διάδοσης όπως το μοντέλο ελεύθερου χώρου, ή το μοντέλο επίπεδης επιφανείας και τα οποία είναι αρκετά στην περίπτωση που μελετάται μια μεγάλη μεγέθους περιοχή κάλυψης. Επίσης τα παραπάνω βασικά μοντέλα χρησιμοποιούνται με κατάλληλες τροποποιήσεις για την εξαγωγή άλλων εμπειρικών μοντέλων.

## 2.2. Μοντέλα Διάδοσης

Στα δίκτυα που στηρίζονται σε ασύρματες συνδέσεις η μορφολογία του εδάφους επηρεάζει σημαντικά το σχεδιασμό τους. Τα κτίρια, τα δέντρα, τα βουνά ή άλλα εμπόδια πρέπει οπωσδήποτε να υπολογίζονται στις απώλειες του σήματος.

Τα διάφορα μοντέλα που υπάρχουν διαφέρουν ως προς την ακρίβεια, την πολυπλοκότητα καθώς και την προσέγγιση που κάνουν στον υπολογισμό των απωλειών του σήματος. Είναι απαραίτητο κατά την παρουσίαση κάθε μοντέλου να αναφέρονται οι συχνότητες τις οποίες καλύπτει, τα υψομετρικά στοιχεία του δέκτη και του πομπού και η οριζόντια απόστασή τους που καλύπτει.

Οι εξωτερικοί χώροι χωρίζονται στις κάτωθι κατηγορίες:

- **Ανοιχτός χώρος:** Περιοχή εκτός πόλεων συνήθως αγροτική με ακατέργαστο έδαφος, μικρές και λίγες κατοικίες, αποθήκες και λίγο πληθυσμό.
- **Βιομηχανικός χώρος:** Περιοχή με μεγάλες μονάδες βιομηχανιών, αγροτικές εγκαταστάσεις και καλώδια μεταφοράς υψηλής τάσης ρεύματος.
- **Ημιαστικός χώρος:** Περιοχή με κτίρια επαγγελματικά ή στέγασης, εμπορικά κέντρα, αποθήκες και μεσαία κυκλοφορία αυτοκινήτων.
- **Μικρο-μεσαία πόλη:** Περιοχή με αρκετό πληθυσμό, ψηλά κτίρια και βιομηχανικές ζώνες.
- **Μεγάλη πόλη:** Περιοχή με τεράστιο πληθυσμό, πολύ ψηλά κτίρια, κίνηση και βαριές βιομηχανίες.

### 2.2.1. Μοντέλο Okumura – Hata

Η μέθοδος του Okumura βασίζεται σε μετρήσεις που πάρθηκαν στο Τόκυο και δίνει μία καμπύλη προσέγγισης των απωλειών.

Το πρότυπο καθορίζει το κατάλληλο ύψος της κεραίας έτσι ώστε η ένταση να είναι κατάλληλη για κάθε μορφολογία εδάφους. Το πρότυπο διαθέτει επίσης διάφορες διορθώσεις αναλόγως της μορφολογίας του εδάφους και των τύπων των κτιρίων.

Το πρότυπο εφαρμόζεται για εύρος συχνοτήτων από 150 Mhz έως 2000 Mhz, για αποστάσεις από 1 km έως 100 km και ύψος κεραίας από 30 m έως 1000 μέτρα.

Ο διορθωτικός παράγοντας έχει σχεδιαστεί στο εύρος συχνοτήτων από 100MHz έως 1920MHz για ανοιχτό χώρο (open area), ημιανοικτό χώρο (quasi open area) και ημιαστικό χώρο (suburban area).

Το μοντέλο Okumura είναι αρκετά απλό, δίνει με μεγάλη ακρίβεια τις απώλειες για συστήματα κινητών τηλεπικοινωνιών ή επίγειες ασύρματες συνδέσεις. Τα μειονεκτήματά του είναι οι αδυναμία του να ανταποκριθεί γρήγορα στις αλλαγές της επιφάνειας του περιβάλλοντος και η όχι και τόσο ακριβής ανταπόκριση του σε αγροτικές περιοχές. Ωστόσο σε αστικό ή ημιαστικό περιβάλλον θεωρείται αρκετά αξιόπιστο. Οι αποκλίσεις μεταξύ προβλεπόμενων μεγεθών και μετρούμενων είναι μεταξύ 10dB και 14dB.

Το πρότυπο Okumura δεν διαθέτει τύπους για τον υπολογισμό των απωλειών. Το πρότυπο Hata εισάγει τύπους βάση μελετών των καμπυλών του Okumura για τον εμπειρικό υπολογισμό των απωλειών.

Οι απώλειες υπολογίζονται από τον παρακάτω τύπο:

$$L_p = 69.55 + 26.16 \log f + 13.82 \log h_b - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log h_b) \log d$$

Όπου:

$h_b$  : το ύψος της κεραίας του BTS

$h_m$  : το ύψος της κεραίας του κινητού.

Η παράμετρος  $a(h_m)$  αποτελεί παράγοντα διορθώσεως για το ύψος της κεραίας του κινητού.

Το πρότυπο ισχύει για:

Συχνότητες από 150 Mhz έως 1500 Mhz

Αποστάσεις από 1 km έως 20 km

Ύψος BTS από 30 m έως 200 m

Ύψος κεραίας κινητού από 1 m έως 10 m

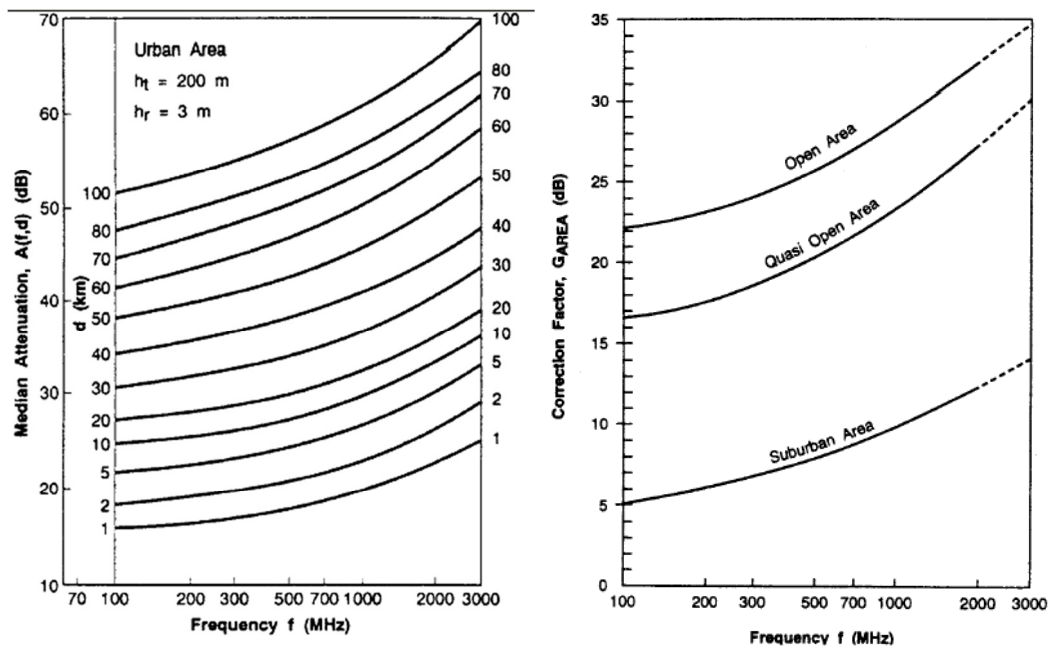


## 2.2.2. Μοντέλο Cost-231 Hata

Το πρότυπο Hata όπως αναφέρθηκε ισχύει για συχνότητες έως 1500 Mhz σε αυτή την παραδοχή της Ευρωπαϊκής ένωσης οι απώλειες υπολογίζονται και για συχνότητες από 1500 Mhz έως 2000 Mhz σύμφωνα με τον τύπο:

$$L_p = 46.3 + 33.9 \log f - 13.82 \log h_b - a(h_m) + 44.9 - 6.55 \log h_b \log d + C_m$$

Όπου  $C_m = 0$  dB για μεσαίου μεγέθους πόλεις και  $C_m$  για μεγάλες πόλεις.



Εικόνα 21 Καμπύλες προτύπου Okumura.

## 2.2.3. Μοντέλο Rayleigh

Πρόκειται για ένα πολύ διαδεδομένο μοντέλο που επιχειρεί να προσομοιώσει την επίδραση του καναλιού σε ένα σήμα που μεταδίδεται σε περιβάλλον με πολλαπλές ανακλαστικές επιφάνειες, όπως για παράδειγμα σε πυκνά δομημένο αστικό περιβάλλον. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για τα κέντρα μεγαλουπόλεων, αλλά βρίσκει επίσης εφαρμογή και στις περιπτώσεις ιονοσφαιρικής και τροποσφαιρικής σκέδασης.

Το μοντέλο Rayleigh αφορά περιβάλλοντα στα οποία δεν υπάρχει οπτική επαφή (Line of Sight-LOS), αλλά πολλά κτίρια και αντικείμενα που προκαλούν ανάκλαση, διάθλαση, περίθλαση και εξασθένιση του σήματος. Μέσω του θεωρήματος κεντρικού ορίου, αποδεικνύεται πως όταν υπάρχει ικανός αριθμός σκεδαστών στο περιβάλλον, η κρουστική απόκριση του καναλιού μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια Gaussian

διαδικασία. Όταν δεν υπάρχει κυρίαρχη συνιστώσα του σήματος (απουσία οπτικής επαφής), η διαδικασία αυτή θα έχει μηδενική μέση τιμή και ομοιόμορφα κατανεμημένη φάση μεταξύ 0 και 2π. Τότε ο φάκελος της κρουστικής απόκρισης του καναλιού θα ακολουθεί κατανομή Rayleigh.

Η τυχαία μεταβλητή , που αντιπροσωπεύει την κρουστική απόκριση του καναλιού, ακολουθεί κατανομή Gauss, το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της έχουν μηδενική μέση τιμή ενώ το πλάτος της  $a$  είναι μια τυχαία Rayleigh μεταβλητή με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function-pdf) που δίνεται από τον τύπο:

$$p_a(a) = \frac{2a}{\Omega} \exp\left(-\frac{a^2}{\Omega}\right), a \geq 0$$

όπου το  $\Omega = E\{a^2\}$  είναι η συνολική διακύμανση της τυχαίας μεταβλητής  $a$ .

#### 2.2.4. Μοντέλο Ikegami

Το πρότυπο αυτό χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των απωλειών σε αστικά περιβάλλοντα. Συγκεκριμένα μελετά τον επηρεασμό του σήματος από τις στέγες των κτιρίων. Για την ακρίβεια προβλέπει την λήψη δύο σημάτων από την φορητή συσκευή ενός απευθείας από την κεραία κινητής τηλεφωνίας και ενός από ανάκλαση.

Ο τύπος υπολογισμού των απωλειών είναι ο:

$$L_I = 16.9 - 10 \log x + 20 \log(H - hm) + 10 \log f(\sin \varphi)$$

Όπου:

$\chi$  : το πλάτος των δρόμων

$H$  : το ύψος του κτηρίου

$\Phi$  : ο προσανατολισμός του δρόμου σε συνάρτηση με το προσπίπτον κύμα



Τα μειονεκτήματα αυτού του μοντέλου είναι η έλλειψη διορθωτικών παραγόντων όσον αφορά το είδος του εδάφους και η έλλειψη υπολογισμού των γειτονικών παρεμβολών που μπορούν να προκύψουν. Επίσης δεν προβλέπει παρεμβολές που μπορούν να εμφανιστούν λόγω ψηλών κτιρίων.

### 2.2.6. Μοντέλο Walfisch – Bertoni

Το μοντέλο αυτό υπολογισμού των απωλειών εφαρμόζεται σε αστικά περιβάλλοντα και περιλαμβάνει περισσότερες μεταβλητές εκτίμησης σε σχέση με τα υπόλοιπα πρότυπα. Το μοντέλο αυτό καλύπτει τις απώλειες που προκύπτουν σε πυκνοκατοικημένες περιοχές και οι κεραίες είναι τοποθετημένες στις ταράτσες των κτηρίων οπότε και δεν υπάρχει οπτική επαφή με τις κινητές συσκευές.

Οι απώλειες υπολογίζονται βάση των απωλειών σε ελεύθερο χώρο, τη διάθλαση του σήματος από τις στέγες και τη διάθλαση των πεδίων.

Το πρότυπο έχει σαν δεδομένο ότι τα κτήρια είναι ομοιόμορφα και ότι οι δρόμοι είναι κανονικού μεγέθους.

Η συμβολή υπολογίζεται από τον τύπο:

$$L_{su} = 57.1 + A + \log f - 18 \log a$$

Όπου:

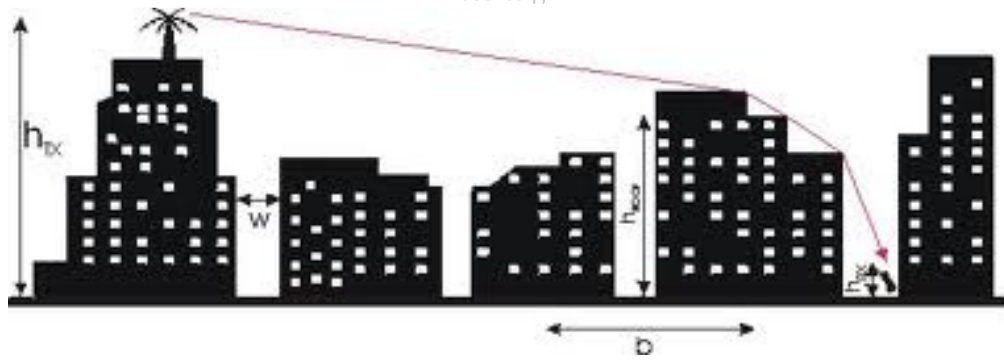
$\alpha$  : η γωνία μεταξύ του προσπίπτοντος σήματος και του εδάφους και δίνεται από τον τύπο:

$$\alpha = \frac{\Delta H}{d} + \frac{d}{2Re}$$

Όπου:

$\Delta H$  : η διαφορά του ύψους των κτιρίων και της κεραίας του BTS

$Re$  : η ακτίνα της γης που είναι  $8.5 \times 10^3$  km



Εικόνα 23 Αναπαράσταση μετρήσεων μοντέλου Walfisch – Bertoni

Ο όρος A υπολογίζεται από τον τύπο:

$$A = 5 \log \left[ \left( \frac{b}{2} \right)^2 + (H - hm)^2 \right] - 9 \log b + 20 \log b + 20 \log \left\{ \tan^{-1} \left[ \frac{2(H - hm)}{b} \right] \right\}$$

Όπου:

b : η απόσταση ανάμεσα στα κτήρια

Οι συνολικές απώλειες διαδρομής υπολογίζονται από τον τύπο:

$$L_{total} = L_{su} + L_{sp} = 20 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) + 57.1 + A + \log f - 18 \log a$$

### 2.2.7. Μοντέλο Cost-231 Walfisch – Ikegami

Αυτό το πρότυπο είναι συνδυασμός των 2 πρότυπων που αναφέρθηκαν παραπάνω μιας και κανένα από τα παραπάνω δεν είναι κατάλληλο για να εκτιμήσει τις απώλειες από απευθείας οπτική επαφή χρησιμοποιούμε αυτό το πρότυπο.

Χρησιμοποιείται για:

- Συχνότητες από 800 Mhz έως 1200 Mhz
- Αποστάσεις από 0,02 km έως 5 km
- Ύψος κεραίας BTS από 4 m έως 50 m
- Ύψος κεραίας κινητής συσκευής από 1 m έως 3 m.

Για επίπεδο έδαφος και ομοιόμορφα ύψη και αποστάσεις των κτηρίων.

Για τον υπολογισμό των απωλειών χρησιμοποιούμε δύο περιπτώσεις.

1. Την περίπτωση της οπτικής επαφής των 2 κεραιών όπου ο τύπος εκτίμησης των επιπλέον απωλειών πορείας είναι ο:

$$L_p = 42.6 + 26 \log d + 20 \log f$$

Ο παραπάνω τύπος ισχύει για  $d > 0.02 \text{ km}$

Οι συνολικές απώλειες υπολογίζονται από τον τύπο:

$$\begin{aligned} L &= L_p + L_r + L_{su} \\ &= 42.6 + 26 \log d + 20 \log f + 16.9 - 10 \log x + 20 \log(H - hm) \\ &\quad + 10 \log f + 10 \log(\sin \varphi) + 57.1 + A + \log f - 18 \log a \end{aligned}$$

Όπου το  $L_p$  υπολογίζεται ως εξής:

- $-10 + 0,354\varphi$  "για"  $0 \leq \varphi \leq 35^\circ$
- $2.5 + 0,075(\varphi - 35)$  "για"  $35 \leq \varphi \leq 55^\circ$
- $4.0 + 0,114(\varphi - 55)$  "για"  $55 \leq \varphi \leq 90^\circ$

2. Την περίπτωση της μη οπτικής επαφής όπου ισχύει ο τύπος:

$$L = L_{sp} + L_r + L_{su}$$

Και οι συνολικές απώλειες υπολογίζονται από τον τύπο:

$$\begin{aligned} L &= L_{sp} + L_r + L_{su} \\ &= 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) + 16.9 - 10 \log x + 20 \log(H - hm) + 10 \log f \\ &\quad + 10 \log(\sin \varphi) + 57.1 + A + \log f - 10 \log a \end{aligned}$$

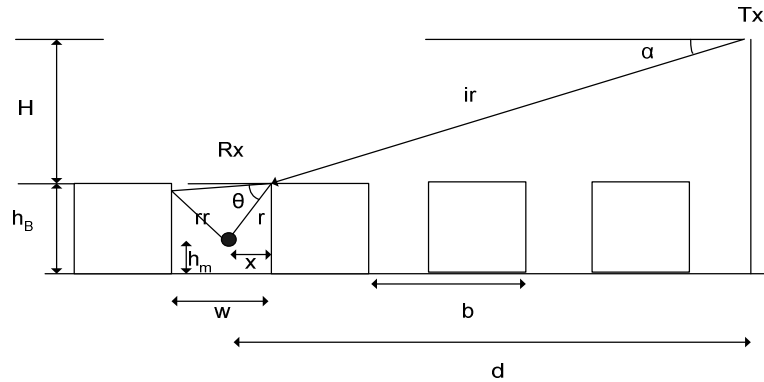
Το μοντέλο υπολογίζει απώλειες για τυπικές τιμές:

$H_m$  : 1.5 m

$b$  : από 40 m έως 50 m

$H$  : από 20 m έως 40 m

$x$  : 20 με 25 μέτρα



Εικόνα 24 Αναπαράσταση μετρήσεων μοντέλου Walfisch – Ikegami

### 2.2.8. Μοντέλο Keenan-Montley

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των απωλειών του σήματος σε εσωτερικούς χώρους, με κεραιosuστήματα και δέκτες μέσα σε κτίρια.

Σε αυτό το πρότυπο λαμβάνεται υπόψιν μόνο η άμεση διαδρομή μεταξύ του πομπού και του δέκτη.

Ο τύπος υπολογισμού των απωλειών είναι ο:

$$Lp = 20 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) + \alpha K + bW$$

όπου:

d: η απόσταση μεταξύ πομπού-δέκτη

α: το πλήθος των ορόφων

K: ο παράγοντας της εξασθένησης του σήματος λόγω των ορόφων

b: το πλήθος των τοίχων

W: ο παράγοντας εξασθένησης του σήματος λόγω των τοίχων

Ο πρώτος όρος αναφέρεται στην απώλεια πορείας της διάδοσης σε κενό χώρο.

Το πρότυπο επιδέχεται διορθώσεις όσον αφορά την τοποθεσία της κεραιάς. Έτσι το n αναλόγως της θέσης της κεραιάς ορίζεται για τον κάτωθι τύπο ως

$$L(x) = L(x_0) + 10n \log \left( \frac{x}{x_0} \right)$$

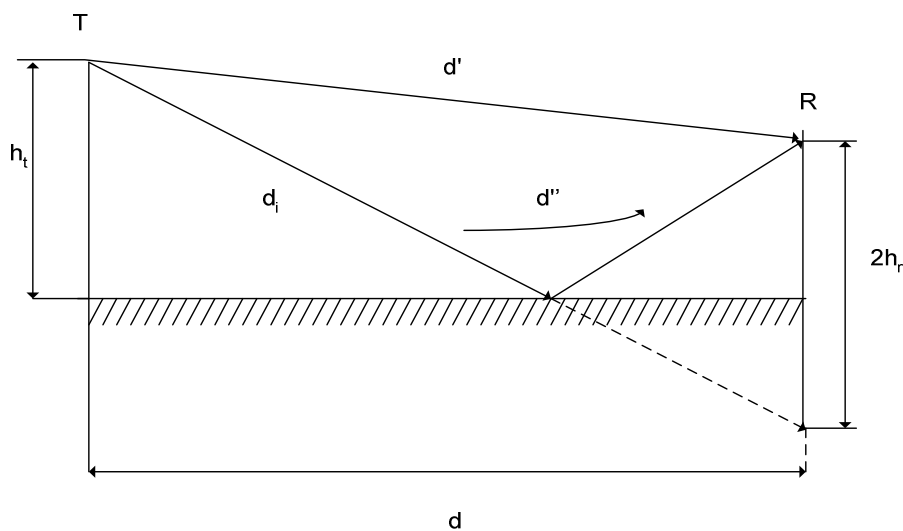
Όπου:

- $n = 1.3$  για την κατηγορία διάδρομος-διάδρομος όπου ισχύει όταν και οι 2 κεραίες εκπομπής και λήψης βρίσκονται σε ένα διάδρομο.
- $n = 3.1$  για την κατηγορία διάδρομος-δωμάτιο όπου ισχύει όταν μία κεραία βρίσκεται σε έναν διάδρομο και η άλλη σε ένα δωμάτιο.
- $n = 4.1$  για την κατηγορία δωμάτιο-δωμάτιο όταν η κεραία λήψης και εκπομπής βρίσκονται σε διαφορετικά δωμάτια.

### 2.2.9. Μοντέλο δύο ακτινών

Το μοντέλο δύο ακτινών υπολογίζει το πεδίο στον δέκτη θεωρώντας ότι αυτό προκύπτει από τη συμβολή του απευθείας και του ανακλώμενου στο έδαφος πεδίου.

Η εικόνα αυτή περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα :



Εικόνα 24 Το μοντέλο δύο ακτινών

Οι συνολικές απώλειες προκύπτουν από τον τύπο:

$$L = 20 \cdot \log_{10} \left[ \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right) \cdot \left| \frac{\exp(-jkr_1)}{r_1} + \Gamma \cdot \frac{\exp(-jkr_2)}{r_2} \right| \right]$$

Όπου:

$\Gamma$  : ο συντελεστής Fresnel του εδάφους

$\lambda$  : το μήκος κύματος

$k$  : ο κυματάριθμος



$r_1, r_2$  : αποστάσεις που αντιστοιχούν στην απευθείας και στην ανακλώμενη διαδρομή του σήματος αντίστοιχα

Το μοντέλο αυτό είναι ιδανικό για αγροτικά περιβάλλοντα με επίπεδο έδαφος καθώς και για εφαρμογή σε μικροκυψέλες όπου υπάρχει άμεση οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη (LoS).

Εάν οι απώλειες γραφτούν συναρτήσει της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη  $d$ , μπορεί να αποδειχθεί ότι η εξάρτηση των απωλειών από το  $d$  αποτελείται από δύο καμπύλες με διαφορετική κλίση ( $n_1$  και  $n_2$ ). Το σημείο ασυνέχειας εμφανίζεται σε απόσταση  $d_b$  από τον πομπό που δίνεται από τη σχέση :

$$d_b = \frac{4 \cdot h_t \cdot h_r}{\lambda}$$

Όπου:

$h_t, h_r$  : τα ύψη των κεραιών του πομπού και του δέκτη αντίστοιχα (m)

Επομένως το σημείο ασυνέχειας βρίσκεται εκεί όπου η ελλειψοειδής ζώνη Fresnel από το απευθείας κύμα εφάπτεται στο έδαφος.

Οι απώλειες μπορούν να γραφτούν ως εξής :

$$L = \begin{cases} L_1 + 10 \cdot n_1 \cdot \log_{10} d & \text{οταν } 1 < d < d_b \\ L_1 + 10 \cdot n_2 \cdot \log_{10} \left( \frac{d}{d_b} \right) + 10 \cdot n_1 \cdot \log_{10} d_b & \text{οταν } d > d_b \end{cases}$$

όπου

$L_1$  : οι απώλειες σε απόσταση αναφοράς 1m

Για το θεωρητικό μοντέλο two ray οι τιμές των  $n_1$  και  $n_2$  είναι ίσες με 2 και 4 αντίστοιχα. Μετρήσεις σε αστικές μικροκυψέλες στις συχνότητες των 1800MHz και 1900MHz δείχνουν για το μεν  $n_1$  τιμή μεταξύ 2 και 2,3 και για το  $n_2$  μεταξύ 3,3 και 13,3 αντίστοιχα.

Μια παραλλαγή για το μοντέλο είναι και αυτή που δίνει τις απώλειες από την παρακάτω σχέση συναρτήσσει του σημείου ασυνέχειας  $d_b$  :

$$L = \begin{cases} 40 + 25 \cdot \log_{10} d & \text{οταν } d < \frac{d_b}{2} \\ 40 + 25 \cdot \log_{10} \left( \frac{d_b}{2} \right) + 40 \cdot \log_{10} \left( \frac{2 \cdot d}{d_b} \right) & \text{οταν } \frac{d_b}{2} \leq d < 4 \cdot d_b \\ 40 + 25 \cdot \log_{10} \left( \frac{d_b}{2} \right) + 40 \cdot \log_{10} (4 \cdot d_b) + 60 \cdot \log_{10} \left( \frac{d}{4 \cdot d_b} \right) & \text{οταν } d \geq 4 \cdot d_b \end{cases}$$

### 2.2.10. Μοντέλο Uni-Land

Το μοντέλο Uni – Lund προτάθηκε από το πανεπιστήμιο Lund στη Σουηδία. Είναι έγκυρο όταν η κεραία του πομπού βρίσκεται κάτω από το επίπεδο οροφής των κτιρίων. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη του τις απώλειες από την απευθείας διαδρομή μεταξύ πομπού και δέκτη αλλά και τις απώλειες που δεν οφείλονται σε απευθείας διαδρομές.

Οι απώλειες σήματος LoS δίνονται από τη σχέση :

$$L = 10 \cdot \log_{10} k + \frac{10}{4} \cdot \log_{10} (l_1^4 + l_2^4)$$

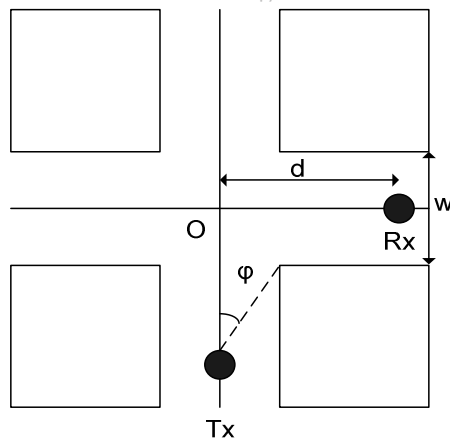
Όπου:

$$l_1 = d^{n1}$$

$$l_2 = d^{n2} * d^{n1-n2}$$

$d$  : η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη και δίνεται από τον τύπο:

$$d_b = \frac{4 \cdot h_t \cdot h_r}{\lambda}$$



Εικόνα 25 Σχηματική απεικόνιση μετρήσεων μοντέλου Uni-land

Ο υπολογισμός των απωλειών NLoS γίνεται αφού πρώτα υπολογίσουμε τις απώλειες LoS μέχρι το σημείο O, και στη συνέχεια προσθέσουμε τον δεύτερο όρο ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$L = 10 \cdot [u(d_1) - u(d_2)] \cdot \log_{10} \left( \frac{d_2}{d_o} \right)^n \cdot \frac{\log_{10} d - \log_{10} d_1}{\log_{10} d_2 - \log_{10} d_1} + 10 \cdot u(d_2) \cdot \log_{10} \left( \frac{d}{d_o} \right)^n$$

Όπου:

$u(x)$  : η μοναδιαία βηματική συνάρτηση

$d_0$  :  $8.92 * \varphi + 1.7$

$d_1$  :  $10.7 * \varphi + 0.11 * w + 2.99$

$d_2$  :  $0.31 * w + 4.9$

$n$  :  $2.75 - 1.13 * e^{-23.4 * \varphi}$

$w$  : πλάτος δρόμου

$\varphi$  : γωνία μεταξύ κτηρίου και σκίασης

## Φαινόμενο Doppler

Το φαινόμενο Ντόπλερ είναι η παρατηρούμενη αλλαγή στη συχνότητα και το μήκος κύματος ενός κύματος από παρατηρητή που βρίσκεται σε σχετική κίνηση με την πηγή των κυμάτων. Ονομάστηκε προς τιμήν του αυστριακού φυσικού Κρίστιαν Ντόπλερ (*Christian Doppler*), που το πρότεινε το 1842. Το φαινόμενο παρατηρείται συχνά όταν πλησιάζει και απομακρύνεται ένα όχημα που έχει σειρήνα (πχ ασθενοφόρο) ή κάνει θόρυβο (πχ μηχανές). Συγκεκριμένα η συχνότητα του ήχου αυξάνεται όταν πλησιάζει το όχημα τον παρατηρητή, ενώ μειώνεται όταν απομακρύνεται από αυτόν.

Για κύματα όπως τα ηχητικά κύματα, που διαδίδονται μέσα σε κάποιο υλικό μέσο, η ταχύτητα τόσο του παρατηρητή όσο και της πηγής, πρέπει να προσδιορίζεται σε σχέση με το μέσο διάδοσης. Το τελικό φαινόμενο Ντόπλερ μπορεί επομένως να προκύψει από την κίνηση του παρατηρητή, από την κίνηση της πηγής και από την κίνηση του μέσου διάδοσης. Για κύματα που δεν χρειάζονται ένα υλικό μέσο για τη διάδοσή τους, όπως τα ηλεκτρομαγνητικά (φως) ή τα βαρυτικά κύματα στην ειδική σχετικότητα, μόνο η σχετική ταχύτητα του παρατηρητή και της πηγής παίζει ρόλο.

### Γενική μορφή του φαινομένου

Για κύματα που διαδίδονται μέσα σε ένα υλικό μέσο (ηχητικά, υπερηχητικά, κύματα πίεσης κλπ.), η σχέση μεταξύ παρατηρούμενης συχνότητας ( $\nu'$ ) και εκπεμπόμενης (πραγματικής) συχνότητας ( $\nu$ ) δίνεται από τη σχέση:

$$\nu' = \left( \frac{v \pm v_o}{v \mp v_s} \right) \nu$$

όπου

$v$  είναι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος (π.χ. 340 m/s για τον ήχο στον αέρα),

$v_o$  είναι η ταχύτητα του παρατηρητή ως προς το μέσο διάδοσης, και

$v_s$  είναι η ταχύτητα της πηγής (που εκπέμπει το κύμα) ως προς το μέσο διάδοσης.

Τα πρόσημα στις ταχύτητες ακολουθούν την εξής σύμβαση: μια θετική τιμή σημαίνει κίνηση του παρατηρητή προς την πηγή, ενώ μια αρνητική τιμή

σημαίνει *απομάκρυνση* από την πηγή. Για την ταχύτητα της πηγής ισχύει η αντίστροφη σύμβαση.

Ένας καλός μνημονικός κανόνας είναι ο εξής: τόσο για τον παρατηρητή όσο και για την πηγή, το «πλησίασμα» έχει την τάση να αυξήσει τη συχνότητα, ενώ η «απομάκρυνση» την τάση να μειώσει τη συχνότητα, με τις φορές των κινήσεων να λαμβάνονται πάντοτε σε σχέση με το μέσο διάδοσης. Έχει σημασία να καταλάβουμε ότι όταν για παράδειγμα η φορά της κίνησης του παρατηρητή είναι «προς» την πηγή, δεν σημαίνει απαραίτητα ότι την πλησιάζει - μπορεί η πηγή να απομακρύνεται με μεγαλύτερη ταχύτητα. Για την εύρεση όμως του σωστού πρόσημου, αρκεί να γνωρίζουμε την «τάση» της πηγής ή του παρατηρητή να πλησιάζουν ή να απομακρύνονται, ανεξάρτητα από το τελικό αποτέλεσμα. Η τελική τιμή της συχνότητας θα προκύψει από τη σχετική «δύναμη» του αριθμητή και του παρονομαστή στον παραπάνω τύπο, και μπορεί να είναι μικρότερη, μεγαλύτερη ή και ίση με την πραγματική συχνότητα, ανάλογα με τον παράγοντα που υπερισχύει.

## **Εφαρμογές**

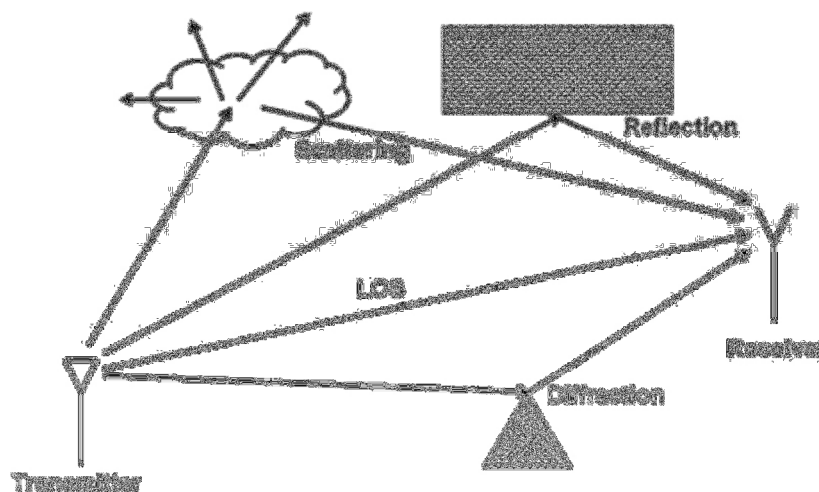
Με βάση το φαινόμενο Ντόπλερ μπορεί να υπολογιστεί η μεταβολή της θέσης της πηγής των κυμάτων. Κύρια εφαρμογή του φαινομένου Ντόπλερ είναι το ραντάρ, όπου εκπέμπονται κύματα με σκοπό να αντανakλαστούν από τα ζητούμενα αντικείμενα. Με βάση τη συχνότητα του αντανakλώμενου κύματος μπορεί να υπολογιστεί η θέση και η ταχύτητά τους.

Μερικές από τις εφαρμογές του φαινομένου Doppler είναι:

- Ραντάρ ταχύτητας, που χρησιμοποιεί η αστυνομία
- Αστρονομία: Εύρεση της Ακτινικής ταχύτητας των άστρων
- Αστρονομία: Εύρεση της θερμοκρασίας των άστρων
- Ιατρικές συσκευές για μέτρηση της ταχύτητας του αίματος στην καρδιά

## Διαλείψεις

Κατά τη μετάδοση ενός σήματος μέσω ασύρματου καναλιού υπάρχουν διάφορα φυσικά φαινόμενα που πρέπει να ληφθούν υπόψη, προκειμένου να γίνει μια σωστή πρόβλεψη της επίδρασης του καναλιού στο σήμα. Η βασική ιδιαιτερότητα του ασύρματου καναλιού είναι η ύπαρξη πολλών διαφορετικών επιφανειών, οι οποίες παρεμβάλλονται στην πορεία του σήματος. Οι διαλείψεις είναι ένα φαινόμενο που παρατηρείται εξαιτίας της παρεμβολής δύο ή περισσότερων εκδοχών του μεταδιδόμενου σήματος οι οποίες φτάνουν στο δέκτη σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Αυτά τα σήματα, τα οποία ονομάζονται πολυκαναλικά κύματα, συνδυάζονται στην κεραία του δέκτη και δημιουργούν ένα νέο σήμα. Το σήμα που προκύπτει από το συνδυασμό αυτό μπορεί να ποικίλει ευρέως στο πλάτος και τη φάση. Εάν υπάρχει απ' ευθείας μονοπάτι ζεύξης ανάμεσα στον πομπό και το δέκτη τότε η μεταδιδόμενη μέσω της διαδρομής αυτής συνιστώσα ονομάζεται συνιστώσα οπτικής επαφής (Line of Sight – LOS) και έχει ντετερμινιστικά χαρακτηριστικά. Η συνιστώσα LOS δεν υπάρχει όταν μεγάλα εμπόδια παρεμποδίζουν την οπτική επαφή του πομπού με το δέκτη, ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις η συνιστώσα αυτή δεν είναι το μοναδικό μονοπάτι που μπορεί να ακολουθήσει ένα σήμα κατά τη μετάδοση του από τον πομπό στο δέκτη. Αξίζει να σημειωθεί βέβαια ότι το λαμβανόμενο σήμα που προέρχεται από LOS είναι το ισχυρότερο και αυτό που τελικά επικρατεί.



Εικόνα 26 Μηχανισμοί διάδοσης σήματος σε ασύρματο κανάλι

Όπως φαίνεται στην εικόνα, το σήμα χωρίζεται σε συνιστώσες που ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές και υπόκεινται στους μηχανισμούς της ανάκλασης (reflection), περίθλασης (diffraction) ή σκέδασης (scattering) πριν φτάσουν στο δέκτη. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό, το οποίο δυσχεραίνει την ανίχνευση του σήματος στο δέκτη, είναι η χρονική μεταβλητότητα των επιδράσεων των μηχανισμών αυτών στο σήμα, καθώς, ακόμη και για σταθερό πομπό και δέκτη, το περιβάλλον δεν είναι στατικό. Πιο συγκεκριμένα, ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα μπορεί να ανακλαστεί όταν συναντήσει ένα αντικείμενο το οποίο είναι πολύ μεγαλύτερο από το μήκος κύματος. Από την ανάκλαση πάνω σε πολλές επιφάνειες είναι εφικτό το σήμα να καταλήξει στο δέκτη. Άλλες δύο περιπτώσεις που οδηγούν σε μετάδοση του σήματος με διαλείψεις και αξίζει να αναφερθούν είναι η περίθλαση και η σκέδαση. Η περίθλαση συμβαίνει όταν το ηλεκτρομαγνητικό σήμα προσκρούσει σε μία επιφάνεια με αιχμηρά άκρα. Η σκέδαση συμβαίνει όταν υπάρχει ένας αριθμός από αντικείμενα μικρότερα από το μήκος κύματος και παρεμβάλλονται ανάμεσα στον πομπό και το δέκτη. Προσκρούοντας στις επιφάνειες αυτές το σήμα σκεδιάζεται και διαδίδεται προς διάφορες κατευθύνσεις.

Υπάρχουν δύο βασικοί μηχανισμοί διαλείψεων, που επηρεάζουν τη μορφή του λαμβανόμενου σήματος. Πρόκειται για τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (large scale fading) και τις διαλείψεις μικρής κλίμακας (small scale fading). Η πρώτη κατηγορία διαλείψεων αφορά τη σταδιακή εξασθένιση της ισχύος του σήματος με τη διανυόμενη απόσταση, που οφείλεται κυρίως στις απώλειες διάδοσης του σήματος λόγω της απόστασης. Η μείωση της ισχύος του μέσου λαμβανόμενου σήματος με την απόσταση είναι λογαριθμική και έχει ντετερμινιστικό χαρακτήρα.

Αντίθετα, οι διαλείψεις μικρής κλίμακας οφείλονται στην ύπαρξη πολλαπλών συνιστωσών του σήματος, που προέρχονται από διαφορετικές διαδρομές που ακολούθησε το αρχικό σήμα πριν φτάσει στο δέκτη. Η υπέρθεση των συνιστωσών αυτών μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες για την επικοινωνία σε ορισμένες χρονικές στιγμές. Ο λόγος είναι ότι η υπέρθεση των διαφόρων συνιστωσών μπορεί να γίνει εποικοδομητικά (constructive) ή καταστροφικά (destructive), ενισχύοντας ή εξασθενώντας την ισχύ του σήματος ανάλογα. Σε ορισμένες χρονικές στιγμές, η εξασθένιση του σήματος είναι τόση, ώστε η σηματοθορυβική σχέση του λαμβανόμενου σήματος να είναι μικρότερη από την ελάχιστη σηματοθορυβική σχέση που απαιτείται για την ανάκτηση της πληροφορίας. Η περίπτωση αυτή αναφέρεται ως

βαθιά διάλειψη (deep fading) και έχει ως αποτέλεσμα την προσωρινή διακοπή της επικοινωνίας.

Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας έχουν ως αποτέλεσμα να μπορεί να θεωρηθεί το λαμβανόμενο σήμα ως μια τυχαία μεταβλητή, με την ισχύ του να μεταβάλλεται τόσο έντονα που οι διαλείψεις μικρής κλίμακας να μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες για ζεύξεις σχετικά μικρής απόστασης. Επιπλέον, το κανάλι πολλαπλών διαδρομών με διαλείψεις μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα γραμμικό, χρονικά μεταβαλλόμενο κανάλι. Η χρονική μεταβλητότητα του καναλιού προκύπτει από το γεγονός ότι ακόμα και για ακίνητους πομποδέκτες το περιβάλλον είναι μη στατικό, με αποτέλεσμα να αλλάζουν οι πιθανές διαδρομές που ακολουθεί το σήμα με την πάροδο του χρόνου και άρα οι συνιστώσες του λαμβανόμενου σήματος είναι χρονικά μεταβαλλόμενες.

### **Αργές και γρήγορες διαλείψεις**

Οι όροι αργές και γρήγορες διαλείψεις αναφέρονται στο ρυθμό με τον οποίο αλλάζουν η φάση και το μέτρο της ισχύος του σήματος, λόγω της επίδρασης του καναλιού. Ο διαχωρισμός αυτός έχει να κάνει με τον χρόνο συμφωνίας του καναλιού (Coherence Time). Ο χρόνος συμφωνίας αποτελεί ένα μέτρο του ελάχιστου χρόνου που απαιτείται ώστε ένα κανάλι να θεωρείται ασυσχέτιστο από μια προηγούμενη τιμή του και σχετίζεται με τη διάχυση Doppler του καναλιού με τη σχέση  $T_C = 1/f_d$ , όπου  $f_d$  είναι η διάχυση Doppler.

Η διάχυση Doppler είναι ένα μέγεθος που συνδέεται με το φαινόμενο της μετατόπισης Doppler. Όταν ένας δέκτης (ή το περιβάλλον του) κινείται, το σήμα που λαμβάνει παρουσιάζει μια συχνοτική διασπορά, σε σχέση με το μεταδιδόμενο σήμα. Μέτρο της συχνοτικής αυτής διασποράς είναι η διάχυση Doppler.

Ο χρόνος συμφωνίας καναλιού είναι ένα στατιστικό μέγεθος του χρονικού διαστήματος κατά τη διάρκεια του οποίου η κρουστική απόκριση του καναλιού θεωρείται σταθερή. Με άλλα λόγια, δύο δείγματα του καναλιού που λαμβάνονται σε χρονικό διάστημα ίσο με το χρόνο συμφωνίας καναλιού θεωρούνται συσχετισμένα.

Όταν η χρονική διάρκεια ενός σήματος  $T_s$  είναι μικρότερη από το χρόνο συμφωνίας του καναλιού τότε οι διαλείψεις που προκύπτουν ονομάζονται αργές. Σε αντίθετη περίπτωση ονομάζονται γρήγορες. Στις αργές διαλείψεις ένα συγκεκριμένο επίπεδο διαλείψεων του καναλιού θα επηρεάσει εξίσου ένα πλήθος συμβόλων γεγονός που



οδηγεί σε σωρεία λαθών. Αντίθετα στις γρήγορες διαλείψεις οι επιδράσεις διαφέρουν από σύμβολο σε σύμβολο με αποτέλεσμα τα κανάλια να μεταβάλλεται αισθητά κατά τη διάρκεια ενός συμβόλου.

### **Επιλεκτικές και μη επιλεκτικές κατά συχνότητα διαλείψεις**

Η επιλεκτικότητα της συχνότητας είναι επίσης ένα σημαντικό χαρακτηριστικό σε κανάλια διαλείψεων. Αν όλα τα φασματικά χαρακτηριστικά του μεταδιδόμενου σήματος επηρεάζονται κατά παρόμοιο τρόπο, τότε οι διαλείψεις χαρακτηρίζονται ως μη επιλεκτικές. Αυτή είναι η περίπτωση των συστημάτων στενής ζώνης όπου το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης συμφωνίας του καναλιού, το οποίο είναι ένα μέτρο της συχνοτικής διαφοράς που πρέπει να έχουν δυο σήματα, ώστε να υποστούν ασυσχέτιστες διαλείψεις από το κανάλι. Το εύρος ζώνης συμφωνίας καναλιού δίνεται από τον τύπο  $f_c = 1/\tau_{\max}$ , όπου το  $\tau_{\max}$  εκφράζει τη μέγιστη διάχυση καθυστέρησης (delay spread) λόγω της ύπαρξης πολλαπλών διαδρομών (σε δευτερόλεπτα). Πρακτικά, διαφορετικές συχνοτικές συνιστώσες του σήματος, που βρίσκονται εντός του εύρους συμφωνίας καναλιού επηρεάζονται με τον ίδιο τρόπο από το κέρδος του καναλιού και τη μεταβολή φάσης. Έτσι, το εύρος ζώνης συμφωνίας είναι το εύρος συχνοτήτων για το οποίο δύο τυχαία δείγματα του καναλιού εντός του διαστήματος αυτού έχουν υψηλή συσχέτιση.

Αντίθετα, στην περίπτωση των επιλεκτικών κατά συχνότητα διαλείψεων το εύρος ζώνης συμφωνίας καναλιού είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης του σήματος και οι διάφορες συχνοτικές συνιστώσες του σήματος επηρεάζονται από ασυσχέτιστες διαλείψεις. Στο πεδίο του χρόνου, η διάρκεια της κρουστικής απόκρισης του καναλιού είναι μεγαλύτερη από τη διάρκεια ενός συμβόλου. Στα επιλεκτικά κατά συχνότητα κανάλια η ενέργεια κάθε συμβόλου διασπείρεται στο χρόνο. Έτσι, κατά τη συνεχή μετάδοση συμβόλων προκαλείται παρεμβολή μεταξύ γειτονικών συμβόλων, που είναι γνωστή ως ενδοσυμβολική παρεμβολή (Intersymbol Interference- ISI).

Από την άλλη μεριά, στα επιλεκτικά κατά συχνότητα κανάλια όπου διαφορετικές συχνοτικές συνιστώσες επηρεάζονται ανεξάρτητα από το κανάλι, η πιθανότητα βαθιάς διάλειψης (deep fading) είναι μικρότερη, καθώς είναι μάλλον απίθανο να βρεθούν σε αυτή την κατάσταση ταυτόχρονα όλες οι συχνοτικές συνιστώσες του σήματος.



### 3. Εμπορικά Συστήματα Καταγραφής Ποιότητας Δικτύων Κινητής Τηλεφωνίας

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται μερικά εμπορικά συστήματα παρακολούθησης και καταγραφής της ποιότητας των δικτύων κινητής τηλεφωνίας που χρησιμοποιούν μεγάλοι πάροχοι.

#### 3.1. Ascom Tems Portfolio

Το «TEMS Portfolio» προσφέρεται από την εταιρεία Ascom και αποτελεί ένα ολοκληρωμένο πακέτο για τον έλεγχο, την αποτύπωση και την ανάλυση της απόδοσης ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο το οποίο συνδράμει σε σημαντικό βαθμό στην ανάπτυξη, την βελτιστοποίηση και την συντήρηση των δικτύων. Το σύνολο των εργαλείων που περιλαμβάνει υποστηρίζουν κυρίως δίκτυα τεχνολογίας LTE παρόλα αυτά είναι συμβατά με τα περισσότερα σύγχρονα δίκτυα επικοινωνιών.

Το πακέτο περιλαμβάνει μεταξύ άλλων τα ακόλουθα εργαλεία:

- **TEMS Discovery:** Επιτρέπει την επεξεργασία των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί από την ραδιοεπαφή. Χρησιμοποιεί μέσω API είτε τους χάρτες της εταιρείας Google είτε τους χάρτες της Microsoft (Bing maps) για να απεικονίσει τα δεδομένα και ταυτόχρονα αποθηκεύει τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από την κυψέλη σε αρχείο μορφής xml ή csv. Υποστηρίζει δίκτυα με τεχνολογία cdma2000, 1xEV, GSM/GPRS/EDGE, WCDMA, HSDPA/HSUPA/HSPA+, TD-SCDMA, WiMAX, και LTE
- **TEMS Investigation:** Χρησιμοποιείται για συλλογή δεδομένων με χρήση οχήματος. Μεταξύ άλλων υποστηρίζει την συλλογή στοιχείων σχετικά με την άνω και κάτω ζεύξη των δικτύων σε διάφορες ζώνες συχνοτήτων καθώς και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την ποιότητα του δικτύου (ρυθμαπόδοση, χρόνοι καθυστέρησης κλπ.).
- **TEMS Symphony:** Αποτελεί εργαλείο που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των επιδόσεων του δικτύου καθώς και της τήρησης του QoS.
- **TEMS Pocket:** Φορητή συσκευή εντοπισμού σφαλμάτων σε ασύρματα δίκτυα με δυνατότητα χρησιμοποίησης ακόμα και σε εσωτερικούς χώρους.

Υποστηρίζει δίκτυα με τεχνολογία GSM/GPRS, EDGE, WCDMA, HSPA, CDMA και EV-DO.

- **TEMS Automatic:** Εργαλείο για τον έλεγχο της ποιότητας ενός δικτύου όπως την αντιλαμβάνεται ένας συνδρομητής σε πραγματικό χρόνο. Λειτουργεί αυτοματοποιημένα συλλέγοντας στοιχεία όπως ποιότητα φωνής, ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ενώ έχει την δυνατότητα εντοπισμού σφαλμάτων σε περιπτώσεις συμφόρησης του δικτύου. Επίσης δύναται να συλλέγει στοιχεία από γειτονικά ανταγωνιστικά δίκτυα εκτελώντας ποιοτικές συγκρίσεις.
- **TEMS Monitor Master:** Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των υπηρεσιών που χρησιμοποιούν οι συνδρομητές και την αποτύπωση της απόδοσης αυτών. Μεταξύ των εφαρμογών που ελέγχει και καταγράφει την ποιότητά τους είναι η αποστολή-λήψη sms, η περιήγηση στο διαδίκτυο μέσω του Wap, η αποστολή-λήψη αρχείων μέσω του δικτύου κλπ.



Εικόνα 27 Απεικόνιση παραδείγματος συλλογής δεδομένων με χρήση της σουίτας TEMS.

### 3.2. Nemo Network Testing Solutions

Αποτελεί ένα πακέτο προϊόντων της εταιρείας Anite που επιτρέπει την μέτρηση, τον έλεγχο, την βελτιστοποίηση και την ανάλυση της ποιότητας ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας.

Το πακέτο περιλαμβάνει τα ακόλουθα εργαλεία:

- **Nemo Outdoor:** Το εργαλείο αυτό προϋποθέτει σύνδεση με Laptop για να λειτουργήσει και υποστηρίζει την λήψη πολλαπλών μετρήσεων με υποστήριξη πλήθους τεχνολογιών δικτύων και πρωτοκόλλων. Οι ληφθέντες μετρήσεις αποθηκεύονται με μορφή ASCII Nemo για περαιτέρω επεξεργασία.
- **Nemo Handy:** Εργαλείο λήψης μετρήσεων για έλεγχο ποιότητας υπηρεσιών και εμπειρίας. Βασίζεται στη χρήση smartphone τεχνολογίας Windows Phone, Symbian ή Android.
- **Nemo InveX:** Χρησιμοποιείται για την λήψη μετρήσεων με τη χρήση οχήματος. Συλλέγει μετρήσεις σχετικά με την ποιότητα υπηρεσιών και εμπειρίας.
- **Nemo Autonomous:** Εργαλείο που εκτελεί αυτόματες μετρήσεις ραδιοεπαφής σε μεγάλη γεωγραφική κάλυψη επιτρέποντας τον έλεγχο πολλαπλών σταθερών ή κινητών σημείων με αποτέλεσμα την επιτάχυνση της διαδικασίας εντοπισμού και επίλυσης σφαλμάτων.
- **Nemo FSR1:** Ψηφιακός δέκτης σάρωσης για μετρήσεις σε δίκτυα κινητών επικοινωνιών κάθε τεχνολογίας (GSM, HSDPA κλπ.)
- **Nemo Analyze:** Χρησιμοποιείται για ανάλυση, συγκριτική αξιολόγηση, αυτόματη επίλυση σφαλμάτων και στατιστική επεξεργασία μετρήσεων που προέρχονται από τα προηγούμενα εργαλεία. Έχει δυνατότητα την σύγκριση των δεδομένων με δεδομένα που έχουν συλλεχθεί από ανταγωνιστικά γειτονικά δίκτυα.



Εικόνα 28 Οπτική απεικόνιση του συστήματος Nemo Outdoor.

### 3.3. SwissQual Network Benchmarking, Optimization and Service Monitoring

Η εταιρεία SwissQual έχει διαθέσιμα τρία συστήματα για την αξιολόγηση, βελτιστοποίηση και απεικόνιση της ποιότητας σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.

Τα τρία συστήματα με τα εργαλεία τους είναι τα ακόλουθα:

#### 1. Diversity

- a. **Diversity Benchmarker:** Χρησιμοποιείται για μετρήσεις ποιότητας δικτύου με χρήση οχημάτων σε διάφορα περιβάλλοντα και θερμοκρασίες.
- b. **Diversity Explorer:** Επιτρέπει την αυτόματη, αυτόνομη και απομακρυσμένη συλλογή θέσεων και δεδομένων που αφορούν την ποιότητα υπηρεσιών του δικτύου με δυνατότητα απεικονίσεων σε πραγματικό χρόνο.
- c. **Diversity Ranger:** Αποτελεί φορητή συσκευή με δυνατότητα συγκριτικής ανάλυσης δεδομένων.
- d. **Diversity Optimizer Pro:** Εργαλείο που χρησιμοποιείται για την βελτιστοποίηση των υπηρεσιών και την επίλυση σφαλμάτων.

#### 2. QualiPoc

- a. **QualiPoc Handheld:** Φορητό εργαλείο απεικόνισης επίδοσης υπηρεσιών φωνής και δεδομένων.
- b. **QualiPoc Freerider:** Εργαλείο για την εκτέλεση σύγκρισης και αξιολόγησης επιδόσεων σε μικρές γεωγραφικές περιοχές υποστηρίζοντας σύγκριση και με δεδομένα ανταγωνιστικών παρόχων.
- c. **QualiPoc Static:** Χρησιμοποιείται για την λήψη των επιδόσεων του δικτύου σε συγκεκριμένη περιοχή και σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή.
- d. **QualiPoc Mobile:** Σύστημα που εγκαθίσταται σε διάφορα οχήματα για συνεχή μέτρηση των επιδόσεων ενός δικτύου. Χρησιμοποιείται κυρίως εντός αστικών ιστών.

#### 3. NetQual

- a. **NQDI:** Σύστημα που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των μετρήσεων που προήλθαν από τα προηγούμενα εργαλεία.
- b. **NQView:** Επιτρέπει την εμφάνιση των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο.
- c. **NQWeb:** Επιτρέπει την εμφάνιση των στοιχείων που έχουν συλλεχθεί και την δημιουργία αναφορών μέσω του διαδικτύου.

## 4. Εργαλεία Εξαγωγής Μοντέλου Ραδιοκάλυψης

### Android – Εφαρμογή “Network Cell Info Lite

#### Λειτουργικό Σύστημα Android

Το Android είναι ένα λειτουργικό σύστημα σχεδιασμένο για φορητές συσκευές και συσκευές κινητής τηλεφωνίας. Βασίζεται στο λειτουργικό σύστημα Linux και αποτελεί λογισμικό ανοιχτού κώδικα κάτι που το καθιστά πλήρως παραμετροποιήσιμο. Αναπτύσσεται εμπορικά από την Google και την Open Handset Alliance. Δίνει την δυνατότητα στους κατασκευαστές λογισμικού να δημιουργούν προγράμματα με την γλώσσα προγραμματισμού Java κάνοντας χρήση βιβλιοθηκών λογισμικού της Google. Η πρώτη έκδοσή του κυκλοφόρησε τον Σεπτέμβρη του 2008 και αυτή την στιγμή βρίσκεται στην έκδοση Android Marshmallow 6.0.

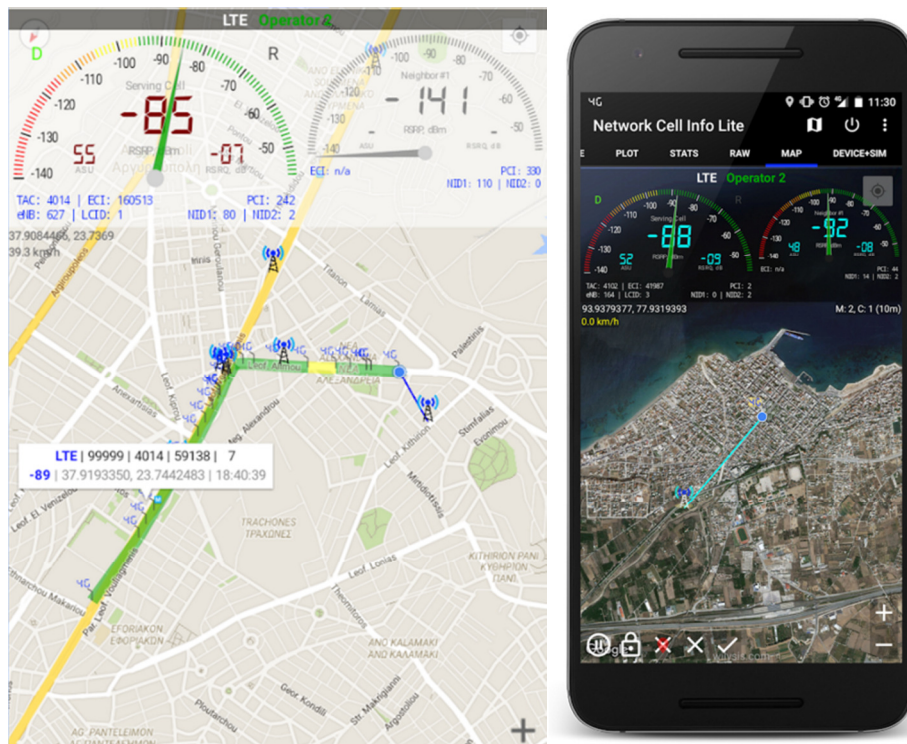
Το Android κρίνεται κατάλληλο για την συλλογή μετρήσεων διότι μεταξύ άλλων επιτρέπει:

- Την λήψη πληθώρας εφαρμογών για δοκιμαστικές μετρήσεις πριν την επιλογή της βέλτιστης εφαρμογής για την λήψη των τελικών μετρήσεων.
- Την χρήση λογισμικού προσομοίωσης μιας συσκευής android σε ένα PC.
- Την χρήση γραφικών που παρέχονται από βιβλιοθήκες της Google και στηρίζονται στην OpenGL ES 1.0.
- Την χρήση βάσης δεδομένων για την αποθήκευση των μετρήσεων και διαφόρων στοιχείων.
- Την υποστήριξη πολλαπλών μορφών πολυμέσων (βίντεο, εικόνες κλπ.)
- Την σύνδεση σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας
- Την υποστήριξη τεχνολογιών όπως Bluetooth, Wifi κλπ.
- Την υποστήριξη κάμερας, GPS, αισθητήρα επιτάχυνσης κλπ.
- Την ανάπτυξη ή παραμετροποίηση εφαρμογών με χρήση της Java σε περιβάλλον προσομοίωσης.

Το android περιλαμβάνει βιβλιοθήκες των γλωσσών προγραμματισμού C/C++ που χρησιμοποιούνται από διάφορες διεργασίες του συστήματος.

#### 4.1.2. Εφαρμογή Network Cell Info

Η εφαρμογή Network Cell Info κοστίζει 2€. Είναι διαθέσιμη μέσω του Google Play Store για άμεση εγκατάσταση σε συσκευές με λειτουργικό σύστημα Android. Η Εφαρμογή απεικονίζει με την χρήση των χαρτών της Google την θέση της φορητής συσκευής καθώς και την θέση των κυψελών ενός παρόχου δίνοντας ταυτόχρονα πληροφορίες σχετικά με την ισχύ του σήματος, την ποιότητα του τον ρυθμό ανταλλαγής δεδομένων και σε ποια κυψέλη είναι συνδεδεμένη η συσκευή. Επίσης έχει την δυνατότητα καταγραφής των στοιχείων μέχρι και 6 γειτονικών κυψελών.



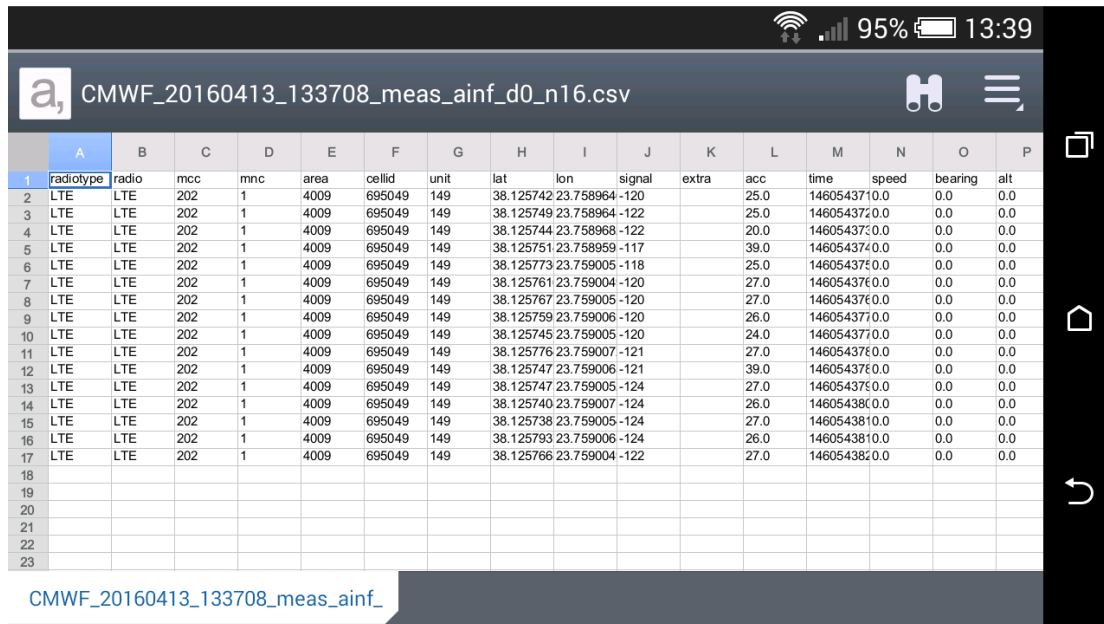
Εικόνα 29 Εφαρμογή Network Cell Info

Στα παραπάνω στιγμιότυπα από την χρήση της συσκευής απεικονίζεται η κινητή συσκευή με μπλε κύκλο πάνω στο χάρτη και οι κυψέλες με εικονίδια κεραιών. Ο μπλε κύκλος που απεικονίζει την θέση της συσκευής συνδέεται με μία μπλε γραμμή με την κυψέλη που εξυπηρετεί την συσκευή εκείνη την στιγμή. Επίσης διακρίνεται και το είδος του δικτύου (GSM, CDMA, LTE κλπ) καθώς και οι μετρήσεις ισχύος και ποιότητας αυτού. Η θέση της συσκευής εντοπίζεται με την χρήση δορυφόρων GPS και την υπηρεσία εντοπισμού θέσης μέσω των κεραιών κινητής τηλεφωνίας.

Η ισχύς του σήματος λήψης μετριέται σε dBm .



Η εφαρμογή δίνει την δυνατότητα εξαγωγής των δεδομένων που καταγράφηκαν σε ένα αρχείο που περιλαμβάνει την θέση και την ώρα καταγραφής, την ισχύ του σήματος, το είδος του δικτύου και άλλες πληροφορίες κάτι που καθιστά την περεταίρω επεξεργασία των στοιχείων άμεσα εφικτή. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο του αρχείου καταγραφής.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	radiotype	radio	mccc	mncc	area	cellid	unit	lat	lon	signal	extra	acc	time	speed	bearing	alt
2	LTE	LTE	202	1	4009	695049	149	38.125742	23.758964	-120		25.0	1460543710.0	0.0	0.0	0.0
3	LTE	LTE	202	1	4009	695049	149	38.125749	23.758964	-122		25.0	1460543720.0	0.0	0.0	0.0
4	LTE	LTE	202	1	4009	695049	149	38.125744	23.758968	-122		20.0	1460543730.0	0.0	0.0	0.0
5	LTE	LTE	202	1	4009	695049	149	38.125751	23.758959	-117		39.0	1460543740.0	0.0	0.0	0.0
6	LTE	LTE	202	1	4009	695049	149	38.125773	23.759005	-118		25.0	1460543750.0	0.0	0.0	0.0
7	LTE	LTE	202	1	4009	695049	149	38.125761	23.759004	-120		27.0	1460543760.0	0.0	0.0	0.0
8	LTE	LTE	202	1	4009	695049	149	38.125767	23.759005	-120		27.0	1460543760.0	0.0	0.0	0.0
9	LTE	LTE	202	1	4009	695049	149	38.125759	23.759006	-120		26.0	1460543770.0	0.0	0.0	0.0
10	LTE	LTE	202	1	4009	695049	149	38.125745	23.759005	-120		24.0	1460543770.0	0.0	0.0	0.0
11	LTE	LTE	202	1	4009	695049	149	38.125776	23.759007	-121		27.0	1460543780.0	0.0	0.0	0.0
12	LTE	LTE	202	1	4009	695049	149	38.125747	23.759006	-121		39.0	1460543780.0	0.0	0.0	0.0
13	LTE	LTE	202	1	4009	695049	149	38.125747	23.759005	-124		27.0	1460543780.0	0.0	0.0	0.0
14	LTE	LTE	202	1	4009	695049	149	38.125740	23.759007	-124		26.0	146054380.0	0.0	0.0	0.0
15	LTE	LTE	202	1	4009	695049	149	38.125738	23.759005	-124		27.0	1460543810.0	0.0	0.0	0.0
16	LTE	LTE	202	1	4009	695049	149	38.125793	23.759006	-124		26.0	1460543810.0	0.0	0.0	0.0
17	LTE	LTE	202	1	4009	695049	149	38.125766	23.759004	-122		27.0	1460543820.0	0.0	0.0	0.0
18																
19																
20																
21																
22																
23																

Εικόνα 30 Εξαγωγή δεδομένων

## 4.2. Matlab

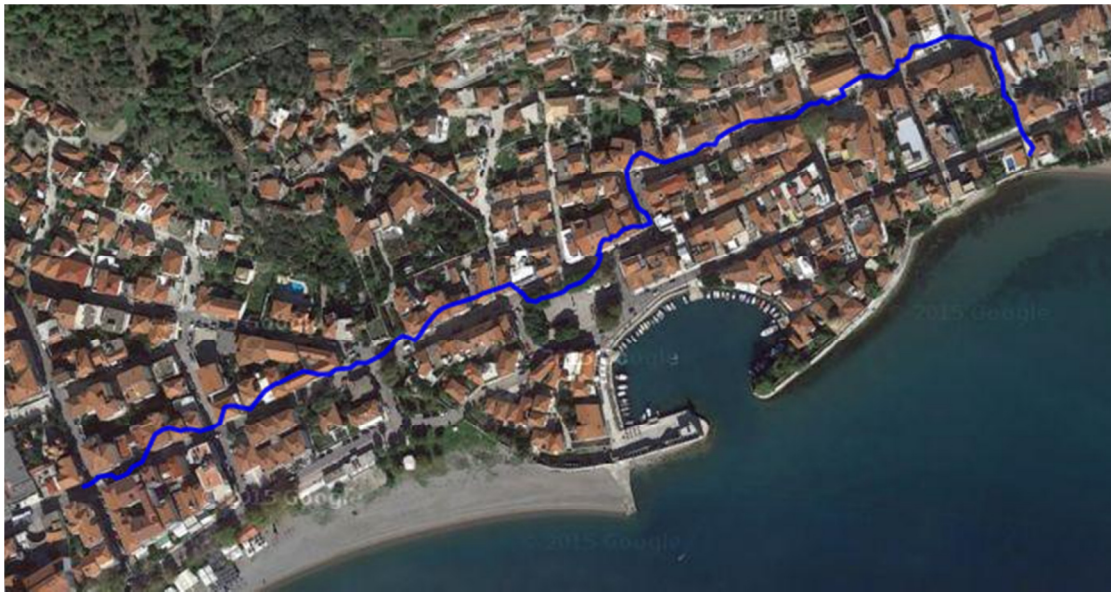
Για την ανάλυση των στοιχείων που συλλέχθηκαν από την παραπάνω εφαρμογή και την εξαγωγή στατιστικών και συμπερασμάτων ήταν απαραίτητη η χρήση του Matlab.

Το Matlab (matrix laboratory) κυκλοφόρησε το 1984 από την εταιρεία MathWorks. Είναι ένα περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής και αποτελεί προγραμματιστική γλώσσα τέταρτης γενιάς. Χρησιμοποιεί την άλγεβρα μητρών για την εκτέλεση πράξεων και αποθήκευσης και η τρέχουσα έκδοση του είναι η R2016a (Μάρτιος 2016). Χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για επίλυση μαθηματικών προβλημάτων ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για προγραμματισμό καθώς περιλαμβάνει εντολές της C++. Μπορεί μεταξύ άλλων να υλοποιήσει συναρτήσεις πραγματικές, μιγαδικές, πεπλεγμένες καθώς και συναρτήσεις δύο μεταβλητών. Τέλος μπορεί να υλοποιήσει ιστογράμματα, τομεογράμματα, ραβδοδιαγράμματα και άλλα για στατιστικούς λόγους.

## 5. Ημι-εμπειρικό μοντέλο ραδιοκάλυψης

### 5.1. Παρουσίαση μετρήσεων

Οι μετρήσεις ισχύος λήψης σήματος πάρθηκαν στην πόλη της Ναυπάκτου και συγκεκριμένα στο λιμάνι. Στον παρακάτω χάρτη απεικονίζεται η διαδρομή που ακολουθήθηκε.



Εικόνα 31 Διαδρομή μετρήσεων

Η διαδρομή εκτελέστηκε δύο φορές, για την αποφυγή φαινομένων παροδικής σκίασης, ανακλάσεων κλπ. κατά την λήψη των μετρήσεων, με κάρτα SIM μεγάλου Ελληνικού παρόχου κινητής τηλεφωνίας. Μετά το πέρας της διαδρομής η εφαρμογή Network Cell Info που χρησιμοποιήθηκε είχε δημιουργήσει αρχεία καταγραφής τα οποία εισαγάγαμε σε φύλλο εργασίας του Microsoft Office Excel για ευκολότερη επεξεργασία. Βάση του αρχείου excel δημιουργήσαμε και τους παρακάτω πίνακες.

Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας – Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής Τ.Ε.  
 «Εξαγωγή μοντέλου ραδιοκάλυψης της περιοχής της Ναυπάκτου βάσει πεδιομετρήσεων στάθμης ισχύος λήψης φορητής συσκευής».

ID	GPS Coordinates		Cells ID											
			23109		20472		20479		20478		22109		50215	
			1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	38.392666	21.827777	-77	-81			-79	-79	-87	-87	-81	-81		
2	38.392666	21.827777	-79	-81			-79	-79	-87	-87	-81	-81		
3	38.392666	21.827777					-79	-79	-81	-81	-87	-87	-81	-81
4	38.392666	21.827777	-85	-85	-89	-89	-81	-81			-87	-87		
5	38.392666	21.827777	-81	-81	-71	-71	-73	-73			-85	-85	-87	-87
6	38.392666	21.827777	-87	-85	-83	-83	-83	-83					-89	-89
7	38.392666	21.827777	-81	-81	-89	-89	-85	-85			-89	-89	-83	-83
8	38.392666	21.827777	-79	-79	-71	-71	-79	-79			-89	-89	-87	-87
9	38.392666	21.827777	-89	-89	-83	-83	-83	-83			-87	-87	-85	-85
10	38.392666	21.827777	-79	-81	-77	-77	-73	-73			-79	-79		
11	38.392666	21.827777	-89	-89	-81	-81					-81	-81	-83	-83
12	38.392666	21.827777	-81				-81							
13	38.392666	21.827777	-73	-73										
14	38.392666	21.827777	-85	-89			-83	-83			-85	-85		
15	38.392666	21.827777	-83	-83	-85		-81	-81			-87	-87		
16	38.392666	21.827777	-89	-89	-85	-85	-81	-81			-85	-85		
17	38.392666	21.827777	-81	-81	-87	-87	-81	-81			-89	-89		-89
18	38.392666	21.827777	-85	-85	-83	-83	-83	-83			-87	-87		
19	38.392666	21.827777	-81	-81	-83	-83	-83	-83			-87	-87		
20	38.392666	21.827777	-77	-71	-73	-71	-75	-75			-83	-83	-87	-87
21	38.392666	21.827777	-77		-73	-73	-75				-83	-81	-89	-89
22	38.392666	21.827777			-77	-77	-77				-81	-81		
23	38.392666	21.827777	-75		-79	-81	-77				-85	-81		-81
24	38.392666	21.827777	-81	-81	-81	-81	-81	-81			-81	-81		
25	38.392666	21.827777	-83	-83	-87	-87	-83	-83			-87	-87	-89	-89
26	38.392666	21.827777	-81	-81	-83	-83	-83	-83			-87	-87	-89	-89
27	38.392666	21.827777	-81	-81	-87	-87	-83	-83			-89	-89		
28	38.392666	21.827777	-87	-87	-87	-87	-83	-83			-89			-89
29	38.392666	21.827777	-83	-81	-77	-77	-75	-75			-83	-83		-73
30	38.392666	21.827777	-79	-79	-77	-75	-79	-79			-81	-81		-81
31	38.392666	21.827777									-81	-81	-81	-81
32	38.392666	21.827777					-87	-87	-75	-71	-85	-85	-81	-81
33	38.392666	21.827777	-89		-83	-87	-87	-85	-85	-89	-81	-81		-89
34	38.392666	21.827777	-75	-75			-83	-81			-85	-85	-89	-89
35	38.392666	21.827777	-75	-71	-81		-87	-81			-81	-81		
36	38.392666	21.827777	-87	-87	-83		-83	-83			-83	-83	-89	-89
37	38.392666	21.827777	-75	-71	-81	-81	-87	-87			-81	-81	-89	-89
38	38.392666	21.827777	-81	-81	-81	-81	-83	-83			-81	-89	-89	-89
39	38.392666	21.827777	-81	-87	-89	-89	-81	-81			-83	-83	-89	-89
40	38.392666	21.827777			-81	-83	-85	-85	-79	-79				
41	38.392666	21.827777			-81	-83	-83	-83	-83	-83	-83	-83		
42	38.392666	21.827777		-73	-81	-85	-81		-81	-81	-81	-81	-85	-85
43	38.392666	21.827777			-79	-81	-77				-79	-75	-71	-73
44	38.392666	21.827777	-69		-71	-75	-81	-79			-87	-85	-85	-85
45	38.392666	21.827777	-69	-71	-71	-71	-81	-81			-87	-87	-85	-85
46	38.392666	21.827777	-81	-85			-71	-85	-75					
47	38.392666	21.827777	-81	-81	-83	-83	-83	-83			-81	-81	-81	-81
48	38.392666	21.827777	-81	-81	-83	-83	-83	-83			-81	-81	-81	-81
49	38.392666	21.827777	-87	-87			-83	-83			-81	-81	-81	-81
50	38.392666	21.827777	-71	-73			-87	-87	-85	-89	-87	-87	-87	-85
51	38.392666	21.827777	-71	-71			-87	-87	-71	-71	-85	-85		
52	38.392666	21.827777	-81	-81	-81	-81	-81	-81					-79	-71
53	38.392666	21.827777	-75	-75	-75	-75	-85	-81			-87		-81	-81
54	38.392666	21.827777	-85	-89	-89	-89	-89	-89			-89		-81	-81
55	38.392666	21.827777	-81	-81	-81	-81	-81	-81			-81	-81		
56	38.392666	21.827777	-89	-85	-89	-89	-89	-89			-87	-87	-85	-85

ID	GPS Coordinates		RSSI											
	Lat	Lon	2109		2142		2179		2178		2189		2215	
			1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
27	28.20200	21.20200	-75	-75										
28	21.20200	21.20200	-77	-77			-85	-85	-85	-85	-85	-85		
29	21.21212	21.21212	-75	-75	-81	-81	-87	-87			-89	-89		-89
30	21.20200	21.20200	-78	-78	-82	-82	-87	-87			-88	-88		-88
31	21.20200	21.20200	-77	-77					-79	-79	-81	-81	-81	-81
32	21.20200	21.20200	-77	-77					-81	-81	-83	-83	-83	-83
33	21.20200	21.20200	-78	-78			-83	-83	-83	-83	-83	-83	-83	-83
34	21.20200	21.20200	-78	-78			-81	-81	-81	-81	-83	-83	-83	-83
35	21.20200	21.20200	-71	-71			-81	-81	-81	-81	-83	-83	-83	-83
36	21.20200	21.20200	-80	-80			-81	-81	-77	-77	-87	-87	-87	-87
37	21.20200	21.20200	-80	-80			-82	-82	-82	-82	-82	-82	-82	-82
38	21.20200	21.20200	-81	-81			-81	-81	-81	-81	-83	-83	-83	-83
39	21.20200	21.20200	-82	-82		-82	-82	-82	-82	-82	-82	-82	-82	-82
40	21.20200	21.20200	-81	-81			-81	-81	-81	-81	-83	-83	-83	-83
41	21.20200	21.20200	-82	-82			-81	-81	-81	-81	-83	-83	-83	-83
42	21.20200	21.20200	-80	-80	-83				-81	-81	-81	-81	-81	-81
43	21.20200	21.20200	-80	-80	-83				-81	-81	-81	-81	-81	-81

Εικόνα 32 Αναλυτικός πίνακας των μετρήσεων

Στον κατακόρυφο άξονα περιλαμβάνονται οι γεωγραφικές συντεταγμένες των 72 σημείων στα οποία διαιρέσαμε την διαδρομή. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται τα ID των κυψελών που κατέγραψε η συσκευή. Εσωτερικά του πίνακα εμφανίζεται η ισχύς λήψης που κατέγραψε η κινητή συσκευή από κάθε κυψέλη κατά την πρώτη και δεύτερη μέτρηση. Στα σημεία που δεν απεικονίζονται δεδομένα η αντίστοιχη κυψέλη ήταν εκτός εμβέλειας της κινητής μας συσκευής. Αξίζει σε αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι οι τέσσερις πρώτοι αριθμοί του id αναφέρονται στην κεραία εκπομπής ενώ ο πέμπτος στον αριθμό της συγκεκριμένης κυψέλης.

Στη συνέχεια υπολογίσαμε τον μέσο όρο της ισχύς λήψης για κάθε κυψέλη έτσι ώστε να μετριάσουμε φαινόμενα ανακλάσεων, περιθλάσεων κλπ. κατά την λήψη των μετρήσεων που τυχόν επηρέασαν το σήμα. Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζεται ο Μέσος Όρος ισχύς λήψης για κάθε κυψέλη.

Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας – Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής Τ.Ε.  
 «Εξαγωγή μοντέλου ραδιοκάλυψης της περιοχής της Ναυπάκτου βάσει πεδιομετρήσεων στάθμης ισχύος λήψης φορητής συσκευής».

Loc.	GPS Coordinates		Cells IDs					
	Lat	Lon	23100	20472	20479	20478	23109	50215
1	38.393328	21.83132	-80	0	-80	-80	-81	0
2	38.393008	21.831295	-80	-89	-75	-87	-81	0
3	38.393491	21.83116	0	0	-75	-81	-84	-88
4	38.393526	21.831106	-85	-89	-72	0	-81	0
5	38.393099	21.831046	-85	-74	-82	0	-89	-88
6	38.393773	21.831018	-85	-87	-87	0	0	-88
7	38.393398	21.830998	-81	-89	-88	0	-89	-88
8	38.393875	21.830971	-79	-72	-74	-89	-88	-80
9	38.393992	21.830921	-81	-75	-74	0	-77	-89
10	38.393941	21.830726	-80	-77	-73	0	-79	0
11	38.393833	21.830451	-79	-81	0	0	-83	-83
12	38.39382	21.830366	-75	-77	-71	0	0	0
13	38.393815	21.830338	-75	0	0	0	0	0
14	38.393778	21.830338	-89	-75	-79	0	-89	0
15	38.393736	21.830268	-83	-75	-83	0	-87	0
16	38.393574	21.830159	-82	-75	-81	0	-85	0
17	38.393713	21.830045	-82	-77	-84	0	-86	-75
18	38.393668	21.829969	-79	-72	-79	0	-77	0
19	38.393628	21.829938	-82	-81	-79	0	-87	0
20	38.393593	21.829873	-74	-72	-75	0	-83	-89
21	38.393625	21.829839	-87	-86	-88	0	-82	-88
22	38.39359	21.829756	0	-77	-77	0	-90	0
23	38.393534	21.829681	-75	-80	-77	0	-84	-81
24	38.393473	21.82929	-75	-81	-82	0	-93	0
25	38.393413	21.829143	-74	-84	-83	0	-87	-86
26	38.393364	21.829128	-73	-84	-83	0	-87	-89
27	38.393373	21.829086	-81	-87	-88	0	-88	0
28	38.393286	21.828795	-77	-77	-79	0	-89	-75
29	38.393228	21.828656	-73	-77	-79	-83	-89	-88
30	38.39331	21.82858	-77	-76	-79	0	-89	0
31	38.393293	21.828536	0	0	0	0	-82	-72,78
32	38.393148	21.828559	0	0	-87	-72	-98	-91,81,92
33	38.393093	21.828593	-73	-75	-87	-84	-89	-88,90,91
34	38.393072	21.828568	-75	0	-90	0	-95	-89
35	38.393099	21.828579	-79	-89	-89	0	-84	-87
36	38.392998	21.828518	-77	-79	-89	0	-93	-89
37	38.39293	21.828471	-85	-82	-87	0	-88	-88
38	38.392883	21.82839	-71	-81	-82	0	-90	-83
39	38.392858	21.828343	-83	-82	-83	0	-90	-88
40	38.392798	21.828348	0	-82	-95	-79	0	0
41	38.392793	21.828333	0	-86	-88	-88	-88	0
42	38.392738	21.828341	-72	-85	-91	-81	-91	-85
43	38.392691	21.828305	0	-89	-87	0	-87	-88
44	38.392556	21.827968	-69	-73	-80	0	-86	-85
45	38.392535	21.827933	-86	-81	-81	0	-87	-86
46	38.392546	21.827761	-75	-71	-75	0	-89	0
47	38.392533	21.827623	-80	-88	-88	0	-84	-88
48	38.392498	21.82727	-81	-73	-83	-81	-91	-83
49	38.392392	21.827333	-87	0	-89	-91	-84	-88

Loc.	GPS Coordinates		Cells IDs					
	Lat	Lon	23109	20472	20479	20478	23103	50215
50	38.392381	21.827041	-73	0	-87	-69	-87	-86
51	38.39237	21.826998	-71	0	-89	-71	-83	0
52	38.392298	21.826748	-71	-82	-83	0	0	-72
53	38.39221	21.826698	-75	-78	-84	0	-85	-81
54	38.3922	21.826608	-75	-79	-84	0	-85	-81
55	38.392172	21.826558	-76	-81	-87	0	-81	0
56	38.392193	21.826391	-72	-79	-85	0	-87	-85
57	38.392098	21.826251	-76	0	0	0	-71	-89
58	38.392001	21.826041	-77	0	-85	-69	-83	0
59	38.391918	21.825998	-79	-74	-87	0	-90	-79
60	38.39193	21.825928	-79	-74	-86	0	-90	-79
61	38.391872	21.825821	-77	-74	-87	0	-89	0
62	38.39188	21.825599	-77	0	0	-79	-81	-93
63	38.391891	21.825491	-77	0	-82	-79	-81	-93
64	38.391881	21.82557	-79	0	-89	-82	-84	-93
65	38.391898	21.825498	-71	0	-81	-81	-83	-81
66	38.391865	21.825406	-69	0	-92	-77	-87	-92
67	38.391791	21.825321	-89	0	-81	-79	-83	-100
68	38.391663	21.825221	-79	0	-91	-81	-83	-100
69	38.391691	21.825246	-72	-89	-81	-81	-81	-84
70	38.391656	21.825114	-72	0	-93	-81	-81	-94
71	38.391646	21.825026	-72	0	-93	-80	-80	-93
72	38.391596	21.82493	-69	-83	0	-80	-80	-87

Εικόνα 33 Μέσος Όρος ισχύς λήψης για κάθε κυψέλη

Στη συνέχεια απεικονίζεται ο Μέσος Όρος της ισχύς λήψης του σήματος κάθε κυψέλης σε γραφήματα για κάθε κυψέλη (κατακόρυφος άξονας) συναρτήσει του σημείου καταγραφής (οριζόντιος άξονας) .

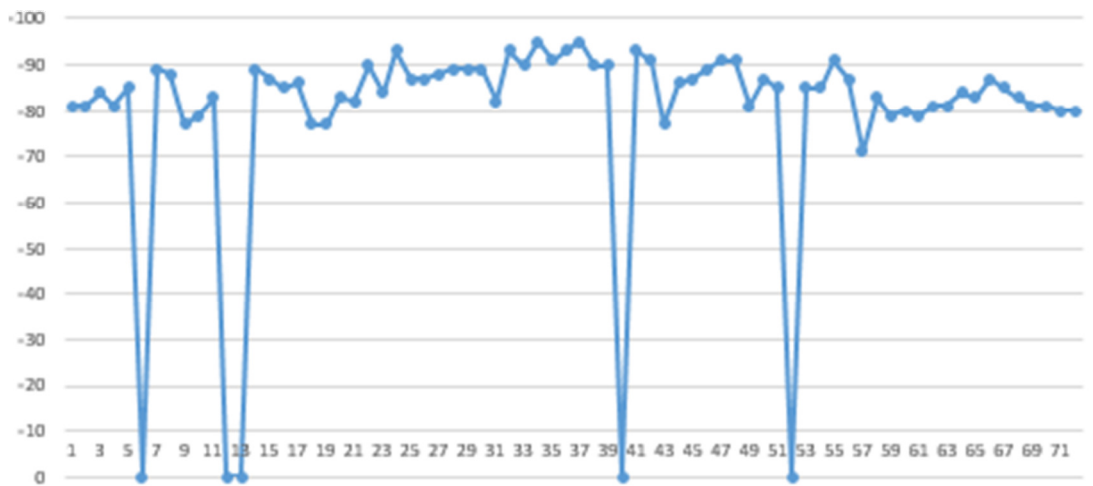




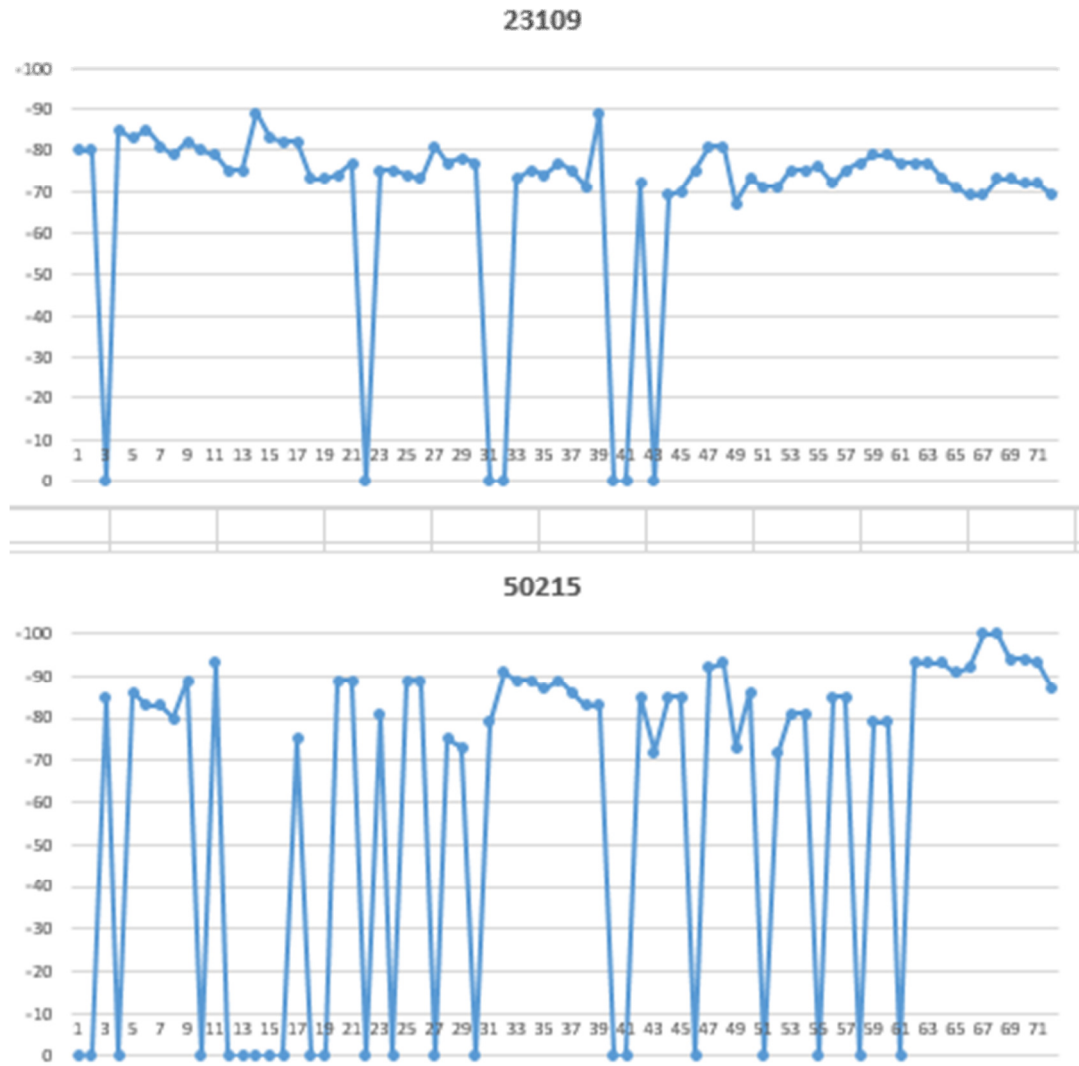
**20479**



**23103**







Εικόνα 34 Γραφήματα

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι για την κυψέλη με ID :23103 μόνο για πέντε σημεία δεν υπάρχουν δεδομένα από τη συσκευή μας ενώ για τις άλλες κυψέλες παρουσιάζεται μεγαλύτερη έλλειψη. Για το λόγο στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί αυτή.

## 5.2. Διαδικασία εξαγωγής μοντέλου

Θα χρησιμοποιήσουμε τον γενικό τύπο του Friis όπου η δύναμη (εκθέτης) της απόστασης δίδεται από την σταθερά  $k$ , επομένως :

$$L_{FS} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \quad \text{απλός τύπος}$$

$$L_{FS} = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 d^k \quad \text{γενικευμένος τύπος}$$

Σε λογαριθμική κλίμακα ισχύει :

$$10\log_{10}L_{FS} = 10\log_{10} \left[ \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 d^k \right] = 10\log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 + 10\log_{10} d^k \Rightarrow$$

$$L_{FS}[dB] = 20\log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) + 10k \log_{10} d \Rightarrow$$

$$L_{FS}[dB] = 20\log_{10} \left(\frac{4\pi f}{c}\right) + 10k \log_{10} d$$

Ο γενικευμένος τύπος έχει και μία ποσότητα  $L_0$  η οποία δίδει τον πλέον γενικευμένο τύπο ως ακολούθως :

$$L_{FS} = L_0 \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 d^k \quad \text{πλέον γενικευμένος τύπος}$$

Και σε dB ισχύει :

$$10\log_{10}L_{FS} = 10\log_{10} \left[ L_0 \left(\frac{4\pi f}{c}\right)^2 d^k \right] \Rightarrow$$

$$L_{FS}[dB] = 10\log_{10} L_0 + 20\log_{10} \left(\frac{4\pi f}{c}\right) + 10k \log_{10} d \Rightarrow$$

$$L_{FS}[dB] = L_0[dB] + 10k\log_{10}d + 20\log_{10} \left(\frac{4\pi f}{c}\right)$$

Αν χρησιμοποιήσουμε έννοιες στατιστικής ανάλυσης προκύπτει ότι :

$$L_{FS}[dB] = L_0[dB] + 10k \log_{10} d + 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi f}{c} \right)$$

Όπου :

$$L_{FS}[dB] = y$$

$$L_0[dB] = a$$

$$10k = b$$

$$\log_{10} d = x$$

$20 \log_{10} \left( \frac{4\pi f}{c} \right) = c$  όπου είναι η σταθερά που αλλάζει βάσει συχνότητας (δηλ. GSM 900, GSM 1800, WCDMA )

Μένει να βρούμε πως υπολογίζουμε αυτές τις ποσότητες.

Κατ' αρχάς πρέπει να υπολογίσουμε τον τύπο του Friis για το ολικό Link Budget

$$P_R = \frac{P_T P_T G_R}{L_{FS}} \quad [Watt] \text{ σε dBm έχουμε :}$$

$$10 \log_{10} P_R = 10 \log_{10} \left[ \frac{P_T P_T G_R}{L_{FS}} \right] \Rightarrow$$

$$P_R [dBm] = 10 \log_{10} P_T + 10 \log_{10} G_T - 10 \log_{10} L_{FS} \Rightarrow$$

$$P_R [dBm] = P_T [dBm] + G_T [dB] + G_R [dB] - P_R [dBm] \Rightarrow$$

$$L_{FS}[dB] = P_T[dBm] + G_T[dB] + G_R[dB] - P_R[dBm]$$

Επομένως με το φορητό τηλέφωνο εκτελέσαμε μετρήσεις ισχύος λήψης (δηλαδή την ποσότητα  $P_R[dBm]$ )

Από τον πάροχο εξασφαλίσαμε τις παρακάτω παραμέτρους που αφορούν τον σταθμό βάσης με Cell ID : 23103 και άρα έχουμε:

$$P_T[dBm] = 40 dBm$$

$$G_T[dB] = 10 dBi$$

$$G_R[dB] = 0 dBi$$

Επομένως

$$L_{FS}[dB] = 40 dBm + 10 dBi + 0 dBi - P_R[dBm] =>$$

$$L_{FS}[dB] = 50 dBm - P_R[dBm]$$

Στη συνέχεια στο excel μετατρέπουμε τις μετρήσεις ισχύος λήψης σε  $P_R[dBm]$  σε αντίστοιχα  $L_{FS}[dB]$  .

Χρησιμοποιούμε το εργαλείο ‘χάρακας’ της υπηρεσίας Google Maps για να μετρήσουμε για κάθε σημείο καταγραφής την απόσταση (d) σε μέτρα από το Σταθμό βάσης. Η τοποθεσία του σταθμού βάσης βρέθηκε μέσα από την ιστοσελίδα <http://keraies.eett.gr/> όπου περιλαμβάνονται όλες οι νόμιμες κεραιές κινητής τηλεφωνίας των Ελληνικών παρόχων. Τέλος επειδή στον παραπάνω τύπο το (d) είναι εκφρασμένο σε λογαριθμική κλίμακα αντιπαραβάλλουμε σε νέα στήλη την αντίστοιχη ποσότητα  $\log_{10} d$ .

Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Loc.	GPS Coordinates		Measurements			
ID	Lat	Lon	M.O.	LFS	Distance (meters)	Distance (dB)
1	38.393368	21.831235	-81	131	656,74	2,81739
2	38.393368	21.831235	-81	131	656,74	2,81739
3	38.393451	21.83116	-84	134	655,16	2,81635
4	38.393585	21.831106	-81	131	657,78	2,81808
5	38.393675	21.830971	-88	138	655,30	2,81644
6	38.393773	21.831018	0			
7	38.393778	21.830338	-89	139	661,73	2,82058
8	38.393778	21.830338	-89	139	661,73	2,82058
9	38.393736	21.830268	-87	137	661,85	2,82076
10	38.39374	21.830153	-85	135	661,90	2,82079
11	38.393713	21.830045	-86	136	667,72	2,82459
12	38.393668	21.829968	-77	127	667,89	2,82470
13	38.393653	21.829965	-77	127	667,89	2,82470
14	38.393593	21.829673	-83	133	700,83	2,84561
15	38.393505	21.829505	-82	132	701,11	2,84594
16	38.39359	21.829756	-90	140	721,32	2,85813
17	38.393513	21.829921	-88	138	732,99	2,86994
18	38.393473	21.82929	-93	143	744,41	2,87181
19	38.393413	21.829143	-87	137	755,71	2,87836
20	38.393384	21.829128	-87	137	765,05	2,88369
21	38.393373	21.829096	-88	138	773,38	2,88968
22	38.393286	21.828795	-89	139	785,95	2,89539
23	38.393293	21.828824	-89	139	786,23	2,89575
24	38.39331	21.82858	-89	139	807,44	2,90711
25	38.393293	21.828523	-82	132	813,73	2,91314
26	38.393148	21.828553	-93	143	829,04	2,91858
27	38.393059	21.828359	-88	138	855,38	2,93402
28	38.39302	21.828668	-95	145	850,73	2,92979
29	38.392993	21.828791	-81	131	853,57	2,93473
30	38.392938	21.828518	-93	143	871,24	2,94014
31	38.3929	21.828471	-95	145	881,06	2,94501
32	38.392883	21.82839	-90	140	892,87	2,95079
33	38.392893	21.828393	-90	140	893,37	2,95113
34	38.392793	21.828348	0			
35	38.392793	21.828348	0			
36	38.392793	21.828348	0			
37	38.392793	21.828348	0			
38	38.392793	21.828348	0			
39	38.392793	21.828348	0			
40	38.392793	21.828348	0			
41	38.392793	21.828348	0			
42	38.392738	21.828341	-91	141	935,34	2,97087
43	38.392691	21.828233	-77	127	945,16	2,97531

Loc.	GPS Coordinates		Measurements			
ID	Lat	Lon	M.O.	LFS	Distance (meters)	Distance (dB)
44	38.392556	21.827938	-86	136	955,80	2,98037
45	38.392556	21.827938	-87	137	955,80	2,98037
46	38.392646	21.827761	-89	139	975,54	2,98925
47	38.392523	21.827316	-91	141	985,20	2,99352
48	38.392498	21.82727	-91	141	995,09	2,99786
49	38.392556	21.827123	-91	141	1000,73	3,00162
50	38.392381	21.827041	-87	137	1013,10	3,00565
51	38.39227	21.826898	-85	135	1022,90	3,00983
52	38.392238	21.826748	0			
53	38.39221	21.826698	-85	135	1042,23	3,01796
54	38.3922	21.826608	-85	135	1051,71	3,02190
55	38.392175	21.82656	-91	141	1061,64	3,02598
56	38.392193	21.826391	-87	137	1071,89	3,03015
57	38.392093	21.826121	-71	121	1081,02	3,03432
58	38.392001	21.826041	-83	133	1091,50	3,03802
59	38.392013	21.825968	-79	129	1101,51	3,04199
60	38.39193	21.825828	-80	130	1111,00	3,04571
61	38.3919	21.825781	-79	129	1120,48	3,04940
62	38.39188	21.825699	-81	131	1129,66	3,05295
63	38.391891	21.825651	-81	131	1139,74	3,05681
64	38.391881	21.82557	-84	134	1149,36	3,06046
65	38.391895	21.825458	-83	133	1159,41	3,06434
66	38.391865	21.825406	-87	137	1169,08	3,06784
67	38.391731	21.825321	-85	135	1178,84	3,07137
68	38.391663	21.825221	-83	133	1188,86	3,07513
69	38.391541	21.825145	-81	131	1199,17	3,07892
70	38.391656	21.825114	-81	131	1209,35	3,08255
71	38.391693	21.825033	-82	132	1219,77	3,08632
72	38.391596	21.82493	-80	130	1227,58	3,08905

Εικόνα 35 Μετατροπή σε  $P_R[dBm]$  σε αντίστοιχα  $L_{FS}[dB]$

### 5.3. Υπολογισμός του εκθέτη απωλειών

Στην παρούσα εργασία για την εξαγωγή του εκθέτη απωλειών χρησιμοποιήσαμε μια γραμμική εμπειρική σχέση χωρίς σταθερούς όρους η οποία ουσιαστικά προσεγγίζει μία ευθεία γραμμής της μορφής :

$$y = a + bxi + ei , \quad i = 1,2,\dots,n$$

Η διαδικασία υπολογίζει τον εμπειρικό συντελεστή  $b$  και την εμπειρική σταθερά  $a$  ,καθώς και πλήθος άλλων στατιστικών παραμέτρων ελαχιστοποιώντας τον όρο

$$\sum_{i=1}^n e_i^2$$

Τα δεδομένα από τις μετρήσεις λαμβάνονται υπό μορφή ζεύγους όπου  $x$  είναι μία ανεξάρτητη μεταβλητή και  $y$  μία εξαρτημένη. Επομένως για την εφαρμογή στον υπολογισμό του εκθέτη απωλειών , η μεταβλητή  $x$  αντιστοιχεί στην απόσταση διαχωρισμού του σταθμού βάσης με τον κινούμενο χρήστη και η μεταβλητή  $y$  για τις εμφανιζόμενες απώλειες μετάδοσης.

Οι στατιστικές ποσότητες που υπολογίζονται εκεί :

1. Συντελεστής συσχέτισης  $r$  του στιγμιαίου αποτελέσματος του Pearson από τη σχέση :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (xi - \bar{x}) (yi - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (yi - \bar{y})^2}}$$

2. Ο εμπειρικός συντελεστής  $b$  , και η εμπειρική σταθερά  $a$  οι οποίοι υπολογίζονται από τη σχέση :

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (xi - \bar{x}) (yi - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (yi - \bar{y})^2} \quad a = \bar{y} - b\bar{x}$$

3. Το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων SSD κατά την τεχνική προσέγγισης το οποίο υπολογίζεται σε σχέση :

$$SSD = \sum_{i=1}^n (y_i - a - b x_i)^2$$

4. Ο βαθμός ελευθερίας της απόκλισης DFD δηλαδή :

$$DFD = n - 2$$

5. Η μέση τιμή των τετραγώνων της απόκλισης MSD κατά την προσέγγιση :

$$MSD = \frac{SSD}{DFD}$$

6. Το τυπικό λάθος του εμπειρικού συντελεστή  $se(b)$  και το αντίστοιχο της εμπειρικής σταθεράς  $se(a)$  :

$$se(b) = \sqrt{\frac{MSD}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}$$

$$se(a) = \sqrt{MSD \left( \frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right)}$$

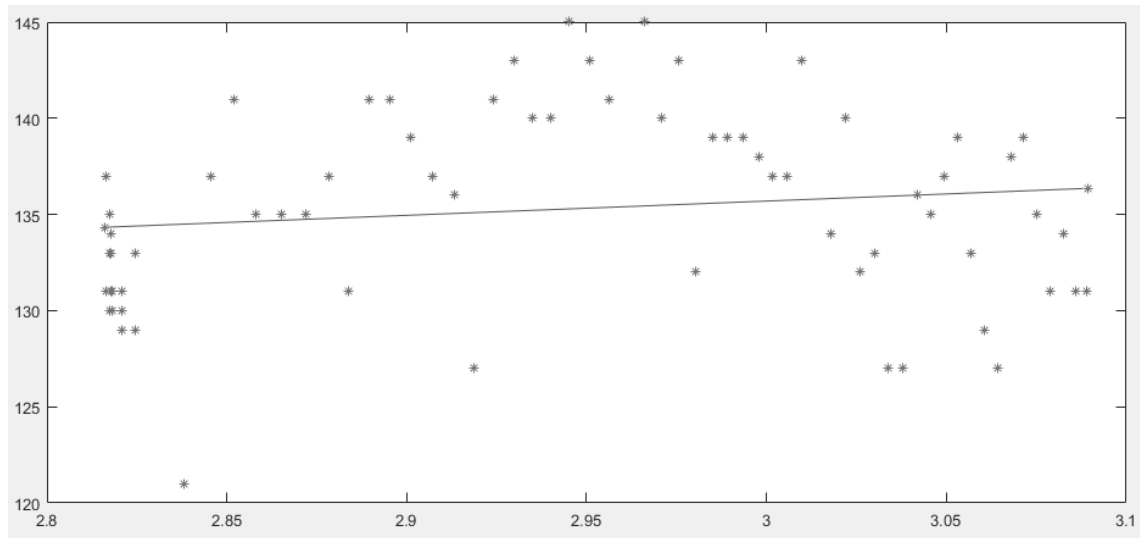
Για να υπολογίσουμε τις παραπάνω στατιστικές ποσότητες χρησιμοποιήσαμε το αρχείο `metrhseis.m` το οποίο εκτελείται στο υπολογιστικό περιβάλλον του Matlab και περιλαμβάνει τον παρακάτω κώδικα.



```
1 table_x=[2.81798 2.81739 2.81635 2.81808 2.81757 2.81735 2.81644 2.81763 2.81772
2.81789 2.82068 2.82076 2.82079 2.82459 2.82470 2.83824 2.84561 2.85194 2.85813
2.86504 2.87181 2.87836 2.88369 2.88963 2.89539 2.90105 2.90711 2.91314 2.91858
2.92402 2.92979 2.93479 2.94014 2.94501 2.95079 2.95615 2.96620 2.97097 2.97551
2.98037 2.98513 2.98925 2.99352 2.99786 3.00162 3.00565 3.00983 3.01796 3.02190
3.02598 3.03015 3.03383 3.03802 3.04199 3.04571 3.04940 3.05295 3.05681 3.06046
3.06424 3.06784 3.07127 3.07513 3.07888 3.08255 3.08592 3.08905];
2
3 table_y=[130 130 131 131 133 135 137 133 134 131 131 129 130 129 133 121 137 141 135
135 135 137 131 141 141 139 137 136 127 141 143 140 140 145 143 141 145 140 143 132
139 139 139 138 137 137 143 134 140 132 133 127 127 136 135 137 139 133 129 127 138
139 135 131 134 131 131];
4
5 sum_x=sum(table_x);
6 sum_y=sum(table_y);
7 avg_x=mean(table_x);
8 avg_y=mean(table_y);
9
10 r_panw=0;
11 S_xi_avgx_2=0;
12 S_yi_avgy_2=0;
13 SSD=0;
14
15 for i=1:length(table_x)
16 r_panw=r_panw+((table_x(i)-avg_x)*(table_y(i)-avg_y));
17 S_xi_avgx_2=S_xi_avgx_2+((table_x(i)-avg_x)^2);
18 S_yi_avgy_2=S_yi_avgy_2+((table_y(i)-avg_y)^2);
19 end
20
21 r_katw=sqrt(S_xi_avgx_2+S_yi_avgy_2);
22 r=r_panw/r_katw;
23 b=r_panw/S_xi_avgx_2;
24 a=avg_y-(b*avg_x);
25
26 for j=1:length(table_x)
27 SSD=SSD+((table_y(i)-a-(b*table_x(j)))^2);
28 end
29
30 DFD=length(table_x)-2;
31
32 MSD=SSD/DFD;
33
34 se_b=sqrt(MSD/S_xi_avgx_2);
35
36 se_a=sqrt(MSD*(1/length(table_x)+(avg_x^2)/S_xi_avgx_2));
37
38 fprintf('\nsum_x:%f\n',sum_x);
39 fprintf('\nsum_y:%f\n',sum_y);
40 fprintf('\navg_x:%f\n',avg_x);
41 fprintf('\navg_y:%f\n',avg_y);
42 fprintf('\nS_xi_avgx_2:%f\n',S_xi_avgx_2);
43 fprintf('\nS_yi_avgy_2:%f\n',S_yi_avgy_2);
44 fprintf('\nr_panw:%f\n',r_panw);
45 fprintf('\nr_katw:%f\n',r_katw);
46 fprintf('\nr:%f\n',r);
47 fprintf('\nb:%f\n',b);
48 fprintf('\na:%f\n',a);
49 fprintf('\nGia x=0:%f\tGia y=0:%f\n',a,-a/b);
50 fprintf('\nSSD:%f\n',SSD);
51 fprintf('\nDFD:%f\n',DFD);
52 fprintf('\nMSD:%f\n',MSD);
53 fprintf('\nse_b:%f\n',se_b);
54 fprintf('\nse_a:%f\n',se_a);
55
56 x=table_x;
57
58 y=a+b*x;
59
60 plot(x,y);
61 hold;
62
63 plot(table_x,table_y,'*');
```

Εικόνα 36 Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε στο Matlab

Από την εκτέλεση του προγράμματος στο Matlab παίρνουμε τις στατιστικές τιμές που χρειαζόμαστε και πλέον μπορούμε να σχεδιάσουμε την ευθεία  $y = a + bx$ .



Εικόνα 37 Η ευθεία  $y = a + bx$

$$a = Lo[dB] = 113,475615$$

$$b = 7,406197$$

$$b = 10k \Rightarrow k = b/10 = 7,406197/10 = 0,7406197$$

$$r = 0.137512$$

$$SSD = 1252,587988$$

$$DFD = 65$$

$$MSD = 19,270584$$

$$se(b) = 5,769737$$

$$se(a) = 16.986159$$

Όπως περιμέναμε όσο αυξάνεται η απόσταση της κινητής μονάδας από την σταθμό βάσης αυξάνονται και οι απώλειες της ζεύξης.

Καταλήγουμε στο μοντέλο μας το οποίο διατυπώνεται ως εξής :

Η απόσβεση (Path loss  $L_{FS}$ ) δίδεται από τον τύπο :

$$L_{FS}[dB] = a + b \log_{10}d + 20\log_{10}\left(\frac{4\pi f}{c}\right) \Rightarrow$$

$$L_{FS}[dB] = 113,4 + 7,41 \log_{10}d + 20\log_{10}\left(\frac{4\pi f}{c}\right)$$

και ονομάζεται «Λούκιο Μοντέλο».

Η εκτίμηση της ισχύος λήψης σε [dBm] είναι :

$$P_R[dBm] = P_T[dBm] + G_T[dB] + G_R[dB] - L_{FS}[dBm] \Rightarrow$$

$$P_R[dBm] = 50[dBm] - a - b \log_{10}d - 20\log_{10}\left(\frac{4\pi f}{c}\right) \Rightarrow$$

$$P_R[dBm] = 50[dBm] - 113,4 - 7,41 \log_{10}d - 20\log_{10}\left(\frac{4\pi f}{c}\right)$$

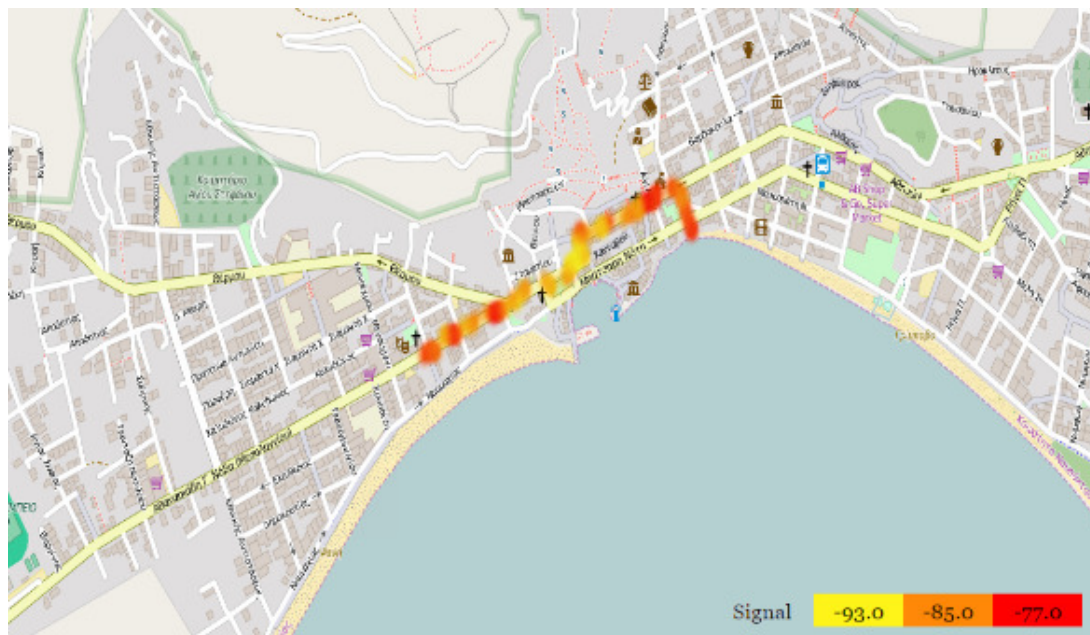
Οπότε απομένει να μας δώσει κάποιος την συχνότητα του δικτύου.

Σε Watt θα ισχύει :

$$P_R[W] = \frac{P_T G_T G_R}{L_o \left(\frac{4\pi f}{c}\right) d^k}$$

Με παραμέτρους το k και το  $L_o$

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η ισχύς του σήματος σε κάθε σημείο μέτρησης με απεικόνιση τύπου heatmap.



Εικόνα 38 – Απεικόνιση τύπου heatmap της ισχύς του σήματος σε κάθε σημείο μέτρησης.

## Βιβλιογραφία

1. Λούβρος, Σπυρίδων και Κούγιας, Ιωάννης. *Το Δίκτυο Κινητής Τηλεφωνίας GSM*. Αθήνα : Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, 2010.
2. ETSI, *GSM Specification Series 01.02-1.06.*: "GSM Overview. Glossary, Abbreviations, Service Phases".
3. ETSI, *GSM Specification Series 02.01-2.88.*: "GSM Services and Features".
4. ETSI, *GSM Specification Series 03.01-3.88.* : "GSM Functions, Architecture, Numbering and Addressing Procedures".
5. ETSI, *GSM Specification Series 04.01-4.88.* : "MS-BSS Interface".
6. ETSI, *GSM Specification Series 06.01-6.32.* : "Radio Link".
7. ITU. <http://www.itu.int/>.
8. *3rd Generation Partnership Project*. <http://www.3gpp.org/>.
9. Ascom, TEMS for Wireless Network Testing And Measurement. <http://www.ascom.com/>.
10. Anite, Nemo Network Testing Solutions. <http://anite.com/>.
11. SwissQual, Network Benchmarking, Optimization and Service Monitoring. <http://www.swissqual.com/>.
12. Google Maps. <http://maps.google.com/>.
13. Network Cell Info Android App. Wilysis. <http://wilysis.com/networkcellinfo>.
14. Matlab. MathWorks. <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.
15. GPS Visualizer. <http://www.gpsvisualizer.com/>.
16. OpenHeatMap. <http://www.openheatmap.com/>.
17. Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών & Ταχυδρομείων. <http://www.eett.gr/opencms/opencms/EETT/>.
18. GSM Favorites. <http://www.gsmfavorites.com/documents/introduction/mobile/>.
19. Farley, Tom. *Mobile Telephony History*. April 2005.
20. Consortium, The international. *Global System for Mobile Communication (GSM)*.
21. Pashtan, Ariel. *'6.108.10 Wireless Terrestrial Communications : Cellular Telephony*. 2006.
22. Κωτσόπουλος, Σ. και Καραγιαννίδης, Γ. *Κινητή Τηλεφωνία*. 1997.
23. Wikipedia. <http://www.wikipedia.org/>.
24. Wandel & Goltermann Gmbh & Co, Communications Test Solutions. *Pocket Guide for Fundamentals and GSM Testing*.
25. Redl, Sigmund. *An introduction to GSM*.
26. International, AIRCom. *GSM System Overview*.

**27. Θεολόγου, Μ. Ε. Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών. : Εκδόσεις Τζιόλα, 2008.**

**28. Κανάτας, Α., Κωνσταντίνου, Φ. και Πάντος, Γ. Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών. Αθήνα : Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2008.**

**29. Hata και Masaharu. *Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services.* : IEEE Transactions on Vehicular Technology, August 1980.**

**30. Κωνσταντίνου, Φ. *Κινητές Τηλεπικοινωνίες - Μοντέλα Ραδιοκάλυψης.* Αθήνα : s.n., Σεπτέμβριος 2002.**

**31. Καψάλης, Χ. και Κωπτής, Π. *Κεραίες - Ασύρματες Ζεύξεις.* Θεσσαλονίκη : Εκδόσεις Τζιόλα, 2003.**

**32. Κανελλόπουλος, Ι. Δ. *Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε γήινο περιβάλλον.* Θεσσαλονίκη : Εκδόσεις Τζιόλα, 2003.**