

# **Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου**

**Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών**

## **Μεταπτυχιακή Διατριβή** **Στα Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας**



**Μελέτη και Μετρήσεις στην περιοχή των 3.6 GHz για  
περιπτώσεις Rural Line of Site (LoS) / Non Line of Site (NLoS)**

**Αγγελίνα Γκιώνη**

**Επιβλέπων Καθηγητής**  
**Δημοσθένης Βουγιούκας**

**Μάιος 2018**

# **Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου**

## **Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών**

**Μελέτη και Μετρήσεις στην περιοχή των 3.6 GHz για περιπτώσεις Rural Line of Site (LoS) / Non Line of Site (NLoS)**

**Αγγελίνα Γκιώνη**

**Επιβλέπων Καθηγητής  
Δημοσθένης Βουγιούκας**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε  
προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση

μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών  
στα Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας

από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών  
του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου

**Μάιος 2018**

# Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή πραγματεύεται την εξαγωγή ενός ημι-εμπειρικού (semi-empirical) μοντέλου απωλειών (path loss model) στην περιοχή των 3.6 GHz για αγροτικές περιοχές ράδιο-κάλυψης (Rural).

Η εξαγωγή του μοντέλου βασίστηκε στην διεξαγωγή πραγματικών πέδιο-μετρήσεων στις αγροτικές περιοχές κάλυψης της Στερεάς Ελλάδος σε περιπτώσεις LoS και Non-LoS. Βάσει των μετρήσεων ακολούθησε μία στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων για την διαμόρφωση και την προσαρμογή των πολλαπλασιαστικών συντελεστών του μοντέλου Standard Propagation Model SPM. Ακολούθως εξήχθη ένα ημι-εμπειρικό μοντέλο για την περίπτωση Rural LoS και ένα άλλο διορθωμένο για την περίπτωση Non-LoS σε σχέση με απαιτούμενα περιθώρια απωλειών (margins) βάσει φυσικών μοντέλων κυματικής διάδοσης.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε και μία συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων μέτρησης σε σχέση με τις προβλέψεις του εξαχθέντος μοντέλου, ώστε να παρουσιαστεί η ακρίβεια πρόβλεψής του.

# Summary

This Master Thesis investigates the extrapolation of a semi-empirical pathloss model at 3.6 GHz in Rural areas.

The model extrapolation was based on real field measurements in rural areas of Greece in both LoS and NLoS cases. Based on the aforementioned measurements a statistical analysis was conducted in order to adjust the multiplication factors of the well-known in international scientific literature Standard Propagation Model SPM. Eventually a semi-empirical modeled was successfully and properly performed for the LoS case as well as another one for the NLoS scenario considering all necessary margins due to basic physical wave propagation effects.

Finally, a comparison was conducted between the realistic field measurements and the estimated SPM model predictions in order to conclude on the model accuracy.

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσης Μεταπτυχιακής Διατριβής θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Βουγιούκα Δημοσθένη για την επιστημονική και συμβουλευτική καθοδήγηση του καθόλη την διάρκεια της συγγραφής.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους βοήθησαν, ο καθένας με τον δικό του τρόπο, στην ολοκλήρωση της.

# Περιεχόμενα

Παρουσίαση Θέματος Διατριβής.....	1
1.1 Σκοπός μεταπτυχιακής διατριβής.....	1
1.2 Βιβλιογραφικές Αναφορές .....	6
1.3 Στόχος μεταπτυχιακής διατριβής .....	9
Περιγραφή Τεχνολογίας LTE.....	1
2.1 Εισαγωγή στην τεχνολογία LTE .....	1
2.2 Το Δίκτυο SAE.....	3
2.3 Η διεπαφή ράδιο-δικτύου LTE.....	4
2.4 Η τεχνολογία LTE-TDD .....	10
2.5 Βασικές μετρήσεις πιστοποίησης ράδιο-κάλυψης .....	14
Παρουσίαση Τεχνολογίας Δικτύου Μέτρησης.....	19
3.1 Εισαγωγή.....	19
3.2 Περιγραφή τεχνολογίας δικτύου μέτρησης LTE-TDD .....	23
3.3 Τεχνικές Προδιαγραφές - Απαιτήσεις ράδιο-κάλυψης δικτύου LTE-TDD .....	30
Μοντέλα απωλειών διάδοσης .....	41
4.1 Εισαγωγή.....	41
4.2. Επισκόπηση Μοντέλων Απωλειών Ασυρμάτου Καναλιού.....	42
4.2.1 Μοντέλο Απωλειών Ελευθέρου χώρου.....	43
4.2.2 Διόρθωση Μοντέλου Απωλειών Ελευθέρου Χώρου (FSL).....	44
4.3 Μοντέλο ράδιο-κάλυψης Standard Propagation Model (SPM) .....	49
4.4 Υπολογισμός κέρδους κεραίας εκπομπής σταθμού βάσης .....	50
4.5 Συνθήκες Μερικής μη-Οπτικής Επαφής – Απώλειες λόγω φυλλωμάτων (foliage losses) .....	55
4.6 Συνθήκες Μερικής ή ολικής μη-Οπτικής Επαφής – Απώλειες Knife-Edge .....	57
Εξαγωγή Μοντέλου Απωλειών Διάδοσης .....	62
5.1 Εισαγωγή.....	62
5.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Παραμέτρων Εξοπλισμού των Μετρήσεων.....	66
5.3 Υπολογισμός Ισχύος εκπομπής των Cell Specific Reference Signals .....	67
5.4 Επισκόπηση Προϋπολογισμού Ισχύος ζεύξης – Power Link Budget Analysis .....	69
5.5 Εξαγωγή Μοντέλου Απωλειών .....	74
5.5.1 Μοντέλο Απωλειών Αγροτικής Περιοχής Line of Site – LoS .....	83
5.5.2 Μοντέλο Απωλειών Αγροτικής Περιοχής, περίπτωση NLoS.....	92
5.5.3 Μοντέλο Απωλειών Φυλλωμάτων .....	97
Επίλογος.....	105
6.1 Γενικές Παρατηρήσεις .....	105

6.2 Συμπεράσματα .....	106
6.3 Μελλοντική έρευνα.....	107
Βιβλιογραφία.....	109

# Κεφάλαιο 1

## Παρουσίαση Θέματος Διατριβής

### 1.1 Σκοπός μεταπτυχιακής διατριβής

Τον Σεπτέμβριο του 2007 η οικογένεια της 3GPP εισήγαγε το E-UTRAN (Evolved UTRAN), το οποίο είναι γνωστό ως SAE/LTE ή δίκτυο 4G. Πάνω από 50 εταιρίες και ινστιτούτα έρευνας πήραν μέρος στην μεγαλύτερη προσπάθεια ένωσης προτύπων για να οριστεί η νέα παγκόσμια ασύρματη πρόσβαση και η τεχνολογία του εξελισσόμενου πυρήνα δικτύου. Η 3GPP δημιούργησε επομένως ομάδες σε δύο διακριτά αντικείμενα εργασίας, το LTE (Long Term Evolution) και το SAE (System Architecture Evolution). Το LTE στοχεύει στην εξέλιξη του ασύρματου δικτύου (radio access network), ενώ το SAE στοχεύει στην εξέλιξη του δικτύου κορμού (core network). Επειδή το LTE είναι η εξέλιξη του UMTS, τα δομικά μέρη της αρχιτεκτονικής του LTE ονομάζονται Evolved UTRA (E-UTRA) και Evolved UTRAN (E-UTRAN). Αυτοί είναι οι επίσημοι όροι για να περιγράψουν το δίκτυο ασυρμάτου προσβάσεως RAN (Radio Access Network).

Η τεχνολογία LTE-TDD είναι μία από τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες για τον σχεδιασμό ευρυζωνικών δικτύων σταθερής ασυρμάτου προσβάσεως (fixed wireless access). Επιπλέον, η τεχνολογία διπλεξίας διαίρεσης χρόνου (TDD – Time Division Duplexing), αλλά και η ζώνη συχνοτήτων 43 (3600-3800 MHz) έχουν το πλεονέκτημα ότι παρουσιάζουν ιδιαίτερα



χαρακτηριστικά διάδοσης σε περιβάλλοντα Rural. Κατ' αρχάς στις περιπτώσεις όπου αναφερόμαστε σε ευρυζωνικά δίκτυα (με εύρος φάσματος από 20 MHz έως και 100 MHz με διαφορετικές τεχνολογίες carrier aggregation) είναι σημαντικό να έχουμε την ίδια συμπεριφορά στο uplink, αλλά και στο downlink (συμπεριφορά καναλιού channel reciprocity), δηλαδή το κανάλι να είναι στενής-ζώνης (narrow-band) και να έχει ίδιες απώλειες στις υποζώνες της άνω (UL - uplink) και κάτω ζεύξης (DL - downlink). Συνήθως, στις υψηλότερες συχνότητες το κανάλι μετάδοσης (channel model) δεν εμφανίζει ομοιόμορφη συμπεριφορά σε διαφορετικές συχνότητες κάνοντας την τεχνολογία διπλής διαίρεσης συχνότητας (FDD - Frequency Division Duplexing) να εμφανίζει σοβαρά μειονεκτήματα σε σχέση με την τεχνολογία TDD. Επιπλέον, η ζώνη συχνοτήτων 43 δεν υποστηρίζεται ευρέως από πολλούς παρόχους (operators) και οι συχνότητες είναι σχετικά «καθαρές» από παρεμβολές. Ένα ακόμη πλεονέκτημα όσο ανεβαίνουμε σε υψηλότερες συχνότητες είναι το κόστος των συσκευών του τελικού χρήστη. Όντως, σε υψηλότερες συχνότητες είναι δυσκολότερο να φτιάξουμε φθινό εξοπλισμό για την υποστήριξη της τεχνολογίας FDD (duplexers), με αποτέλεσμα η τεχνολογία TDD η οποία βασίζεται κυρίως σε λειτουργικότητα στην περιοχή βασικής ζώνης (baseband) και όχι σε υψηλές συχνότητες RF, να είναι φθηνότερη και περισσότερο προσφιλή. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθούμε και στο κομμάτι της αδειοδότησης όσον αφορά τους παρόχους της υπηρεσίας. Πράγματι, τα τελευταία χρόνια η εξασφάλιση φθινοτέρων αδειών στο φάσμα συχνοτήτων είναι ο κύριος λόγος όπου οι πάροχοι κυψελωτών δικτύων επιλέγουν τις ζώνες συχνοτήτων τεχνολογιών TDD.

Στην διεθνή βιβλιογραφία δεν υπάρχουν πολλές εργασίες σχετιζόμενες με πραγματικές μετρήσεις απωλειών (path loss) των δικτύων LTE στη ζώνη συχνοτήτων 43 των 3600 – 3800 MHz τεχνολογίας TDD. Η τεχνολογία LTE-TDD στη ζώνη συχνοτήτων 43 είναι νέα σχετικά τεχνολογία στην Ευρώπη και ιδιαιτέρως στην Ελλάδα. Η πλέον σωστή μέθοδος εξαγωγής των μοντέλων ράδιο-κάλυψης, και κατ' επέκταση των απωλειών ράδιο-διάδοσης, γνωρίζουμε ότι βασίζεται σε φυσικές αρχές κυματικής διάδοσης και ονομάζεται θεωρητικό μοντέλο. Η αναλυτική λύση των εξισώσεων του Maxwell είναι χρονοβόρα, απαιτεί μαθηματικές και φυσικές προσομοιώσεις και προφανώς η εκτίμηση των επαγόμενων H/M πεδίων διαφέρει ανά τοπική γεωγραφική περιοχή με μικρό-ιδιαιτερότητες του γεωγραφικού αναγλύφου. Επομένως, η πρακτική χρήση τέτοιων θεωρητικών μοντέλων είναι περιορισμένη.

Ένας άλλος (απλούστερος) τρόπος εκτίμησης των απωλειών σε γενικές περιπτώσεις μοντέλων ράδιο-κάλυψης είναι η χρήση των λεγόμενων εμπειρικών μοντέλων, τα οποία έχουν ως αφετηρία δεδομένα που συλλέχθηκαν από πειραματικές μετρήσεις, και μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η εξαγωγή ενός μαθηματικού τύπου. Δηλαδή, στην περίπτωση των εμπειρικών

μοντέλων οι σχεδιαστές του δικτύου εκτελούν εκτεταμένες μετρήσεις H/M πεδίου ισχύος λήψης (drive tests in scanning mode) σε προκαθορισμένες διαδρομές, προσπαθώντας να αποκομίσουν μετρήσεις σε όλες τις δυνατές περιοχές ράδιο-κάλυψης και να καλύψουν όλες τις δυνατές αποστάσεις.

Τα βασικότερα μειονεκτήματα των εμπειρικών μοντέλων είναι η εκτέλεση μετρήσεων σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων και σε συγκεκριμένο περιβάλλον, καθώς και η απουσία παραμέτρων του δικτύου μέτρησης. Όσον αναφορά το περιβάλλον εφαρμογής και το εύρος συχνοτήτων υπάρχει ουσιαστικά σφάλμα στη εφαρμογή τους σε συγκεκριμένες συχνότητες ή σε διαφορετικό περιβάλλον. Έτσι, απαιτείται μεγάλη προσοχή κατά την εφαρμογή των μαθηματικών τύπων σε ένα νέο περιβάλλον, γιατί αν και τα δύο περιβάλλοντα μπορεί να παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, μπορεί να διαφέρουν σημαντικά ως προς τις διάφορες συνθήκες διάδοσης. Επίσης, τα εμπειρικά μοντέλα περιέχουν εγγενώς, αλλά όχι εμφανώς, τεχνικά χαρακτηριστικά και παραμέτρους του δικτύου μετάδοσης, τα οποία δεν επιτρέπουν επί της ουσίας τον έλεγχο και την ουσιαστική παραμετροποίηση των μοντέλων απωλειών.

Επομένως, μία άλλη λύση είναι η χρήση ενός ημι-εμπειρικού μοντέλου, όπου εκτελούνται μετρήσεις απωλειών στο περιβάλλον ράδιο-διάδοσης, τις οποίες χρησιμοποιούμε για να παραμετροποιήσουμε (tune) ένα γενικά αποδεκτό τύπο μοντέλου βασισμένο σε βασικά χαρακτηριστικά του δικτύου (ύψος κεραίας σταθμού βάσης, ύψος δέκτη χρήστη, συχνότητα λειτουργίας), καθώς και σε χαρακτηριστικά της μορφολογίας του εδάφους και του περιβάλλοντος μέτρησης (Line of Site (LoS), Non-Line of Site (NLoS), παρουσία απωλειών Fresnel κτλ). Η χρήση ενός ημι-εμπειρικού μοντέλου είναι εν γένει ενδεδειγμένη, καθώς λαμβάνει υπόψιν όλες τις παραμέτρους του περιβάλλοντος.

Στην παρούσα διατριβή θα εξαχθεί ένα ημι-εμπειρικό (semi-empirical) μοντέλο απωλειών (path loss model) με μετρήσεις στην φασματική περιοχή των 3.6 GHz για αγροτικές περιοχές ράδιο-κάλυψης (Rural). Έχει σημασία η επιλογή της κατηγορίας του περιβάλλοντος ράδιο-διάδοσης, καθώς θα πρέπει να είμαστε συνεπείς με τις διεθνείς προδιαγραφές και πρότυπα. Σύμφωνα με το αντίστοιχο πρότυπο της ITU [1] οι γενικές κατηγορίες (ταξινόμηση) διάδοσης παρουσιάζονται στον πίνακα 1.1 ως ακολούθως:

**Πίνακας 1.1:** Λειτουργικά περιβάλλοντα διάδοσης

<b>Environment</b>	<b>Description and propagation impairments of concern</b>
Urban high-rise	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Urban canyon, characterized by streets lined with tall buildings of several floors each</li> <li>- Building height makes significant contributions from propagation over roof-tops unlikely</li> <li>- Rows of tall buildings provide the possibility of long path delays</li> <li>- Large numbers of moving vehicles in the area act as reflectors adding Doppler shift to the reflected waves</li> </ul>
Urban/suburban low-rise	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Typified by wide streets</li> <li>- Building heights are generally less than three stories making diffraction over roof-top likely</li> <li>- Reflections and shadowing from moving vehicles can sometimes occur</li> <li>- Primary effects are long delays and small Doppler shifts</li> </ul>
Residential	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Single and double storey dwellings</li> <li>- Roads are generally two lanes wide with cars parked along sides</li> <li>- Heavy to light foliage possible</li> <li>- Motor traffic usually light</li> </ul>
Rural	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Small houses surrounded by large gardens</li> <li>- Influence of terrain height (topography)</li> <li>- Heavy to light foliage possible</li> <li>- Motor traffic sometimes high</li> </ul>

Εάν θέλαμε να τις εξειδικεύσουμε περαιτέρω θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε την ταξινόμηση του British Telecom Land usage category [2]:

**Πίνακας 1.2:** Κατηγορίες χρήσεων γης της British Telecom

<b>Κατηγορία</b>	<b>Περιγραφή</b>
0	Ποτάμια, λίμνες και θάλασσες
1	Ανοιχτές αγροτικές περιοχές, π.χ. χωράφια και χερσότοποι με λίγα δέντρα
2	Αγροτικές περιοχές, παρόμοιες με τις παραπάνω, αλλά με κάποιες δασώδεις περιοχές, π.χ. πάρκα
3	Δασώδεις ή δασικές αγροτικές περιοχές
4	Λοφώδεις ή ορεινές αγροτικές περιοχές
5	Προαστιακές περιοχές, κατοικίες χαμηλής πυκνότητας και σύγχρονες βιομηχανικές περιοχές
6	Προαστιακές περιοχές, κατοικίες υψηλότερης πυκνότητας, π.χ. εργατικές κατοικίες
7	Αστικές περιοχές με κτίρια έως και τέσσερις ορόφους, αλλά με κάποιον ανοιχτό χώρο ανάμεσά τους
8	Αστικές περιοχές υψηλότερης πυκνότητας, στις οποίες ορισμένα κτίρια έχουν πάνω από τέσσερις ορόφους
9	Πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές στις οποίες τα περισσότερα κτίρια έχουν περισσότερους από τέσσερις ορόφους και μερικά μπορεί να ταξινομηθούν ως ουρανοξύστες# η κατηγορία αυτή περιορίζεται στα κέντρα λίγων μεγάλων πόλεων

Στην παρούσα διατριβή, ακολουθώντας τις παραπάνω κατηγορίες, η αγροτική περιοχή ράδιο-κάλυψης (Rural) αναφέρεται στην κατηγορία 4. Σε αυτή την περίπτωση, το κυρίαρχο κυματικό φαινόμενο είναι το φαινόμενο της περίθλασης και των απωλειών Fresnel λόγω των επικείμενων σκιάσεων (shadowing) λόγω των φυσικών εμποδίων.



**Σχήμα1.1:** Παρουσίαση γεωγραφικού αναγλύφου βάσει λογισμικού σχεδιασμού Atoll

Η αναμενόμενη περίθλαση θα δώσει μερική κάλυψη στα επισκιαζόμενα σημεία, το οποίο είναι επιθυμητό. Όμως, στον ορίζοντα πέρα του εμποδίου η ακτινοβολία θα φθάσει με σαφή ελάττωση της ισχύος της λόγω απωλειών Fresnel, περιορίζοντας την τελική εμβέλεια ράδιο-κάλυψης.

Το προτεινόμενο μοντέλο της παρούσης διατριβής θα αποτελέσει λοιπόν ένα έγκυρο ημί-εμπειρικό μοντέλο απωλειών καναλιού αγροτικών περιοχών (Rural coverage category 4), το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από ερευνητές και σχεδιαστές δικτύου στο μέλλον για υπηρεσίες διαδικτύου των αντικειμένων (IoT – Internet of Things) και δίκτυα αισθητήρων, ασύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών ή υπηρεσίες σταθερές-ασύρματες πάνω από δίκτυα LTE-Advanced (LTE-A) και δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G). Ιδιαίτερα ενδιαφέρον έχουν οι μελλοντικές ζώνες συχνοτήτων άνω των ήδη χρησιμοποιούμενων 2.5 GHz, όπως η ζώνη συχνοτήτων των 3.6-3.8 GHz ή η ζώνη συχνοτήτων (unlicensed band) των 5 GHz. Στην περίπτωση μας όμως θα δούμε αποκλειστικά την ζώνη συχνοτήτων των 3.6-3.8 GHz, καθώς εκεί θα εκτελέσουμε τις μετρήσεις πεδίου. Επιπλέον, θα πρέπει να αναφερθεί ότι, εφόσον μας ενδιαφέρει η περίπτωση της κατηγορίας 4, έχει μεγάλη σημασία η πεδίο-μέτρηση και η εξαγωγή συμπερασμάτων στις περιπτώσεις LoS και NLoS στη ζώνη συχνοτήτων των 3.6-3.8 GHz. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούσαμε να αξιολογήσουμε βασικές φυσικές παραμέτρους οι οποίες εμπλέκονται όπως οι

ζώνες Fresnel, η περίθλαση και τα φαινόμενα πολύ-όδευσης (multipath), αλλά και οι περιπτώσεις σκίασης (Shadowing).

## 1.2 Βιβλιογραφικές Αναφορές

Ακολουθώντας την βιβλιογραφική έρευνα στη διεθνή βιβλιογραφία, φαίνεται ότι οι περισσότερες εργασίες είναι βασισμένες σε προσομοιώσεις γνωστών λογισμικών, όπως MatLab, Atoll ή ATDI, οι οποίες ναι μεν προσθέτουν γνώση και εμπειρία στην ανάλυση και τον σχεδιασμό δικτύων σε συχνότητες κάτω ή άνω των 3 GHz (όπως τα δίκτυα LTE-A ή τα πρόωρα δίκτυα τεχνολογίας 5G), αλλά δεν παύουν να είναι θεωρητικές εκτιμήσεις με αποκλίσεις από τις πραγματικές συνθήκες διάδοσης.

Πράγματι στην εργασία [3], ο συγγραφέας χρησιμοποίησε τεχνικές προσομοίωσης Matlab για να συγκρίνει τα γενικά μοντέλα COST-231 Hata model, COST Walfish-Ikegami method, SUI model and Egli model σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Η λανθασμένη υπόθεση και θεώρηση αυτής της εργασίας είναι ότι χρησιμοποιεί εκ παραδρομής τα προαναφερθέντα μοντέλα για την εξαγωγή συγκρίσεων και συμπερασμάτων στις παραπάνω ζώνες συχνοτήτων, εντούτοις εάν αναφερθούμε στη θεωρία των μοντέλων αυτών θα δούμε ότι δεν ενδείκνυνται για την ζώνη των 3.5-3.8 GHz. Αυτή η εργασία δίνει βασικές αρχές σύγκρισης των προαναφερθέντων μοντέλων, αλλά δεν προσφέρει καμία ουσιαστική συνεισφορά στην εξαγωγή κάποιου συγκεκριμένου μοντέλου ράδιο-κάλυψης.

Στην εργασία [4] οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν ομοίως τεχνικές προσομοίωσης Matlab για να συγκρίνουν τα γενικά μοντέλα ECC-33/hata okumura extended Model, Cost 231 hata Model, COST-231 Walfisch-Ikegami model και Stanford University Interim (SUI) Model, στις ζώνες συχνοτήτων 2.3 GHz, 2.6 GHz και 3.5 GHz. Ομοίως αξίζει να αναφέρουμε ότι και εδώ υπάρχει η ίδια λανθασμένη υπόθεση και θεώρηση με την εργασία [3], δηλαδή χρησιμοποιείται εκ παραδρομής λάθος μοντέλο στις ζώνες συχνοτήτων που μελετάμε σε αυτήν την εργασία. Αυτή η εργασία δίνει βασικές αρχές σύγκρισης των προαναφερθέντων μοντέλων αλλά δεν προσφέρει καμία ουσιαστική συνεισφορά στην εξαγωγή κάποιου συγκεκριμένου μοντέλου ράδιο-κάλυψης.

Στην εργασία [5] ο συγγραφέας προτείνει ένα γενικό εμπειρικό μοντέλο, το Statistical-Sakagami model, σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων 0.8 GHz – 8 GHz σε δύο διαφορετικά περιβάλλοντα αστικού ιστού (urban) και προαστιακού ιστού (sub-urban). Το ουσιαστικό πρόβλημα αυτής της εργασίας είναι ότι χρησιμοποιεί ένα γενικευμένο εμπειρικό μοντέλο για πολύ μεγάλη γκάμα συχνοτήτων οι οποίες έχουν εν γένει τελείως διαφορετικά χαρακτηριστικά διάδοσης. Επιπλέον, δεν αναφέρεται στην περίπτωση των αγροτικών περιοχών, όπου τα φαινόμενα Fresnel είναι ο

κυριότερος παράγοντας απωλειών σε περιπτώσεις LoS και NLoS. Τέλος, δεν χρησιμοποιεί μετρήσεις, αλλά μαθηματικές αναλύσεις για την εξαγωγή των συναρτήσεων των πολλαπλασιαστικών συντελεστών των μεταβλητών του ύψους της κεραίας του σταθμού βάσης, του εύρους της οδού, καθώς και της γωνίας πρόσπτωσης στην οδό.

Υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία επίσης εργασίες οι οποίες αναφέρονται σε πραγματικές μετρήσεις. Στην εργασία [6] οι συγγραφείς έχουν χρησιμοποιήσει ένα δίκτυο LTE σταθερής ασυρμάτου προσβάσεως της εταιρείας Ofcom στα 3.5 GHz στην περιοχή του Cambridge της Μεγάλης Βρετανίας για Rural, Suburban και Urban περιοχές κάλυψης. Το μετρητικό δίκτυο αποτελούταν από έξι λειτουργικούς σταθμούς βάσης με τέσσερις κεραίες (sectors) των 90 μοιρών beamwidth για να προσφέρουν πλήρη κάλυψη 360 μοιρών. Τα ύψη των κεραιών των σταθμών βάσης κυμαίνονταν από 16 έως 45 m. Τα ύψη του εξοπλισμού λήψης (Customer Premise Equipment CPE) κυμαίνονταν από 5 έως 12 m σε ένα τηλεσκοπικό ιστό ενός αυτοκινήτου. Οι συγγραφείς πρότειναν ένα εμπειρικό μοντέλο κλίσης (για τιμές δείκτη κλίσης  $n > 2$ ) το οποίο εξήγαγαν με τεχνικές γραμμικής παλινδρόμησης (linear regression), όπως θα γίνει και στην παρούσα διατριβή, και το σύγκριναν με τα υπάρχοντα γενικά εμπειρικά μοντέλα της βιβλιογραφίας.

Αυτή η εργασία έχει δύο βασικά μειονεκτήματα:

- δεν προσδιορίζει εάν οι μετρήσεις είναι σε περιβάλλον LoS ή NLoS και επομένως το εξαχθέν μοντέλο δεν μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα και σε άλλα περιβάλλοντα παγκοσμίως.
- Δεν προσδίδει καμία παράμετρο δικτυακής συσχέτισης, όπως ύψος κεραίας σταθμού βάσης, ύψος κεραίας CPE κτλ.

Στην εργασία [7] οι συγγραφείς αναφέρονται στο Rural Macrocell Models (RMA) της 3GPP TR 38.900 (Release 14) το οποίο και βασίζεται στην ITU-R. Το μοντέλο pathloss το οποίο συζητούν καλύπτει την ευρύτερη ζώνη συχνοτήτων κάτω των 6 GHz και εξαγάγουν συμπεράσματα σχετικά με τη συσχέτιση και την εγκυρότητά του σε σχέση με το ύψος της κεραίας του σταθμού βάσης για mm-wave συχνότητες άνω των 6 GHz.

Η εργασία αυτή δεν έχει πρακτικό ενδιαφέρον στις μετρήσεις για την ζώνη των 3.6 GHz που μας ενδιαφέρει, αλλά προσδίδει ένα σημαντικό μοντέλο της 3GPP το οποίο μπορούμε να αξιολογήσουμε με τις δικές μου μετρήσεις στο δίκτυο LTE TDD 3.6 GHz.

Ενδιαφέρον έχει η ακόλουθη εργασία [8] η οποία αναφέρεται στο μοντέλο Standard Propagation Model (SPM) το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διατριβή. Ακολουθεί μία παρόμοια με την παρούσα διατριβή μεθοδολογία βελτιστοποίησης του SPM μοντέλου με την χρήση του λογισμικού ράδιο-κάλυψης Atoll, αλλά δίνει έμφαση κυρίως στις παραμέτρους/χαρακτηριστικά

του μοντέλου SPM όπως περιγράφεται στο Atoll περιορίζοντας την εξαγωγή του μοντέλου στην χρήση του λογισμικού Atoll. Χρησιμοποιεί τις παραμέτρους clutter class (η οποία διαφοροποιεί το έδαφος ράδιο-κάλυψης σύμφωνα με την ακρίβεια αποτύπωσης του λογισμικού Atoll), Digital Terrain Model (το μοντέλο εμφάνισης ανακλάσεων και περιθλάσεων του λογισμικού Atoll), καθώς και διανυσματικές μεταβλητές απεικόνισης (vector maps) συσχετίζοντας τις μετρήσεις με την ακρίβεια του Atoll. Η εργασία αυτή αναφέρεται στην συχνότητα 1800 MHz ενώ στην παρούσα διατριβή εστιάζομαστε στην ζώνη 3.6-3.8 GHz.

Στην εργασία [9] παρουσιάζεται επίσης μία μεθοδολογία βελτιστοποίησης του SPM μοντέλου με την χρήση του Atoll. Είναι ένα γενικό paper χωρίς μεγάλη συνεισφορά στην γενική χρήση ημι-εμπειρικών γενικευμένων μοντέλων καθώς εστιάζεται στην αποκλειστική χρήση μίας υπηρεσίας του Atoll η οποία χρησιμοποιεί το αντίστοιχο μοντέλο με συγκεκριμένους πολλαπλασιαστικούς συντελεστές  $K_i$  οι οποίοι λαμβάνουν υπόψιν και clutters, clutter heights κτλπ. Οι μετρήσεις επιτελέστηκαν στην ζώνη συχνοτήτων 172.68125 MHz η οποία είναι εκτός ενδιαφέροντος για την δική μας ζώνη των 3.6-3.8 GHz. Επιπλέον η προτεινόμενη μεθοδολογία βελτιστοποίησης του Atoll λαμβάνει υπόψιν τις μετρήσεις και προσαρμόζει τους συντελεστές  $K_i$  για ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων στις ζώνες 800 MHz – 3500 MHz σε ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών περιβαλλόντων ράδιο-διάδοσης. Αυτή η ζώνη είναι εκτός του δικού μας ενδιαφέροντος καθώς επίσης και η βελτιστοποίηση για μεγάλο εύρος περιβαλλόντων θεωρούμε ότι δεν είναι αξιόπιστη για ευρεία χρήση των παρόχων υπηρεσιών (mobile operators). Μία παρόμοια προσέγγιση παρουσιάζεται στην εργασία [10] όπου οι συγγραφείς παρουσιάζουν την βελτιστοποίηση του μοντέλου SPM για μία αστική περιοχή (urban area) στις συχνότητες 900 MHz και 1800 MHz.

Το βασικό μειονέκτημα όλων των παραπάνω προσεγγίσεων είναι ότι χρησιμοποιούν συγκεκριμένα λογισμικά εργαλεία περιορίζοντας την εφαρμοσιμότητα αλλά και την δυνατότητα παρουσίασης μίας γενικευμένης προσέγγισης επεξεργασίας και εξαγωγής ενός μοντέλου ράδιο-κάλυψης. Στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν προσπάθειες εφαρμογής στατιστικών αναλύσεων, όπως η εργασία [11] όπου παρουσιάζει μία μεθοδολογία στατιστικής ανάλυσης δεδομένων αλλά δεν επικεντρώνεται στην βελτιστοποίηση ενός μοντέλου, αντιθέτως προσπαθεί να εξαγάγει σχέσεις γραμμικής εξάρτησης των μετρούμενων στα 2.6 GHz ποσοτήτων CINR, RSSI, και pathloss. Επιπλέον χρησιμοποιεί ένα καθαρά εμπειρικό μοντέλο τύπου power-law, το οποίο προφανώς δεν επιτρέπει πολύ μεγάλη προσαρμοστικότητα και βελτιστοποίηση σε διαφορετικά περιβάλλοντα και διαφορετικές συχνότητες. Ακολούθως στην εργασία [12] οι συγγραφείς εφαρμόζουν τεχνικές μηχανικής εκμάθησης ώστε να μπορέσουν να εκτιμήσουν μία βέλτιστη συσχέτιση των μετρούμενων ποσοτήτων στα 1800 MHz.

Αυτό το οποίο παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή είναι η διεξαγωγή μετρήσεων στο πεδίο, η ανάλυση των μετρήσεων μέσω του ευρέως γνωστού λογισμικού πακέτου excel και η χρήση της στατιστικής τεχνικής γραμμικής παλινδρόμησης η οποία είναι βασισμένη στην ανάλυση τεράστιου όγκου δεδομένων (big data analysis), καθώς και τεχνικών μηχανικής εκμάθησης (machine learning). Υπό αυτήν την σκοπιά θεωρούμε ότι η παρούσα διατριβή θέτει ένα γενικό πλαίσιο (framework) ανάλυσης δεδομένων μετρήσεων και την βασική μεθοδολογία ανάλυσης τους και εξαγωγής ενός γραμμικού μοντέλου το οποίο είναι ευπροσάρμοστο σε μελλοντικές διαφοροποιήσεις και βελτιστοποιήσεις από παρόχους τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών.

### **1.3 Στόχος μεταπτυχιακής διατριβής**

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή θα χρησιμοποιήσουμε τις μετρήσεις του δικτύου LTE-TDD και θα εξαγάγουμε ένα μοντέλο για rural περιοχές σε περιπτώσεις LoS και NLoS με λόφους (hills), εμπόδια (obstacles buildings), δένδρα και φυλλώματα (foliage losses). Για το εξαχθέν μοντέλο θα προτείνουμε ένα τροποποιημένο μοντέλο pathloss rural, βασισμένο στο Standard Propagation Model (SPM), με εισαγωγή παραμέτρων, όπως ύψος κεραίας σταθμού βάσης  $h_{BS}$ , κεραία λήψης του CPE  $h_{CPE}$ , συχνότητα και απόσταση, απώλειες Fresnel και εμποδίων, το οποίο θα είναι εφαρμόσιμο σε γενικευμένες περιπτώσεις Rural.



# Κεφάλαιο 2

## Περιγραφή Τεχνολογίας LTE

### 2.1 Εισαγωγή στην τεχνολογία LTE

Το δίκτυο τέταρτης γενεάς κινητής τηλεφωνίας (τεχνολογία 4G ή LTE/SAE) αποτελεί το νέο πρότυπο για την ασύρματη επικοινωνία και εξέλιξη του δικτύου GSM/UMTS. Ο στόχος του καινούργιου αυτού δικτύου είναι να αυξήσει τη χωρητικότητα και την ταχύτητα των υφιστάμενων δικτύων με τη χρησιμοποίηση καινοτόμων τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας και διαμόρφωσης σήματος. Λειτουργεί σε διαφορετικό εύρος ζώνης συχνοτήτων, καθώς η διεπαφή του δεν είναι συμβατή με τα υφιστάμενα δίκτυα 2ης και 3ης γενιάς.

Το δίκτυο LTE/SAE προτάθηκε για πρώτη φορά στην Ιαπωνία το 2004. Το πρότυπο οριστικοποιήθηκε το 2008 και τα πρώτα δίκτυα στο κόσμο που εγκαταστάθηκαν για δημόσια χρήση, ήταν στο Όσλο και τη Στοκχόλμη από την εταιρεία Telia-Sonera, τον Δεκέμβρη του 2009 [13]. Το πρότυπο του LTE είναι σχεδιασμένο ώστε να παρέχει ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων στη καθοδική ζεύξη (downlink) της τάξης των 300 Mbps και στην ανοδική (uplink) μέχρι και 75 Mbps. Το εύρος ζώνης του φέροντος σήματος είναι μεταβλητό, κυμαινόμενο από τα 1,4 έως τα 20 MHz και υποστηρίζονται τόσο η διπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDD) όσο και η διπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDD). Η αρχιτεκτονική του δικτύου βασίζεται σε μια απλοποιημένη μορφή αρχιτεκτονικής IP, το Evolved Packet Core (EPC), το οποίο σχεδιάστηκε για να αντικαταστήσει

το GPRS Δίκτυο Κορμού (Core Network) και υποστηρίζει την απρόσκοπτη μετάδοση τόσο δεδομένων όσο και φωνής ακόμα και σε δίκτυα με παλαιότερη τεχνολογία δικτύου (GSM, UMTS, CDMA2000). Η απλούστερη αρχιτεκτονική αποσκοπεί σε χαμηλότερα λειτουργικά έξοδα [14].

Τα κύρια χαρακτηριστικά του δικτύου LTE/SAE [14] είναι:

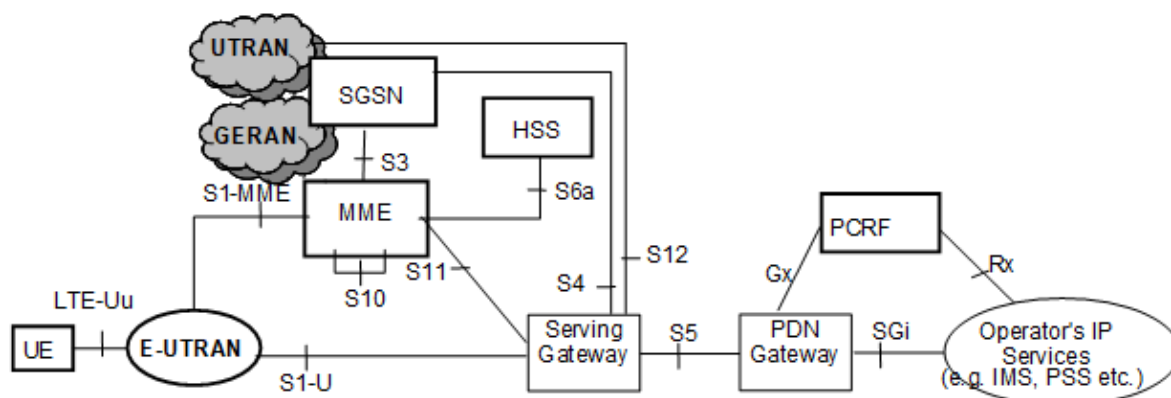
- Ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων στη καθοδική ζεύξη έως και 299.6 Mbps και στην ανοδική έως και 75.4 Mbps, ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκει ο εξοπλισμός του χρήστη. Έχουν οριστεί πέντε κατηγορίες ή κλάσεις τερματικών συσκευών. Η πιο χαμηλή υποστηρίζει μόνο απλή τηλεφωνία, ενώ η μεγαλύτερη (η οποία απευθύνεται σε τερματικές συσκευές υψηλών προδιαγραφών) υποστηρίζει τις μέγιστες δυνατές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων. Όλες οι τερματικές συσκευές είναι ικανές να επεξεργαστούν σήμα εύρους ζώνης 20 MHz.
- Χαμηλές καθυστερήσεις κατά τη μεταφορά δεδομένων (καθυστερήση IP πακέτων κάτω από 5 ms)
- Βελτιωμένη υποστήριξη για κινητές συσκευές ακόμη και αν αυτές κινούνται με ταχύτητες μέχρι και 500 χλμ/ώρα ανάλογα και με τη συχνότητα που χρησιμοποιείται.
- Χρησιμοποίηση διαμόρφωσης OFDMA για την καθοδική ζεύξη και SC-FDMA για την ανοδική
- Υποστήριξη διπλεξίας τόσο στο χρόνο όσο και στη συχνότητα (TDD, FDD), όπως επίσης και ημιαμφίδρομη FDD με την ίδια τεχνολογία πρόσβασης.
- Βελτιωμένη φασματική ευελιξία: προτυποποίηση καναλιών στα 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz.
- Υποστήριξη κυψελών μεταβλητού μεγέθους από μερικές δεκάδες μέτρα έως και 100 χλμ. Το ιδανικό μέγεθος κυψέλης στις αγροτικές περιοχές (στις οποίες χρησιμοποιούνται χαμηλότερες συχνότητες) είναι στα 5 χλμ, με μέγεθος 30 χλμ η απόδοση είναι αρκετά καλή, ενώ με μέγεθος 100 χλμ η απόδοση του δικτύου είναι ικανοποιητική. Σε αστικά περιβάλλοντα και γενικότερα σε περιβάλλοντα πόλεων χρησιμοποιούνται υψηλές συχνότητες έτσι ώστε να υποστηρίζονται υψηλές ευρυζωνικές ταχύτητες πρόσβασης. Σε αυτή τη περίπτωση κάθε κυψέλη του δικτύου έχει μέγεθος το πολύ 1 χλμ.
- Απλούστερη αρχιτεκτονική δικτύου.
- Υποστήριξη τουλάχιστον 200 ενεργών συνδέσεων δεδομένων σε κάθε κανάλι, συχνότητας 5 MHz.
- Υποστήριξη διαλειτουργικότητας και συνύπαρξη με παλαιότερα πρότυπα (πχ GSM/EDGE, UMTS, CDMA2000). Οι χρήστες θα μπορούν να πραγματοποιούν μια

τηλεφωνική συνομιλία ή σύνδεση δεδομένων σε μια περιοχή με κάλυψη LTE και θα μπορούν να συνεχίσουν τη σύνδεσή τους χωρίς πρόβλημα ακόμα και σε περιοχές χωρίς κάλυψη LTE, χρησιμοποιώντας το υφιστάμενο δίκτυο GSM/GPRS ή WCDMA ή CDMA2000.

- Ραδιοεπικοινωνιακό δίκτυο μεταγωγής πακέτων.
- Υποστήριξη υπηρεσιών όπως μετάδοση τηλεοπτικού προγράμματος στις κινητές συσκευές με τη χρήση των υποδομών του δικτύου LTE, αποτελώντας επίσης και άμεσο ανταγωνιστή του προτύπου DVB-H.

## 2.2 Το Δίκτυο SAE

Το δίκτυο κορμού της νέας γενεάς κινητών δικτύων 4G, γνωστό και ως SAE (System Architecture Evolution), ακολουθεί τα πρότυπα και τις τεχνικές προδιαγραφές της 3GPP σχετικά με την εξέλιξη της αρχιτεκτονικής κορμού γνωστής και ως EPC (Evolved Packet Core), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1, [15]:



Σχήμα 2.1. Αρχιτεκτονική δικτύου LTE.

Συγκεκριμένα το **MME (Mobility Management Equipment)** αποτελεί έναν εξελιγμένο κόμβο (intelligent Node) ο οποίος και εκτελεί/διαχειρίζεται όλα τα μηνύματα σηματοδοσίας (signaling messages) [14, 15]. Αυτά τα μηνύματα σηματοδοσίας αφορούν τις διαδικασίες κινητικότητας (Mobility Functions) των τερματικών συσκευών UE (User Equipment) εντός του δικτύου ραδιοκάλυψης σε κατάσταση idle mode (Location/Tracking Area Updates, Authentication, Paging κτλ), καθώς και σε κατάσταση connected mode (Handovers, Updating, Signaling Bearer setups, Bearer setups κτλ).

Ο κόμβος **S-GW (Switching-Gateway)** αποτελεί στην ουσία έναν εξελιγμένο μεταγωγέα (switch) με δυνατότητες δρομολόγησης (routing) όσον αναφορά τη διασυνδεσιμότητα προς τον P-GW

και προς τα eNodeB's, όπου όλα τα δικτυακά μέρη (Network Nodes) διασυνδέονται πλέον μέσω δικτύου TCP/IP Ethernet σε LAN's και WAN's διατηρώντας λειτουργίες Pool διασύνδεσης και όχι point to point ή switched/cross-connected διασυνδέσεις [14, 15]. Το S-GW αναλαμβάνει να διεκπεραιώσει την διασύνδεση των δεδομένων του χρήστη (User traffic) προς το διαδίκτυο και τους application servers, εκτελώντας δυναμικό routing/switching προς το P-GW και τον πάροχο internet.

Ο κόμβος **P-GW (Packet Data Network-Gateway)** [14, 15] είναι ένας τυπικός δρομολογητής (router) ο οποίος και διασυνδέει τα δεδομένα του χρήστη (User traffic) προς το διαδίκτυο και τους application servers, ενώ ταυτόχρονα εκτελεί διαδικασίες χρέωσης υπηρεσιών (Charging), traffic policing, QoS Bearer negotiations κτλ. Το **PCRF (Policing & Charging Rule Function)** εκτελεί χρέη QoS negotiations, packet routing and charging.

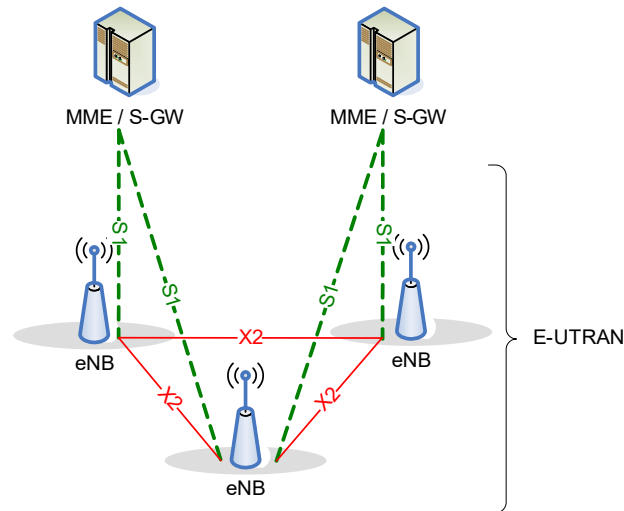
Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε ότι το δίκτυο ασυρμάτου προσβάσεως LTE, βάσει προδιαγραφών, έχει απαιτήσεις απόδοσης που στηρίζονται στις πλέον προχωρημένες τεχνολογίες του φυσικού επιπέδου, όπως την ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM) και τα κεραίο-συστήματα πολλαπλής εισόδου-πολλαπλής εξόδου (MIMO).

## 2.3 Η διεπαφή ράδιο-δικτύου LTE

Το δίκτυο προσβάσεως LTE είναι ένα δίκτυο μετάδοσης δεδομένων υψηλής ταχύτητας. Το πρότυπο αυτό αναπτύσσεται συνεχώς με καινούργιες εκδόσεις προδιαγραφών (specification releases) από τον οργανισμό προτύπων 3GPP. Το LTE αποτελεί πρότυπο για την ασύρματη επικοινωνία και εξέλιξη του GSM/UMTS. Η βασικότερη καινοτομία είναι ότι, σε αντίθεση με τις προηγούμενες εκδόσεις δικτύων δεδομένων ασυρμάτου προσβάσεως (GPRS/EDGE, WCDMA, HSxPA), υποστηρίζει μόνο packets switched υπηρεσίες σε αντίθεση με το circuit-switched μοντέλο προηγούμενων κυψελωτών δικτύων. Αυτό σημαίνει ότι οι παραδοσιακές Circuit Switched (CS) υπηρεσίες (voice, video, cs-data) θα εξυπηρετούνται από IP υπηρεσίες (VoIP, IP video streaming, PS data) [14]. Ο στόχος του LTE είναι να αυξήσει τη χωρητικότητα και την ταχύτητα των υφιστάμενων δικτύων με τη χρησιμοποίηση καινοτόμων τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας και διαμόρφωσης σήματος.

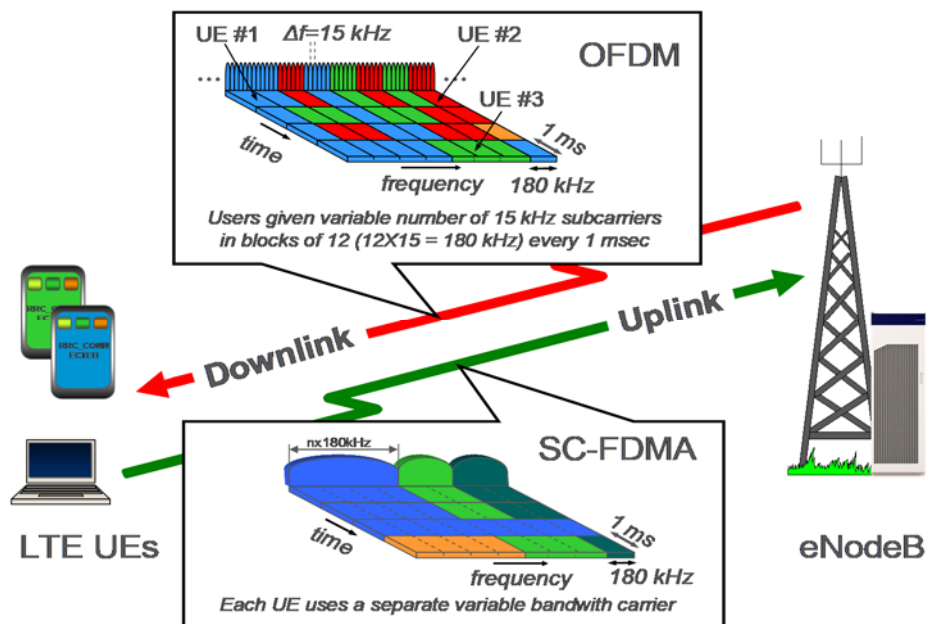
Το πρότυπο 3GPP LTE είναι σχεδιασμένο ώστε να παρέχει ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων στην κάτω ζεύξη (downlink) της τάξης των 300-400 Mbps (μόνο με τη χρήση τεχνολογίας MIMO 4x4, 64 QAM modulation scheme, και Turbo coding) και στην άνω ζεύξη (uplink) μέχρι και 75-100 Mbps [14]. Το υποστηριζόμενο εύρος ζώνης (Bandwidth) του φέροντος σήματος είναι

μεταβλητό, κυμαινόμενο από τα 1,4 έως τα 20 MHz, και υποστηρίζονται τόσο οι τεχνικές duplex επικοινωνίας FDD και TDD, [16], σχήμα 2.2:



Σχήμα 2.2: Η δομή του E-UTRAN

Σύμφωνα με τα πρότυπα 3GPP, έχει επιλεγεί ως τεχνική πολλαπλής πρόσβασης στην διεπαφή αέρος (Air Interface), για την κάτω ζεύξη (Downlink – DL με κατεύθυνση eNodeB to UE), η Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM), ενώ για την άνω ζεύξη (Uplink – UL με κατεύθυνση UE to eNodeB) η Πολλαπλή Πρόσβαση διαίρεσης Συχνότητας μοναδικού Φέροντος (Single Carrier Frequency Division Multiple Access - SC-FDMA), όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.3 , [14]



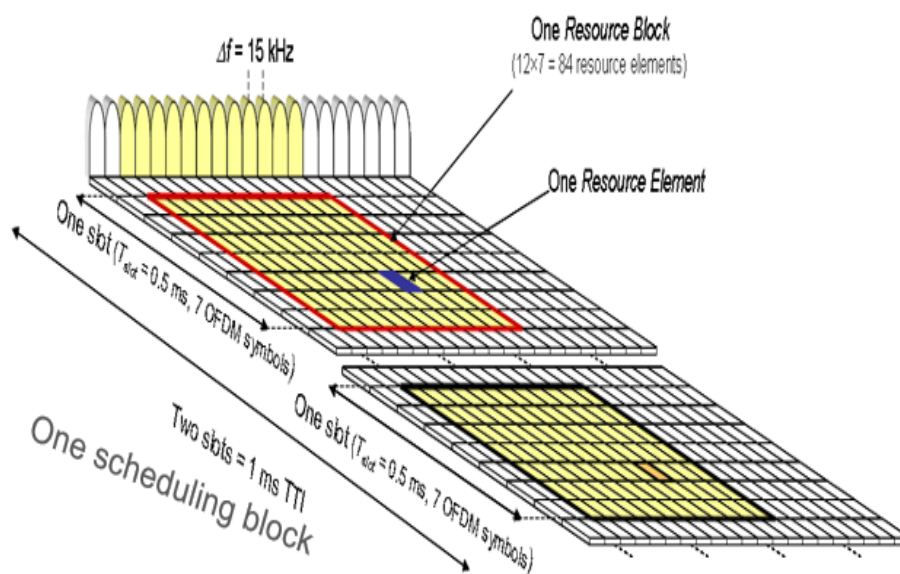
Σχήμα 2.3: Δίκτυο LTE - Η διεπαφή αέρα (LTE Air Interface)

Και οι δύο αυτές τεχνικές πρόσβασης υποστηρίζουν ένα μεταβλητό εύρος ζώνης φέροντος (flexible carrier bandwidth – 1,4 MHz, 3MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz up to 20 MHz), καθώς και πολλές ζώνες συχνοτήτων και ως εκ τούτου επιτρέπουν την ανάπτυξη και υλοποίηση της τεχνολογίας LTE σε διαφορετικές περιοχές του πλανήτη με χρήση διαφορετικού διαθέσιμου φάσματος (frequency bandwidth) σε μεταβλητό εύρος ζώνης.

Στην κάτω ζεύξη (downlink) της διεπαφής αέρα στο LTE η πρόσβαση με την χρήση της τεχνολογίας OFDM υλοποιείται σε ένα πλέγμα χρόνου-συχνότητας όπου τα φυσικά κανάλια (physical channels) απεικονίζονται στις υποφέρουσες (sub-carriers) πριν ενισχυθούν και μεταδοθούν στον αέρα.

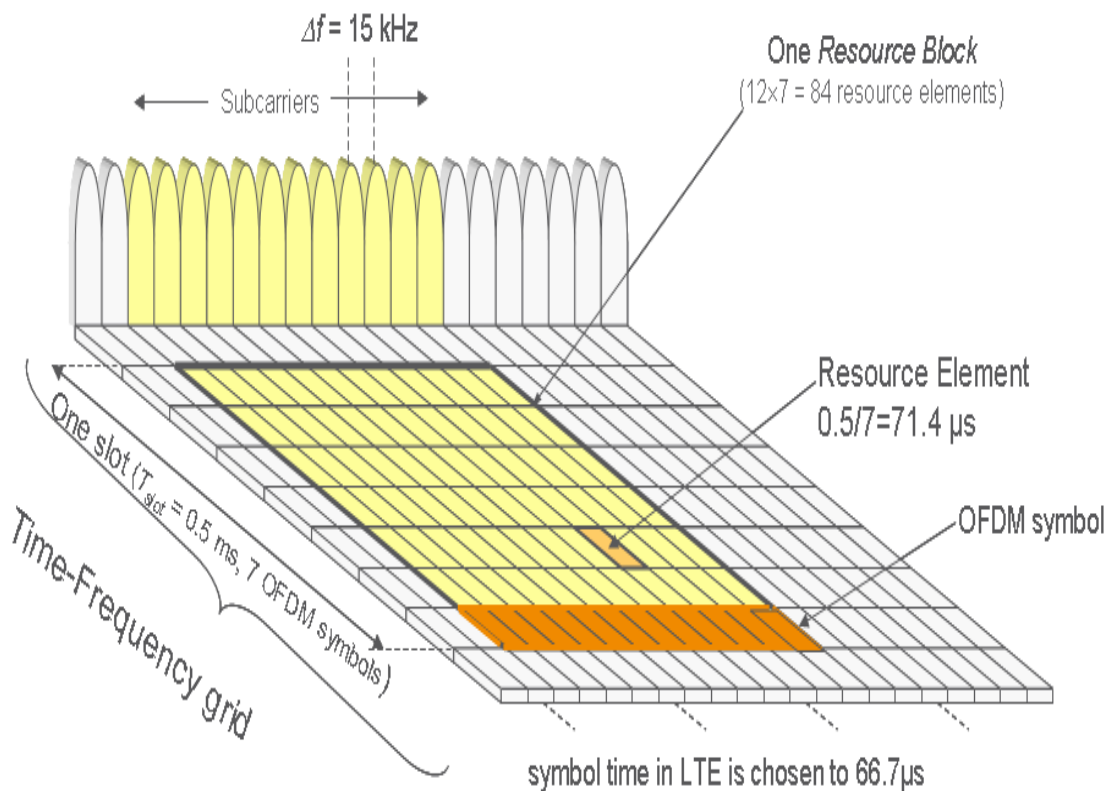
Ο άξονας των συχνοτήτων χωρίζεται σε ομάδες των 12 υποφερουσών, όπου η κάθε υποφέρουσα καταλαμβάνει εύρος φάσματος 15 KHz, επί συνόλω επομένως 12 υποφέρουσες x 15 KHz εύρος φάσματος έκαστη υποφέρουσα = 180 KHz. Αυτό ονομάζεται **Physical Radio Block (PRB)**.

Ο άξονας του χρόνου χωρίζεται σε χρονικές περιόδους μετάδοσης πληροφορίας (Time Transmission Intervals, TTI) διάρκειας 1 ms. Επιπλέον, ο άξονας του χρόνου χωρίζεται σε δύο χρονοθυρίδες (timeslots) διάρκειας 0,5 ms έκαστη, όπου το χρονικό διάστημα των 1 ms που καταλαμβάνουν και οι δύο χρονοθυρίδες ταυτοχρόνως ονομάζεται subframe. Επομένως, ο συνδυασμός ενός PRB (12 sub-carriers x 15 kHz) σε χρονική διάρκεια μίας χρονοθυρίδας (timeslot 0,5 ms) ονομάζεται **Resource Block (RB)**, ενώ ο συνδυασμός ενός PRB (12 sub-carriers x 15 kHz) σε χρονική διάρκεια ενός TTI ή ενός subframe 1 ms ονομάζεται **Schedule Block (SB)** διότι αυτός είναι ο φυσικός πόρος τον οποίον ο MAC Scheduler αποδίδει σε χρήστες κάθε 1 ms. Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η δομή του πλέγματος χρόνου-συχνότητας [14].



**Σχήμα 2.4:** Δίκτυο LTE - δομή OFDM πλαισίου χρόνου-συχνότητας

Προχωρώντας την ανάλυση μας περαιτέρω στο πεδίο του χρόνου μπορούμε να αναφερθούμε αναλυτικότερα στην δομή ενός TTI. Πράγματι, αναλύοντας την δομή βλέπουμε ότι κάθε χρονοθυρίδα των 0,5 ms αποτελείται από περαιτέρω επτά **OFDM symbols** διάρκειας  $0,5 \text{ ms} / 7 = 71,5 \mu\text{s}$ , από τα οποία τα 66,7  $\mu\text{s}$  είναι πληροφορία χρήστη και τα υπολοιπούμενα  $71,5 \mu\text{s} - 66,7 \mu\text{s} = 4,8 \mu\text{s}$  είναι αυτό που ονομάζουμε cyclic prefix (CP). Αυτή η διάτμηση του χρόνου σε επτά χρονικά επίπεδα OFDM symbols χρειάζεται, όπως θα δούμε και παρακάτω, για την επεξήγηση της υλοποίησης της διαμόρφωσης OFDM στον πομπό [14]. Αυτή η αναλυτική δομή παρουσιάζεται στο σχήμα 2.5

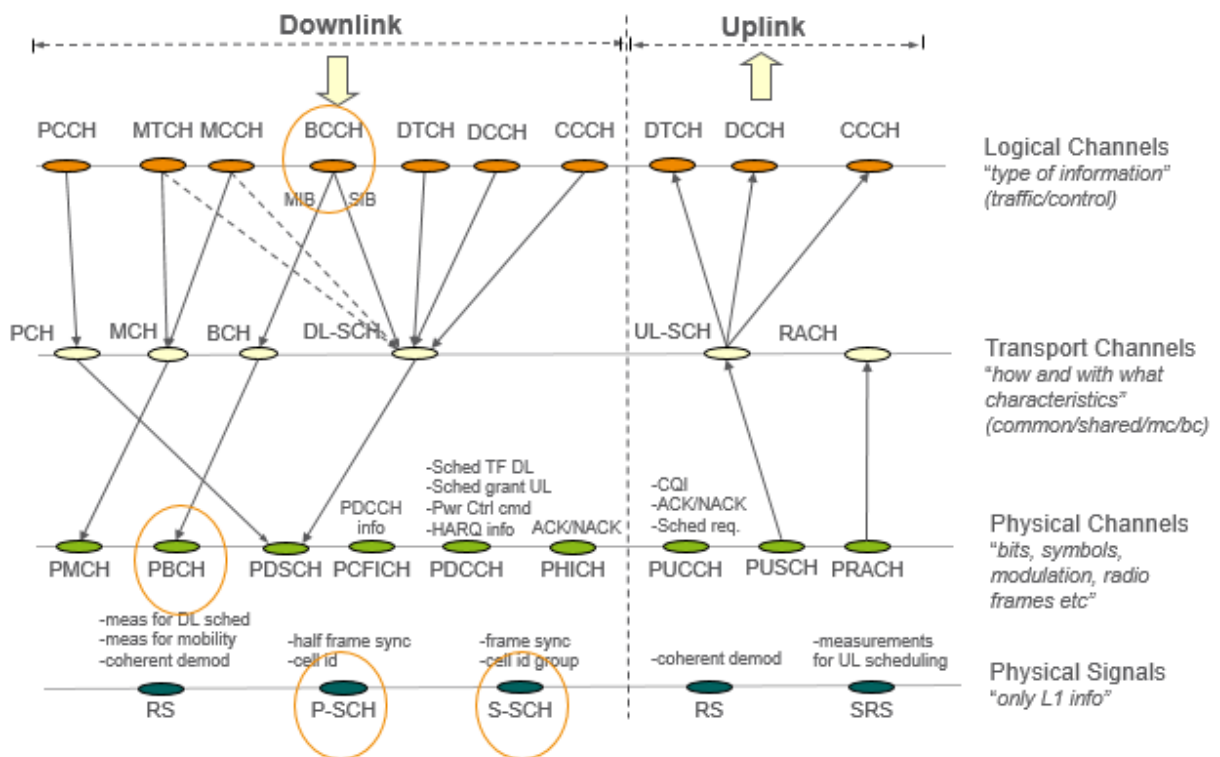


Σχήμα 2.5: Δίκτυο LTE - OFDM symbol στην διεπαφή αέρα

Η δομή ενός εκ των 12 sub-carriers, με εύρος φάσματος 15 KHz, απεικονισμένο σε χρονικό διάστημα 66,7  $\mu\text{s}$  ονομάζεται **Resource Element** και απεικονίζει την μονάδα της πληροφορίας (αριθμός από bits δεδομένων υπηρεσία χρήστη ή καναλιών σηματοδότησης) η οποία μπορεί να αποσταλεί στο πλαίσιο χρόνου-φάσματος της διεπαφής αέρα του LTE.

Τέλος, αναλύοντας το πεδίο του χρόνου στο πλέγμα χρόνου-συχνότητας χρειαζόμαστε να αυξήσουμε το χρονικό πλαίσιο αναφοράς από TTI = 1 ms στα 10 ms, ώστε να μπορέσουμε να εφαρμόσουμε χρονική πολυπλεξία (time multiplexing) του λογικού καναλιού εκπομπής πληροφοριών και παραμέτρων του κυττάρου Broadcast Control Channel (BCCH) και των φυσικών σημάτων συγχρονισμού στο φυσικό επίπεδο (downlink signals on physical layer) Primary & Secondary Synchronization Channels (P-SCH και S-SCH) κατά την μετάδοσή τους

στην κάτω ζεύξη ώστε να μπορεί η φορητή συσκευή του χρήστη να συγχρονίζεται στο χρονικό πλαίσιο του κυττάρου και να διαβάσει τις πληροφορίες του καναλιού BCCH, όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 2.6, [14]

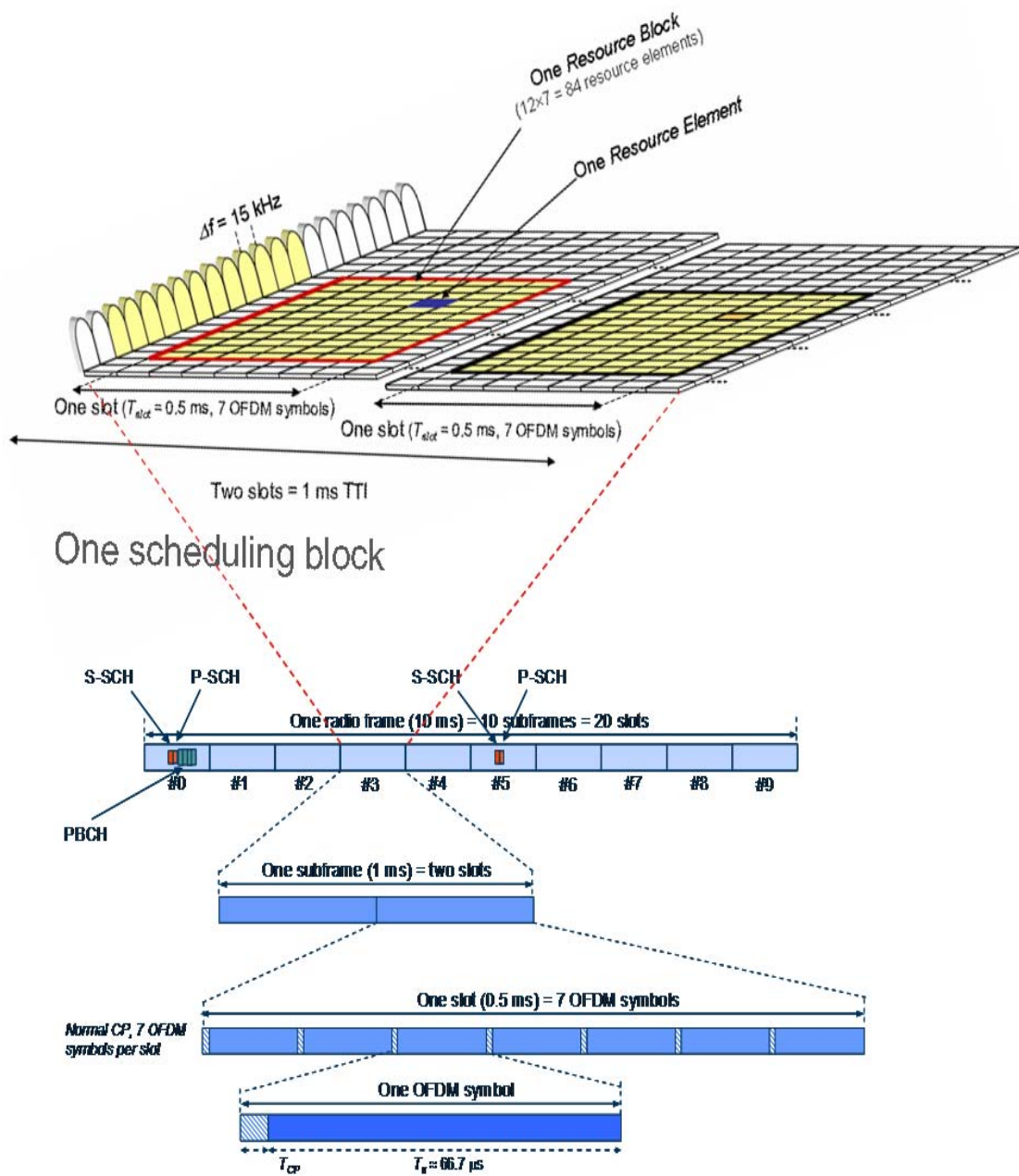


Σχήμα 2.6: Απεικόνιση λογικών καναλιών στο φυσικό επίπεδο

Δημιουργείται επομένως μία χρονική δομή, η οποία διαρκεί 10 ms και περιλαμβάνει ουσιαστικά δέκα συνεχόμενα sub-frames, η οποία και καλείται Radio Frame.

Σε ένα τέτοιο Radio Frame, στο subframe #0 αποστέλλουμε, σε συγκεκριμένο αριθμό από Resource blocks και OFDM symbols, το απεικονιζόμενο φυσικό κανάλι Physical Broadcast Channel (PBCH) καθώς και τα δύο physical signals P-SCH και S-SCH. Αντιστοίχως στο subframe #5 αποστέλλουμε, σε συγκεκριμένο αριθμό από Resource blocks και OFDM symbols, μόνο τα δύο physical signals P-SCH και S-SCH.





- PBCH sent in subframe #0, slot 1, symbol 0-3 over 4 consecutive radio frames (40 ms)
- SCH sent in subframe #0 and #5, slot 0 and 10, symbol 5-6 (4-5 in case of extended CP)

Σχήμα 2.7: LTE Radio Frame - δομή OFDM στο πεδίο του χρόνου

## 2.4 Η τεχνολογία LTE-TDD

Το LTE πρότυπο υποστηρίζει λειτουργία με δυο διαφορετικούς τρόπους για την επίτευξη αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ σταθμού βάσης και τερματικού, δηλαδή δομή πλαισίου χρόνου τύπου 1 (Frame Structure Type 1) και αντιστοίχως δομή πλαισίου χρόνου τύπου 2 (Frame Structure Type 2), [17].

Ο πρώτος τύπος ονομάζεται Διπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (Frequency Division Duplex, FDD) και συνίσταται στη χρήση ζεύγους καναλιών ίδιου εύρους άλλα διαφορετικών συχνοτήτων από τους πομπούς (και κατά συνέπεια και τους δέκτες) του σταθμού βάσης και του τερματικού, ώστε να επιτυγχάνεται η διαρκής αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ τους.

Ο δεύτερος τύπος ονομάζεται Διπλεξία Διαίρεσης Χρόνου (Time Division Duplex, TDD) και συνίσταται στη χρήση του ίδιου καναλιού από τους πομπούς (και κατά συνέπεια και τους δέκτες) σταθμού βάσης και τερματικού, όπου η αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ τους επιτυγχάνεται μέσω του χρονικού διαμοιρασμού αυτού του καναλιού για τις δύο κατευθύνσεις.

Τα δύο είδη του LTE που προκύπτουν, το LTE-FDD και το TD-LTE (TDD), διαφέρουν μόνο σε αυτό το σημείο του πρωτοκόλλου επικοινωνίας μεταξύ σταθμού βάσης και τερματικού και είναι όμοια από όλες τις άλλες απόψεις. Χρονικά το LTE-FDD χρησιμοποιήθηκε πρώτο στα αναπτυσσόμενα δίκτυα ανά τον κόσμο. Λόγω του ότι, ιστορικά, η τηλεπικοινωνιακή κίνηση πάνω από μικροκυματικά συστήματα ήταν μεταφορά υπηρεσιών τηλεφωνίας αμφιδρόμης συμμετρικής ταχύτητας, τα ασύρματα συστήματα, πρόσβασης και μεταφοράς, λειτουργούσαν παραδοσιακά σε σχήμα FDD, πράγμα που απεικονίζεται και στο τρόπο με τον οποίο οι ρυθμιστικοί οργανισμοί, όπως ο ITU-R, προδιέγραφαν τις διάφορες περιοχές χρήσης συχνοτήτων ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Frequency Bands).

Τα τελευταία χρόνια όμως τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το σχήμα TDD για μεταφορά της, ασύμμετρης (τύπου IP) ταχύτητας, ευζωνικής κίνησης έχουν σηματοδοτήσει την γρήγορη ανάπτυξη των συστημάτων αυτού του τύπου καθώς και την αντίστοιχη υποστήριξή τους από τις παγκόσμιες και κρατικές ρυθμιστικές αρχές και οργανισμούς προτυποποίησης. Το σχήμα λειτουργίας TDD [17] είναι προτιμητέο για τη μεταφορά **ασύμμετρης κίνησης πληροφορίας**, διότι παρουσιάζει το πλεονέκτημα του ευέλικτου διαμοιρασμού των πόρων του δίαυλου, ώστε η διαθέσιμη χωρητικότητα να προσαρμόζεται στη πραγματική κατανομή της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, από το δίκτυο προς τον συνδρομητή και αντιστρόφως. Η προσαρμογή της χωρητικότητας του καναλιού στη πραγματική αμφίδρομη κατανομή της τηλεπικοινωνιακής χωρητικότητας έχει ως αποτέλεσμα τον πιο αποτελεσματικό τρόπο χρήσης του πολύτιμου διαθέσιμου φάσματος.

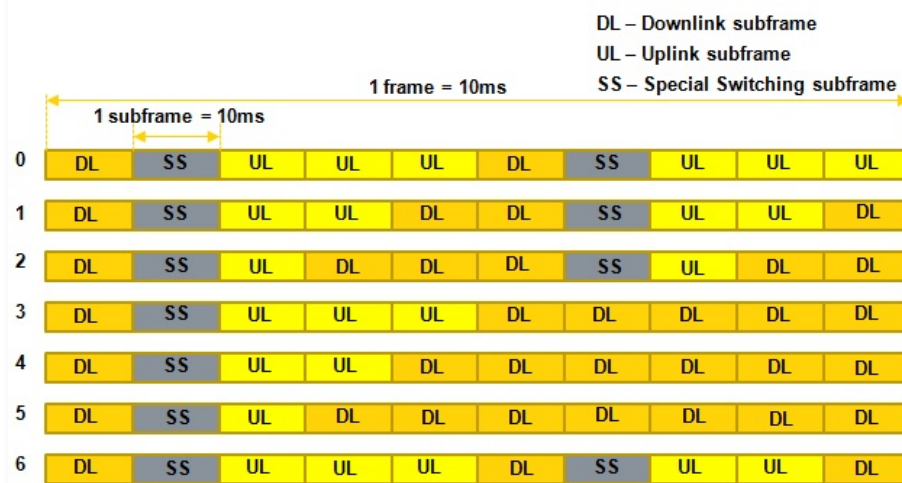
Ένα άλλο πλεονέκτημα του σχήματος TDD, ιδιαιτέρως για συστήματα ραδιοεπικοινωνιών χαμηλής κινητικότητας (ιδιότητα που χαρακτηρίζει τη χρήση ευρυζωνικών εφαρμογών multimedia και προφανώς και τα δίκτυα σταθερής πρόσβασης) είναι ότι τα χαρακτηριστικά μετάδοσης του δίαυλου είναι παρόμοια και για τις δύο κατευθύνσεις. Πράγματι, στις τεχνολογίες FDD το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε είναι η έλλειψη αμοιβαιότητα καναλιού (channel reciprocity). Η αμοιβαιότητα, ως ιδιότητα της χαρακτηριστικής απόκρισης του καναλιού μετάδοσης εμφανίζεται μόνον σε δίκτυα με στενό εύρος ζώνης λειτουργίας καναλιού (narrow-band channels) και χαμηλή συχνότητα λειτουργίας όπου θεωρούμε ότι η κρουστική απόκριση ή η συνάρτηση μεταφοράς του καναλιού έχουν επίπεδη σταθερή συμπεριφορά στο εύρος ζώνης λειτουργίας του δικτύου και στην άνωθεν (uplink) και κάτωθεν (downlink) ζεύξη. Σε άλλες περιπτώσεις πρέπει να υλοποιήσουμε τεχνικές εξίσωσης καναλιού (channel equalizing) οι οποίες επιβαρύνουν την πολυπλοκότητα του εξοπλισμού. Στην περίπτωση του δικτύου LTE-FDD και ιδιαίτερα στις υψηλές συχνότητες (συχνότητες άνω των 3 GHz) αυτή η αμοιβαιότητα δεν ισχύει και επομένως έχουμε διαφοροποιήσεις στις απώλειες καναλιού (differential channel path loss) δυσχεραίνοντας τον σχεδιασμό και την αποτελεσματική λειτουργία.

Στην περίπτωση του LTE-TDD και ιδιαίτερα στα περιβάλλοντα Rural σε υψηλές συχνότητες λειτουργίας με μικρή έως μηδενική κινητικότητα χρήστη, οι παράγοντες διαφοροποίησης της χαρακτηριστικής του καναλιού, κυρίως το multipath fading, έχουν μικρή συνεισφορά και επί της ουσίας δεν επηρεάζουν την χαρακτηριστική απόκριση του καναλιού στο εύρος των 20 MHz. Επομένως μοιράζοντας στην άνωθεν (uplink) και κάτωθεν (downlink) ζεύξη το εύρος ζώνης στον χρόνο (πολυπλεξία TDD) επιτυγχάνουμε την ομοιόμορφη απόδοση της υπηρεσίας.

Ως συνέπεια, οι τεχνικές βελτιστοποίησης της μεταφοράς πληροφορίας (σε συνδυασμό με τη χρήση έξυπνων κεραιών) λειτουργούν καλύτερα με το σχήμα TDD διότι και οι δύο πλευρές της επικοινωνίας (uplink/downlink) μπορούν να εκτιμήσουν ακριβέστερα και να ρυθμίσουν καλύτερα τις παραμέτρους του σήματος που εκπέμπουν.

Η δομή πλαισίου χρόνου τύπου 2 της τεχνολογίας LTE-TDD είναι βασισμένη στην ίδια διεπαφή E-UTRA LTE FDD αλλά διαφέρει ως προς την απόδοση των ράδιο-πόρων στην άνω ζεύξη (UL) και στην κάτω ζεύξη (DL). Η απόδοση των ράδιο-πόρων DL/UL δεν είναι ταυτόχρονη αλλά διακριτή σε διαφορετικές χρονικές στιγμές διάρκειας 1 ms (τα επονομαζόμενα και subframes) [17].

Η επιλογή των διαφορετικών συνδυασμών DL/UL ράδιο-πόρων σε ένα πλαίσιο (radio frame) των 10 ms είναι βασισμένο στα 3GPP standards [17]. Στο σχήμα 2.8 ακολουθεί μία περιγραφή των επτά (7) διαφορετικών συνδυασμών απόδοσης UL/DL ράδιο-πόρων (frame configuration).

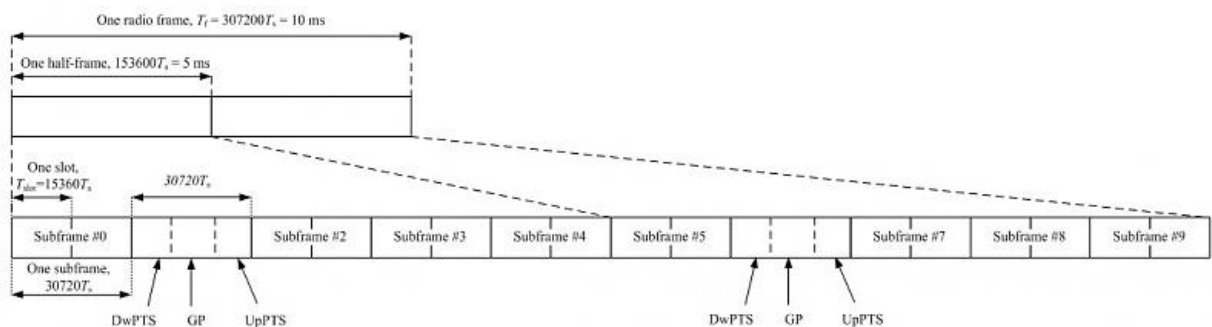


Σχήμα 2.8: LTE-TDD διάταξη πλαισίου χρόνου

Από τις διαφορετικά διατάξεις πλαισίου (frame configurations) ακολουθούν οι γενικές παρατηρήσεις:

1. Το πηλίκο DL/UL (Downlink / Uplink ratio) μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ DL/UL = 1/3 (Frame configuration = 0) έως DL/UL = 8/1 (Frame configuration = 5), το οποίο πηλίκο εξαρτάται από τις υπηρεσίες.
2. Τα πλαίσια πάντα εκκινούν με ένα downlink subframe, το οποίο χρησιμοποιείται για την διαδικασία της αποστολής του frame descriptor, PCFICH and PDCCH. Επομένως, το τερματικό UE λαμβάνει τις απαραίτητες πληροφορίες της δομής του πλαισίου σε αυτό το υπο-πλαίσιο (subframe).
3. Το τρίτο πλαίσιο πάντα είναι UL.
4. Κατά την εναλλαγή από DL σε UL υπάρχει πάντα ένα special switching subframe.
5. Δεν χρησιμοποιείται ποτέ special subframe κατά την μετάβαση από το uplink στο downlink.

Το special subframe βρίσκεται πάντα στο subframe1 και subframe 6. Κάθε ήμισυ-πλαίσιο (halfframe) διάρκειας 0.5ms μεταφέρει ένα special subframe το οποίο είναι χωρισμένο σε τρία μέρη, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.9 [17]:



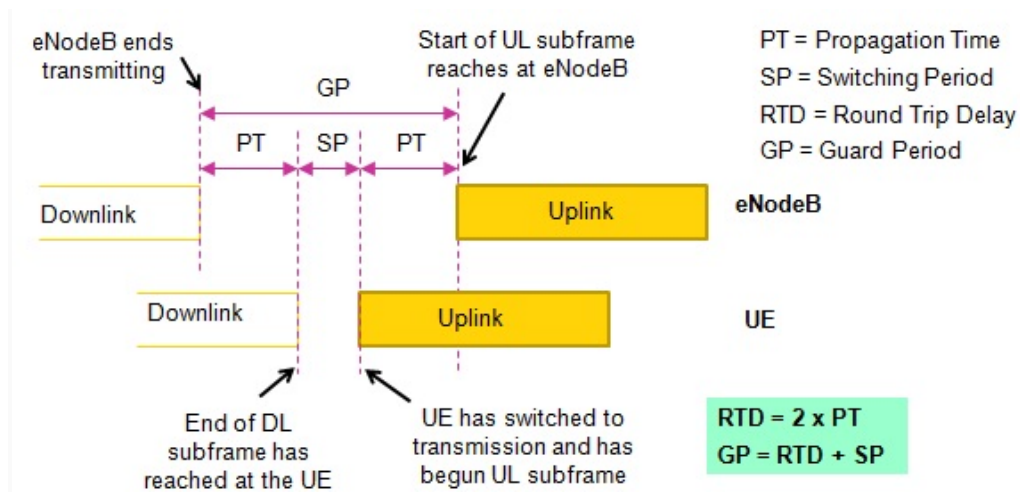
Σχήμα 2.9: LTE-TDD special sub-frame configuration

Τα μέρη αυτά είναι τα DwPTS (Downlink Pilot Time slot), GP and UpPTS (Uplink Pilot Time slot). Το χρονικό διάστημα (αριθμός OFDM συμβόλων) των τριών μερών του special subframe είναι μεταβλητό και μπορεί να ρυθμιστεί από τους χρήστες, σύμφωνα με την 3GPP στον ακόλουθο πίνακα 2.1 [17]:

**Πίνακας 2.1:** LTE-TDD Guard Band special sub-frame configurations

Format	Normal CP			Extended CP		
	DwPTS	GP	UpPTS	DwPTS	GP	UpPTS
0	3	10	1	3	8	1
1	9	4		8	3	
2	10	3		9	2	
3	11	2		10	1	
4	12	1		3	7	
5	3	9	2	8	2	2
6	9	3		9	1	
7	10	2		-	-	
8	11	1		-	-	

Συγκεκριμένα, η ύπαρξη του Guard period μεταξύ των DwPTS & UpPTS δίνει την δυνατότητα σχεδιασμού κυψελών διαφορετικών αποστάσεων ράδιο-κάλυψης (cell range) μέσω του υπολογισμού του Round Trip Delay (RTD), όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.10:



**Σχήμα 2.10:** LTE-TDD Guard Band RTD estimation

Η τεχνολογία LTE-TDD έχει συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων σύμφωνα με τα πρότυπα της 3GPP, πίνακας 2.2 [18]

**Πίνακας 2..2: LTE-TDD ζώνες συχνοτήτων προτύπου 3GPP**

TDD LTE BANDS & FREQUENCIES		
LTE BAND NUMBER	ALLOCATION (MHZ)	WIDTH OF BAND (MHZ)
33	1900 - 1920	20
34	2010 - 2025	15
35	1850 - 1910	60
36	1930 - 1990	60
37	1910 - 1930	20
38	2570 - 2620	50
39	1880 - 1920	40
40	2300 - 2400	100
41	2496 - 2690	194
42	3400 - 3600	200
43	3600 - 3800	200
44	703 - 803	100

Στις μετρήσεις που θα διεξάγουμε μας ενδιαφέρει η ζώνη συχνοτήτων 43, στη φασματική περιοχή 3.6 GHz (3.670 - 3.7 GHz) και 30 MHz στη φασματική περιοχή 3.8GHz (3.770 – 3.8 GHz) [19].

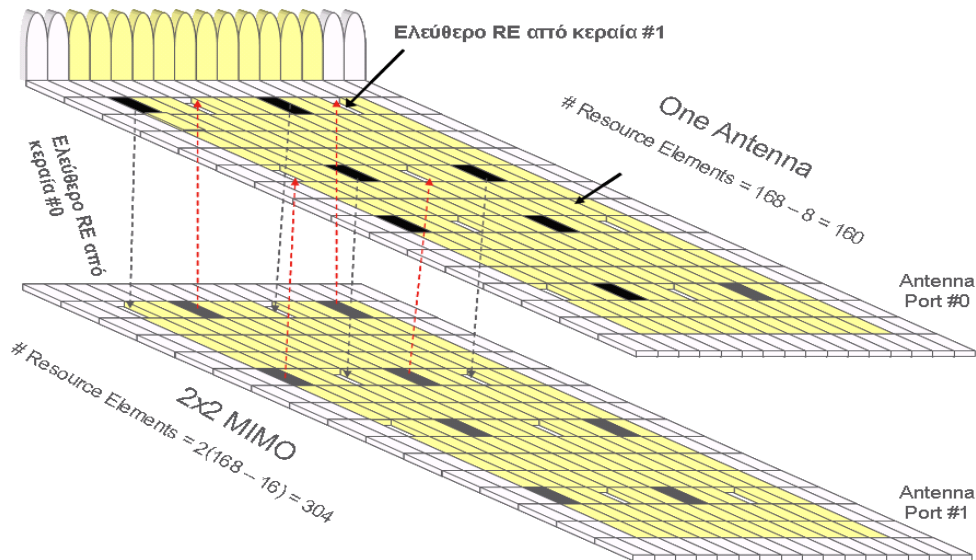
## 2.5 Βασικές μετρήσεις πιστοποίησης ράδιο-κάλυψης

Ακολουθώντας τα πρότυπα της 3GPP [20] υπάρχουν τέσσερις βασικές μετρήσεις οι οποίες ενδιαφέρουν και επηρεάζουν τον σχεδιασμό ράδιο-κάλυψης του δικτύου LTE. Ακολουθούν οι ορισμοί τους με μικρές τεχνικές επεξηγήσεις:

**Reference Signal Received Power (RSRP)**, ορίζεται ως η γραμμική ισοσταθμισμένη μέση τιμή της κατανομής της ισχύος (σε watts) των resource elements (RE) του OFDM πλαισίου χρόνου-συχνότητας (OFDM time-frequency grid) τα οποία μεταφέρουν τις χαρακτηριστικές ακολουθίες bits γνωστές και ως reference signals – RS ή αλλιώς “cell-specific reference signals - CSRS” [14].

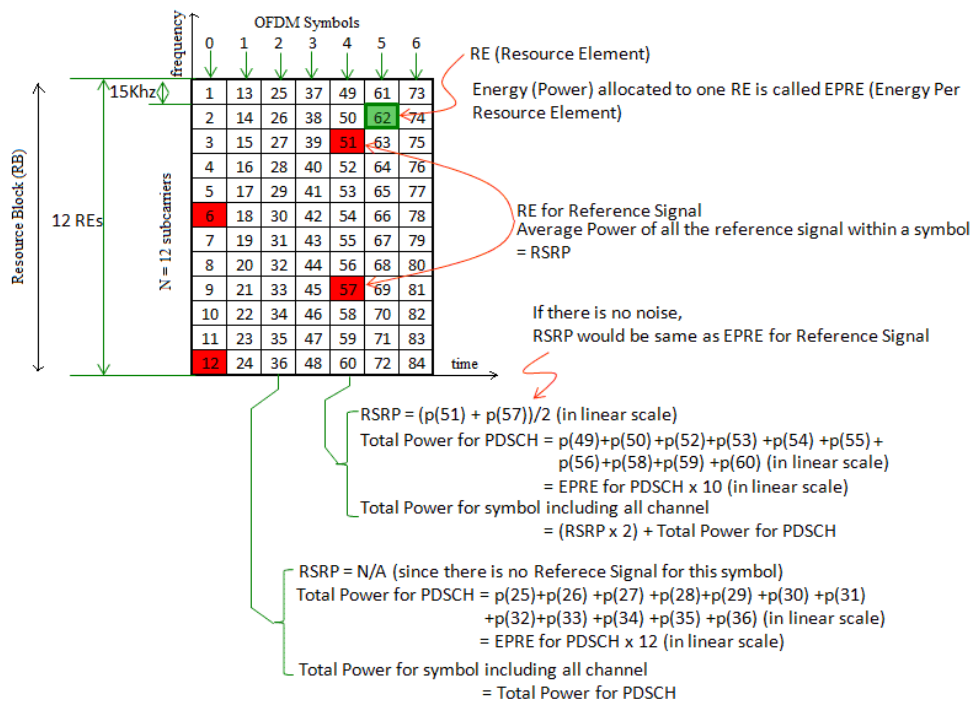
Τα σήματα αναφοράς στην κάτω ζεύξη αποτελούνται από τα αποκαλούμε-να σύμβολα αναφοράς (reference symbols) τα οποία είναι γνωστές ακολουθίες από σύμβολα τα οποία τοποθετούνται σε συγκεκριμένες θέσεις στο πλαίσιο χρόνου-συχνοτήτων του OFDM. Αυτά τα σήματα αναφοράς χρησιμοποιούνται από την φορητή συσκευή στην λήψη στην κάτω ζεύξη για τις διαδικασίες μέτρησης όντας σε σύνδεση (connected mode) μέτρηση ισχύος σήματος λήψης καθώς και ποιότητας επικοινωνίας RSRQ για ενεργοποίηση συγκεκριμένων λειτουργιών (radio feature triggering κτλπ), για μετρήσεις ισχύος και ποιότητας σε αδρανή κατάσταση (idle mode) προς λήψη αποφάσεων επιλογής κυττάρου (initial cell selection) και αλλαγής κυττάρου (cell reselection), για μετρήσεις και λήψεις αποφάσεων εκτέλεσης handovers (mobility

measurements), για διαδικασίες σύμφωνης αποδιαμόρφωσης της ληφθείσης πληροφορίας (coherent demodulation) και τέλος για την εκτίμηση της ποιότητας του καναλιού επικοινωνίας (Channel Quality Estimation). Αυτές οι ακολουθίες των CSRS είναι ακολουθίες gold με μήκος 31 bits οι οποίες δημιουργούνται από δύο ακολουθίες m-sequences [20]. Στο σχήμα 2.11 βλέπουμε την δομή και την απεικόνιση των σημάτων αναφοράς.



**Σχήμα 2.11** Απεικόνιση CSRS στο πλαίσιο χρόνου-συχνοτήτων της δομής OFDM

Στο σχήμα 2.12 αποτυπώνεται το σχήμα του πλαισίου χρόνου-συχνότητας (OFDM time-frequency grid) όπου απεικονίζουμε τα σημεία των REs (σημεία  $p(6)$ ,  $p(12)$ ,  $p(51)$ ,  $p(57)$  σχήματος 2.12) εντός του φασματικού περιεχομένου ενός Physical Resource Block PRB το οποίο απαρτίζεται από 12 υποφέρουσες (frequency bandwidth of  $N=12$  sub-carriers) με συνολικό φασματικό εύρος  $12 \times 15 \text{ kHz} = 180 \text{ kHz}$ .



Σχήμα 2.12: OFDM πλαίσιο χρόνου-συχνότητας (OFDM time - frequency grid)

Η μέτρηση RSRP [20] είναι η βασικότερη μέτρηση πιστοποίησης της ράδιο-κάλυψης στην κάτω ζεύξη (downlink).

**Received Signal Strength Indicator (RSSI)**, είναι μία μέτρηση η οποία προσδιορίζει την ευρυζωνική γραμμική μέση τιμή της συνολική ισχύ λήψης [20]. Η συνολική ισχύς λήψης ενός τομέα LTE (LTE sector) σημαίνει όλα τα σήματα λήψης τα οποία περιλαμβάνουν τα επιθυμητά σήματα εντός του συνολικού φάσματος του τομέα, καθώς και τα μη-επιθυμητά σήματα τα οποία προέρχονται από την στάθμη λήψης του θορύβου υποβάθρου (background noise), καθώς και από τις ανεπιθύμητες παρεμβολές γειτονικών τομέων.

Δηλαδή ισχύει ότι **RSSI = wideband power = θόρυβος + CSRS + παρεμβολή γειτονικού καναλιού**.

Η μέτρηση της στάθμης λήψης RSSI του πλαισίου χρόνου-συχνότητας (OFDM time-frequency grid) σε έναν τομέα με φασματικό εύρος 20MHz, επιτελείται σε έναν αριθμό από Physical Resource Blocks PRB = NRB =  $(20 \text{ MHz}/180 \text{ KHz}) - 10\% (20 \text{ MHz}/180 \text{ KHz}) \text{ guard band} = 100$  Physical Resource Blocks PRB's, και κάθε PRB περιέχει  $12 \times 7 = 84$  δομικά μέρη RE's, άρα επί συνόλω  $100 \times 84 = 8400$  μετρήσεις οι οποίες συμβάλουν στην μέση τιμή της στάθμης λήψης RSSI.

Βάσει του σχήματος 2.12, η εξαγωγή της μέτρησης της στάθμης λήψης RSSI επιτελείται στα δομικά μέρη Resource Elements (σημεία  $p(1), \dots, p(84)$ ) και επεκτείνεται στον συνολικό



φασματικό εύρος των NRB = 100 PRB's για τομέα με φάσμα λειτουργίας 20 MHz (cell bandwidth).

Παρατήρηση: Η μέτρηση RSSI είναι βοηθητική, ώστε να έχουμε μία εκτίμηση της συνολικής ισχύος λήψης, συνεκτιμώντας και την αναμενόμενη παρεμβολή.

**Reference Signal Received Quality (RSRQ)** ορίζεται ως το πηλίκο της μέτρησης RSRP προς την μέτρηση RSSI επαυξημένο με τον πολλαπλασιαστικό συντελεστή NRB ο οποίος προσδιορίζεται από το φασματικό εύρος του τομέα εξυπηρέτησης [20].

$$\mathbf{RSRQ = NRB * (RSRP / RSSI)}$$

Παραδείγματος χάριν για έναν τομέα με φασματικό εύρος 20 MHz έχουμε NRB = (20 MHz/180 KHz) – 10% (20 MHz/180 KHz) guard band = 100 Physical Resource Blocks PRB's, άρα: **RSRQ = 100 \* (RSRP / RSSI)**.

Η μέτρηση RSRQ είναι επίσης μία εκ των βασικών μετρήσεων με την οποία πιστοποιείται η ποιότητα της ράδιο-κάλυψης, καθώς η φορητή συσκευή του χρήστη χρησιμοποιεί τις τιμές μέτρησης RSRQ μαζί με τις αντίστοιχες RSRP για να εκτελέσει διαδικασίες επιλογής κυψέλης (cell selection).

**RS-Signal to Interference and Noise Ratio (RS-SINR)** είναι μία μέτρηση η οποία ορίζεται ως το πηλίκο της στάθμης λήψης του σήματος (received signal S) των σημάτων αναφοράς (CSRS) στον δέκτη προς τα ανεπιθύμητα σήματα παρεμβολής (interference I) και θερμικού θορύβου περιβάλλοντος (thermal Noise floor Nt) για συνδεδεμένους χρήστες (χρήστες οι οποίοι εξυπηρετούνται από το δίκτυο με κάποια υπηρεσία), [20]

$$\mathbf{SINR = S / (I + Nt)}$$

Είναι μία ποσότητα η οποία προσδιορίζει την ποιότητα επικοινωνίας στην περίπτωση ενός χρήστη ο οποίος εξυπηρετείται από το δίκτυο με κάποια υπηρεσία και χρησιμεύει:

- Στην απόφαση του MAC scheduler για απόδοση ράδιο-πόρων κατά την διάρκεια της υπηρεσίας του χρήστη.
- Στην απόδοση καταλλήλων τιμών κωδικοποίησης καναλιού καθώς και διαμόρφωσης (Modulation & Coding scheme).

Επομένως, η ποσότητα SINR είναι πάρα πολύ σημαντική, καθώς επηρεάζει την ρυθμαπόδοση (throughput) του χρήστη στην συγκεκριμένη γεωγραφική θέση και τη διακριτική ικανότητα διόρθωσης σφαλμάτων και απόδοσης του δέκτη.

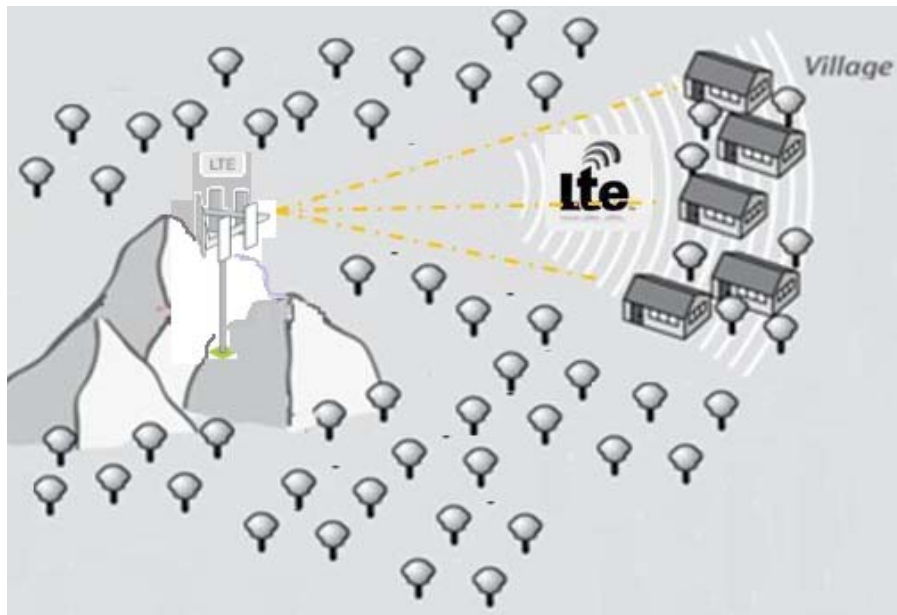
Οι κατασκευαστές του εξοπλισμού του χρήστη δεν δίνουν τιμές SINR, αλλά προσδιορίζουν μία άλλη ποσότητα η οποία καλείται ευαισθησία δέκτη (Receiver) ή Reference Sensitivity Power Level (REFSENS), σύμφωνα με τις προδιαγραφές της 3GPP [18].

# Κεφάλαιο 3

## Παρουσίαση Τεχνολογίας Δικτύου Μέτρησης

### 3.1 Εισαγωγή

Η υλοποίηση της αρχιτεκτονικής ενός δικτύου παροχής υπηρεσιών δεδομένων (data IP services), ιδιαιτέρως σε ένα περιβάλλον αγροτικής ράδιο-κάλυψης (Rural) όπου η δυσμορφία και το ορεινό στοιχείο του γεωγραφικού αναγλύφου κυριαρχεί κατά κόρον, απαιτεί τεχνικές λύσεις οι οποίες να λύνουν τις τεχνικές προκλήσεις που σχετίζονται με το προφίλ οικισμών δύσκολων και δύσβατων περιοχών παρέμβασης. Η 3GPP έχει θεσμοθετήσει τις τεχνικές προδιαγραφές του δικτύου LTE, με ιδιαίτερη έμφαση στην τεχνολογία LTE-TDD σε υψηλότερες συχνότητες από τις συνήθεις, ώστε να έχουμε καθαρότερο από παρεμβολές ράδιο-περιβάλλον, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1:



**Σχήμα 3.1:** Δικτυακή υποδομή ράδιο-κάλυψης δύσβατων αγροτικών (Rural) περιοχών

Εν γένει και εν συντομία αξίζει να αναφερθεί ότι το δίκτυο LTE τέταρτης γενιάς (4G) κινητών ευρυζωνικών δικτύων, και ιδιαίτερα η ασύμμετρη τεχνολογία πολυπλεξίας TDD σε μη-συμβατικές συχνότητες λειτουργίας, όπως έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 2, αποτελείται από ένα σύνολο τεχνολογιών αιχμής που διατυπώνονται ως παγκόσμια πρότυπα (standards) από το διεθνή οργανισμό 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Αποτελεί δε, λόγω της σχεδόν ολοκληρωτικής αποδοχής του από τις εταιρίες δικτύων κινητής τηλεφωνίας, την *de facto* προτιμητέα τεχνολογία για την ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση (wireless Broad-band) σε ελεύθερες (και κατ' επέκτασιν ευκόλως αδειοδοτούμενες από την ΕΕΤΤ) φασματικές περιοχές. Τα προηγμένα τεχνικά χαρακτηριστικά της αρχιτεκτονικής, αλλά και των τεχνολογιών του δικτύου LTE καθώς και η ευρεία αποδοχή του παγκοσμίως, το καθιστούν ιδανικό για ανάπτυξη όχι μόνο κινητών ευρυζωνικών δικτύων, αλλά και **ευρυζωνικών δικτύων σταθερής πρόσβασης (wireless Fixed Broadband services)**. Το LTE μπορεί να συνδυαστεί με τα σύγχρονα και τα μελλοντικά ενσύρματα και ασύρματα συστήματα για τη δημιουργία ολοκληρωμένων δικτύων σταθερής ευρυζωνικής πρόσβασης.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του LTE, τα οποία το καθιστούν κατάλληλο για την χρήση του σε δίκτυα σταθερής πρόσβασης μπορούν να συνοψιστούν στα παρακάτω:

➤ **Μεγάλη Αποδοτικότητα και Χωρητικότητα**

Το δίκτυο LTE ενσωματώνει και αξιοποιεί όλες τις τεχνολογίες αιχμής ράδιο-πρόσβασης, ώστε να μπορεί να παρέχει αξιόπιστες ζεύξεις με ταχύτητες μεγαλύτερες των 100Mbps στον τελικό χρήστη (η τεχνολογία LTE-A μπορεί να προσφέρει έως και 600 Mbps).

Με τη χρήση τεχνικών διαμόρφωσης και κωδικοποίησης σήματος υψηλής απόδοσης (Modulation schemes 64-QAM, 16-QAM, QPSK with Turbo coding), αλλά και συστημάτων έξυπνων κεραιών πολλαπλών στοιχείων (τεχνολογία Spatial Multiplexing – MIMO 2x2, 4x4, 8x8), επιτυγχάνεται η μέγιστη αποδοτικότητα (χωρητικότητα καναλιού κοντά στο όριο του Shannon) στη μετάδοση πληροφορίας για δεδομένο εύρος καναλιού συχνοτήτων. Το αποτέλεσμα είναι ότι το LTE, με χρήση συστήματος έξυπνων κεραιών με 4 ή 8 στοιχείων ανά τομέα, μπορεί να παρέχει χωρητικότητες τομέα σταθμού βάσης μέχρι 300 Mbps ή 600 Mbps σε κανάλι εύρους 20MHz.

Επιπλέον το LTE-Advanced, που αποτελεί το πρώτο βήμα - ήδη σε στάδιο εμπορικής υλοποίησης - στην εξέλιξη του προτύπου LTE, επιτρέπει την χρήση έως και 5 καναλιών/φερόντων (τεχνολογία carrier aggregation), το κάθε ένα μέχρι 20MHz, σε ισοδύναμο κανάλι συνολικού εύρους μέχρι 100MHz. Με τη χρήση έξυπνων κεραιών με 8 στοιχεία επιτυγχάνει θεωρητικές τιμές χωρητικότητας τομέα άνω των 1 Gbps.

Οι προαναφερόμενες επιδόσεις επιτρέπουν στο LTE να βρίσκεται στο ίδιο η καλύτερο επίπεδο με πολλές ενσύρματες τεχνολογίες πρόσβασης.

#### ➤ **Καθυστέρηση Μετάδοσης (Latency)**

Η καθυστέρηση στη μετάδοση – οριζόμενη ως ο χρόνος που απαιτείται σε ένα IP πακέτο πληροφορίας να διασχίσει το δίκτυο από άκρη-σε-άκρη (end-to-end) που επιτυγχάνει το LTE είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη σε υπάρχουσες τεχνολογίες 3G. Αυτό είναι κυρίως αποτέλεσμα του εξελιγμένου MAC πρωτοκόλλου διεπαφής δια μέσω του αέρα με προσαρμοσμένη λειτουργικότητα enhanced HARQ-Link και πολυπλεξίας (multiplexing), αλλά και του μικρού αριθμού δικτυακών κόμβων, του δικτύου κορμού του LTE, που χρειάζεται να διασχίσει το σήμα του χρήστη.

Επιδόσεις καθυστέρησης κάτω των 50ms δίνουν τη δυνατότητα για την παροχή χρόνο-ευαίσθητων υπηρεσιών υψηλής ποιότητας, που κυμαίνονται από τηλεφωνία μέχρι διαδραστικές εφαρμογές (delay sensitive high quality services όπως VoIP, Video streaming κτλ.).

#### ➤ **Υποστήριξη Internet Protocol (IP) Αρχιτεκτονικής από Άκρη-σε-Άκρη του Δικτύου**

Το LTE βασίζεται στο IP πρωτόκολλο από τον κορμού του δικτύου μέχρι τον τελικό χρήστη. Είναι μια τεχνολογία που έχει σχεδιαστεί εκ βάθρων με στόχο την Σύγκλιση Σταθερών και Κινητών υπηρεσιών και δικτύων, δηλαδή Fixed Mobile Wireless Broadband Convergence (FMWBC).

Το πρότυπο του LTE έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι συμβατό με όλες τις υπάρχουσες δικτυακές τεχνολογίες μεταφοράς, αλλά και πρόσβασης που βασίζονται στο IP πρωτόκολλο, συμπεριλαμβανομένων ενσύρματων συστημάτων (IP/Ethernet, MPLS, XDSL etc), καθώς και ασύρματων, όπως π.χ. το WiFi. Συνεπώς το LTE μπορεί να συνδυαστεί με απλό και αποδοτικό τρόπο με ήδη υπάρχοντα αλλά και μελλοντικά δίκτυα πρόσβασης και υπηρεσιών, ασύρματα και ενσύρματα.

➤ **Διασφάλιση Ποιότητας Πληροφορίας για Διαφοροποιημένες Υπηρεσίες**

Το LTE αποτελεί ένα μεγάλο άλμα στον τομέα της διασφάλισης ποιότητας (Quality of Service (QoS)) των υποστηριζόμενων ευρυζωνικών υπηρεσιών. Διαθέτει ένα εκτεταμένο και λεπτομερές πλαίσιο διασφάλισης της ποιότητας πληροφορίας ώστε να μπορεί να υποστηρίξει αποτελεσματικά τη μεταφορά των πολλών και διαφοροποιημένων IP-υπηρεσιών όπως: Data, Internet, τηλεφωνία VoIP, τηλεφωνία VoIP υψηλής ποιότητας (HD Voice), Steaming Audio, Streaming Video, Multimedia, Gaming, εξασφαλίζοντας τη Ποιότητα της Εμπειρίας (Quality of Experience) για τον τελικό χρήστη.

Το πρότυπο LTE υποστηρίζει υποχρεωτικά 9 διακριτές κλάσεις υπηρεσιών (Quality class Identifiers - QCI), οι οποίες ορίζονται στην βάση δεδομένων PCRF του δικτύου και κοινοποιούνται στο ράδιο-δίκτυο (eNodeB) μέσω σηματοδοσίας διαμέσου της διεπαφής S1 κάθε φορά που θα ενεργοποιηθεί μία υπηρεσία (E-RAB setup). Χαρακτηρίζονται από, αναλυτικά καθορισμένες και προσαρμοσμένες σε κάθε τύπο υπηρεσίας, παραμέτρους (ονομάζονται bearer attributes) που καθορίζουν την προτεραιότητα (scheduling Priority), την εξασφαλισμένη και μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα/χωρητικότητα (Guaranteed Bit rate – Maximum bit rate), την καθυστέρηση μετάδοσης (latency) και τα μέγιστα επιτρεπτά ποσοστά σφαλμάτων μετάδοσης των πακέτων πληροφορίας Signaling Data Unit BLER (SDU BLER) της κάθε υπηρεσίας.

Η ποιότητα της κάθε υπηρεσίας, από τη στιγμή της ενεργοποίησής της έως τη λήξη της παροχής της, διασφαλίζεται αποτελεσματικά επί τη βάσει των καθορισμένων παραμέτρων ποιότητας που εφαρμόζονται σε όλα τα στοιχεία του LTE δικτύου (Τερματικό, Σταθμό Βάσης, Στοιχεία Δικτύου κορμού) και σε όλες τις διεπαφές. Αποτελεί δε και δεδομένα εισόδου στις διαδικασίες ελέγχου πρόσβασης (Admission Control) και ελέγχου συμφόρησης (Congestion Control) για την εύρυθμη και ορθή λειτουργία του δικτύου παρουσία αυξομειώσεων της χωρητικότητας.

## 3.2 Περιγραφή τεχνολογίας δικτύου μέτρησης LTE-TDD

Οι περιοχές φάσματος 3,4 – 3,6 GHz (Band 42) και 3,6 – 3,8GHz (Band 43), είναι επισήμως ορισθείσες από το 3GPP φασματικές περιοχές για τη λειτουργία εξοπλισμού σε σχήμα TD-LTE. Τα 400MHz φάσματος που υπάρχει σε αυτές τις περιοχές συχνοτήτων έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε όλο το κόσμο για υπηρεσίες σταθερής ασύρματης ευζωνικής πρόσβασης.

**Πίνακας 3.1:** Αποδιδόμενο κατά 3GPP Ράδιο Φάσμα τεχνολογίας LTE-TDD

Band	"Identifier"	Frequencies [MHz]	1.4	3	5	10	15	20
33	TDD 2000	1900 – 1920			•	•	•	•
34	TDD 2000	2010 – 2025			•	•	•	
35	TDD 1900	1850 – 1910	•	•	•	•	•	•
36	TDD 1900	1930 – 1990	•	•	•	•	•	•
37	PCS Center Gap	1910 – 1930			•	•	•	•
38	IMT Extension Center Gap	2570 – 2620			•	•	•	•
39	China TDD	1880 – 1920			•	•	•	•
40	2.3 TDD	2300 – 2400			•	•	•	•
41	US 2600	2496 - 2690			•	•	•	•
42	3500	3400 - 3600			•	•	•	•
43	3700	3600 – 3800			•	•	•	•
44	APT700 LTE	698 - 806		•	•	•	•	•

Η διαστρωμάτωση των πρωτοκόλλων λειτουργίας του δικτύου LTE μεταξύ Σταθμού Βάσης και Τερματικού έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτρέπει την ταυτόχρονη πρόσβαση πολλαπλών χρηστών σε μεγάλες αποστάσεις (άνω των 30 km) εφ' όσον αυτό επιτρέπεται από το γεωγραφικό ανάγλυφο, την χωρητικότητα της κυψέλης, τις συνθήκες του ράδιο-διαύλου αλλά και της συχνότητας λειτουργίας του.

Στον σχεδιασμό του δικτύου Rural επιλέχθηκαν τεχνικές αναβαθμισμένες λύσεις της τεχνολογίας LTE-TDD όπως:

- χρήση συστημάτων έξυπνων κεραιών πολλαπλών στοιχείων και προηγμένων συστημάτων ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (τεχνολογία Multiple Antennas - spatial multiplexing με εφαρμογές MIMO, Tx/Rx diversity, beamforming, massive MIMO),
- χρήση τερματικών εξωτερικού τύπου (τα οποία ονομάζονται στην διεθνή βιβλιογραφία, αλλά και στα εγχειρίδια προτύπων ως Customer Premise Equipment - CPE)
- κεραιές μεγάλης κατευθυντικότητας (antenna directivity με beamwidth 60°) οι οποίες προσφέρουν το πλεονέκτημα της εστίασης της ισχύος ακτινοβολίας σε μικρές γεωγραφικές περιοχές προσφέροντας μεγάλο κέρδος (antenna gain) στην ανάλυση του προϋπολογισμού ισχύος (link budget) της ζεύξης, ελαττώνοντας ταυτόχρονα και τις

παρεμβολές στα γειτονικά κύτταρα και στα αλληλοκαλυπτόμενα γεωγραφικά μέρη της ράδιο-κάλυψης

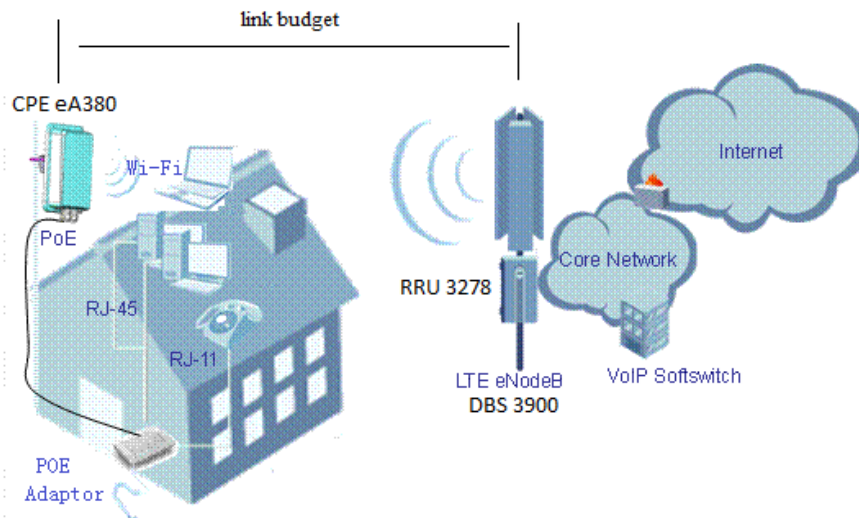
- υψηλές ταχύτητες ζεύξης (της τάξεως των 50 – 100 Mbps) σε περιβάλλον ράδιο-διάδοσης LoS και μέγιστες αποστάσεις των 30 km, λειτουργώντας στις σχετικά υψηλές συχνότητες εντός της φασματικής περιοχής των 3,6-3,8GHz.

Ήδη το οικοσύστημα των κατασκευαστών τεχνολογίας LTE (π.χ. Huawei, Ericsson κτλ.) υποστηρίζει εξοπλισμό TD-LTE στα 3,6-3,8GHz, συμπεριλαμβανομένου του εξοπλισμού των σταθμών βάσης και τερματικών συσκευών λήψης.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα εκτελεστούν μετρήσεις ράδιο-κάλυψης (RSRP & RSRQ, SINR) στις ζώνες συχνοτήτων των 3,6 GHz – 3,8 GHz με εξοπλισμό της εταιρείας Huawei.

Συγκεκριμένα το δίκτυο αποτελείται από:

- τον σταθμό βάσης τεχνολογίας LTE-TDD της κατασκευάστριας εταιρείας Huawei DBS3900,
- το κεραίο-σύστημα RRU3278 με κεραίες τεχνολογίας 4x4
- τον εξοπλισμό λήψης του χρήστη Customer Premise Equipment CPE-eA380, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2:



**Σχήμα 3.2:** Παρουσίαση αρχιτεκτονικής δικτύου μετρήσεων τεχνολογίας Huawei

Ακολουθεί μία λεπτομερής τεχνική παρουσίαση των χαρακτηριστικών λειτουργίας του εξοπλισμού ράδιο-κάλυψης Huawei, βασισμένη στην περιγραφή του εξοπλισμού που υπάρχει στα τεχνικά εγχειρίδια της εταιρείας.

### ➤ Εξοπλισμός πελάτη



Η εταιρεία Huawei προσφέρει τον εξοπλισμό CPE-eA380, συμβατό με τα διεθνή πρότυπα της 3GPP και τις ακόλουθες τεχνικές προδιαγραφές [21]. Ο εξοπλισμός του πελάτη CPE eA380 λειτουργεί στο εύρος συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει, δηλαδή στα 3,6 GHz – 3,8 GHz, και έχει ισχύ εκπομπής λειτουργίας στα 23 dBm. Ακολουθεί στον πίνακα 3.2 ο συνολικός πίνακας των τεχνικών χαρακτηριστικών του εξοπλισμού του πελάτη

**Πίνακας 3.2:** Τεχνικά χαρακτηριστικά εξοπλισμού πελάτη CPE eA360 - Huawei

Category		Description
Technical standards		WAN: LTE 3GPP Release 11
		LAN: IEEE 802.3/802.3u
		WLAN: IEEE 802.11b/g/n
Working frequency band	LTE	eA380-123: LTE TDD (2570 MHz to 2620 MHz) LTE TDD (2300 MHz to 2400 MHz) LTE TDD (2496 MHz to 2690 MHz) LTE FDD (2500 MHz to 2570 MHz(UL)/ 2620 MHz to 2690 MHz(DL)) eA380-135: LTE TDD (3400 MHz to 3600 MHz) LTE TDD (3600 MHz to 3800 MHz)  NOTE eA380-123 cannot be delivered currently. To learn the actual delivery time, contact the corresponding MO representatives.
	WLAN	2.400 GHz ~ 2.4835 GHz
External interface	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 Ethernet and voice interface (RJ45): 10/100/1000Base-TX Ethernet, POE combined</li> <li>• 1 USB interface(for local maintenance only)</li> <li>• 1 SIM card slot</li> </ul>	
LED indicator	<ul style="list-style-type: none"> <li>• One POWER indicator</li> <li>• One LAN indicator</li> <li>• Three LTE signal strength indicators</li> </ul>	
Maximum transmit power	LTE	• 23 dBm (±2)
	WLAN	• 16dBm(±2 dB)
Category		Description
Receiving sensitivity	LTE	B42/43: <ul style="list-style-type: none"> <li>• &lt; -99 dBm/5 MHz</li> <li>• &lt; -96 dBm/10 MHz</li> <li>• &lt; -93 dBm/20 MHz</li> <li>• &lt; -94 dBm/20 MHz</li> </ul>

Η δε ευαισθησία δέκτη, όπως έχει παρουσιαστεί στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο της εργασίας, 2.5, κυμαίνεται στο εύρος [-99 dBm,..., -94 dBm] καθώς εξαρτάται από το εύρος φάσματος λειτουργίας

Ακολουθούν στον πίνακα 3.3 οι τεχνικές προδιαγραφές της κεραίας του εξοπλισμού του πελάτη CPE (antenna CPE specifications)

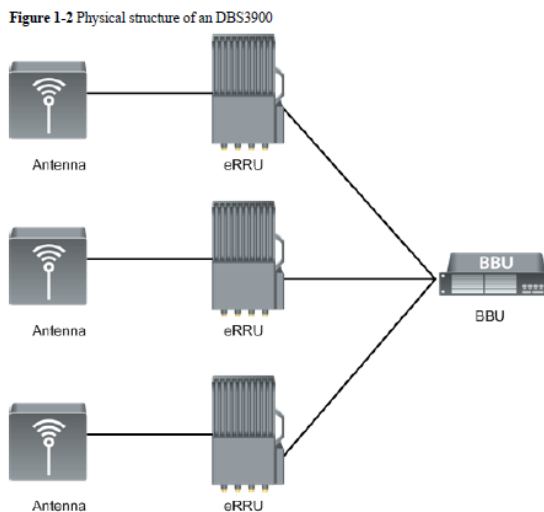
**Πίνακας 3.3:** Τεχνικά χαρακτηριστικά κεραίας εξοπλισμού πελάτη CPE της Huawei

Item	eA380-123	eA380-135
Band	2300 to 2400 MHz (Band 40) 2570 to 2620 MHz (Band 38) 2496 to 2690 MHz (Band 41) 2500 to 2570 MHz (Band 7 UL) 2620 to 2690 MHz (Band 7 DL)	3400 to 3600 MHz (Band 42) 3600 to 3800 MHz (Band 43)
Gain	10 ± 1 dBi	13 ± 1 dBi
Input impedance	50 ohm	
SWR	< 2	
Polarization	Dual cross polarization	
Radiation pattern	Directional antenna	



### ➤ Εξοπλισμός σταθμού βάσης

Η εταιρία Huawei προσφέρει μία λύση κατακεντρωμένου ραδιο-δικτύου (Distributed RAN), γνωστή ως DBS3900, με ξεχωριστές μονάδες βασικής ζώνης (baseband unit - BBU), κατακεντρωμένο RF ραδιο- εξοπλισμό (Remote Radio Unit - RRU) και κεραία 4x4 ή 8x8, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.3 [22].



**Σχήμα 3.3:** Εξοπλισμός σταθμού βάσης τεχνολογίας Huawei

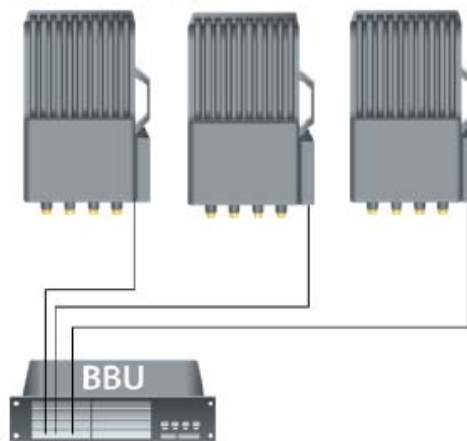
Τυπικές προδιαγραφές της σειράς εξοπλισμού DBS 3900 παρουσιάζονται στον πίνακα 3.4 για την τεχνολογία TDD.

**Πίνακας 3.4:** Τυπικές τεχνικές προδιαγραφές εξοπλισμού DBS 3900

Item	Specifications
Maximum number of cells that a single DBS3900 supports	12 (20M 8T8R/4T4R/2T2R/1T1R, 10M 8T8R/4T4R/2T2R/1T1R, 5M 4T4R/2T2R/1T1R, or 3M 2T2R/1T1R)
Maximum number of users that a single DBS3900 supports	3600
Maximum number of voice groups that a single DBS3900 supports	320 (It equals to the total number of all voice groups that a single DBS3900 supports.)
Maximum number of video multicast that a single DBS3900 supports	1
Maximum number of cells supported by a single <b>LBBPd4</b>	3 (20M 8T8R/4T4R/2T2R/1T1R, 10M 8T8R/4T4R/2T2R/1T1R, 5M 4T4R/2T2R/1T1R, or 3M 2T2R/1T1R)

Η μονάδα βασικής ζώνης (baseband unit BBU) αποτελείται από ένα πλαίσιο με διάφορες κάρτες λειτουργίας του δικτύου, όπως η κάρτα LBBPd4 η οποία διασυνδέει τις RF μονάδες RRU, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.4.

**Figure 1-4** Star topology



**Σχήμα 3.4:** BBU –RRU δια-συνδεσιμότητα

Η μονάδα ράδιο-εξοπλισμού RRU3278 του σταθμού βάσης eNodeB DBS3900 έχει τα κάτωθι τεχνικά χαρακτηριστικά, πίνακας 3.5

### Ισχύς εκπομπής ράδιο-εξοπλισμού RRU3278 προς κεραία 4x4:

**Πίνακας 3.5** Ισχύς εκπομπής ράδιο-εξοπλισμού RRU3278 ανά θύρα εξόδου ενισχυτή

Configuration Scenario (Total Number of Carriers)	PA1		PA2		PA3		PA4	
	Number of LTE TDD Carriers	Output Power per LTE TDD Carrier (W)	Number of LTE TDD Carriers	Output Power per LTE TDD Carrier (W)	Number of LTE TDD Carriers	Output Power per LTE TDD Carrier (W)	Number of LTE TDD Carriers	Output Power per LTE TDD Carrier (W)
LTE TDD 1 (MIMO) 2T2R	1	10	1	10	0	0	0	0
LTE TDD 2 (MIMO) 2T2R	1	10	1	10	1	10	1	10
LTE TDD 1 (MIMO) 4T4R	1	10	1	10	1	10	1	10
LTE TDD 2 (MIMO) 4T4R	2	5	2	5	2	5	2	5

Όπου για τις μετρήσεις μας επιλέγουμε τον συνδυασμό MIMO 4x4 με ένα φέρον (δεν έχουμε carrier aggregation). Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζεται η ισχύς εκπομπής της 4x4 κεραίας ανά πόρτα στις στήλες PA1, PA2, PA3, PA4 όπου PA σημαίνει power amplifier στην έξοδο της μονάδος RRU. Η ισχύς εκπομπής κάθε ενισχυτή εισόδου είναι στα 10 W και η μονάδα RRU υποστηρίζει επί συνόλω 40 W.

#### Ευαισθησία δέκτη:

Η τεχνολογία RRU3278 της Huawei είναι συμβατή με το πρότυπο της 3GPP TS36.141, όπου αναφέρεται ρητώς η ευαισθησία του δέκτη [23]. Στον πίνακα 3.6 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά ευαισθησίας δέκτη μονάδος λήψης RRU του σταθμού βάσης eNodeB όπου παρουσιάζεται η εξάρτηση από το φασματικό εύρος λειτουργίας. Η απαίτηση της ευαισθησίας του δέκτη είναι η ρυθμαπόδοση (throughput) να είναι πάντα μεγαλύτερη του 95% της μέγιστης ρυθμαπόδοσης βάσει του φασματικού εύρους λειτουργίας το οποίο παρουσιάζεται στο παράρτημα A.1 (Annex A.1) της προδιαγραφής [23].

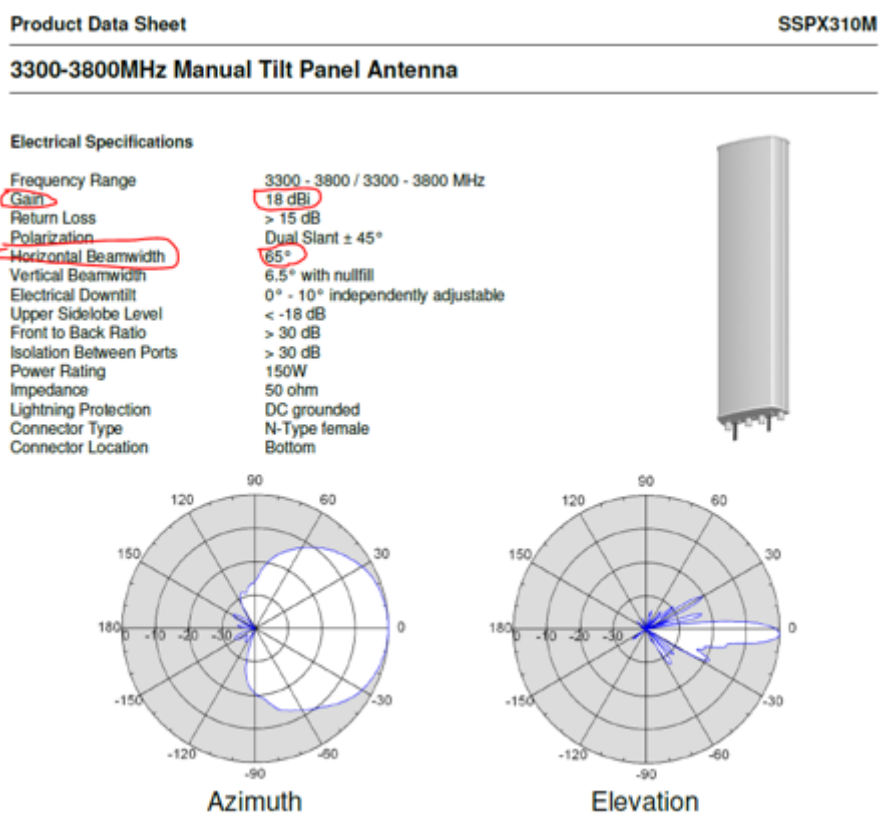
Πίνακας 3.6: Ευαισθησία δέκτη σταθμού βάσης

E-UTRA channel bandwidth [MHz]	Reference measurement channel	Reference sensitivity power level, $P_{\text{REFSENS}}$ [dBm]
1.4	FRC A1-1 in Annex A.1	-106.1
3	FRC A1-2 in Annex A.1	-102.3
5	FRC A1-3 in Annex A.1	-100.8
10	FRC A1-3 in Annex A.1*	-100.8
15	FRC A1-3 in Annex A.1*	-100.8
20	FRC A1-3 in Annex A.1*	-100.8

Note\*:  $P_{\text{REFSENS}}$  is the power level of a single instance of the reference measurement channel. This requirement shall be met for each consecutive application of a single instance of FRC A1-3 mapped to disjoint frequency ranges with a width of 25 Resource Blocks each.

Σύμφωνα με την 3GPP η ευαισθησία του δέκτη εντέλει ΔΕΝ εξαρτάται από το εύρος φάσματος λειτουργίας της κυψέλης για φασματικό εύρος μεγαλύτερο ή ίσο από 5 MHz.

Τέλος, η κεραία του σταθμού βάσης που χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό του δικτύου είναι η SSPX310M. Στην ανάλυση του προϋπολογισμού ισχύος λήψης (Link budget analysis) θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε κέρδος κεραίας στα 18 dBi θεωρώντας οριζόντιο γωνιακό εύρος εκπομπής (horizontal beamwidth) στις 65° και κατακόρυφο γωνιακό εύρος εκπομπής στις 6,5°. Ακολουθεί το διάγραμμα ακτινοβολίας (radiation pattern) της κεραίας στο σχήμα 3.5:



Σχήμα 3.5: Χαρακτηριστικά κεραίας δικτύου μέτρησης

### 3.3 Τεχνικές Προδιαγραφές - Απαιτήσεις ράδιο-κάλυψης δικτύου LTE-TDD

#### Γενική προσέγγιση σχεδιασμού

Η διαδικασία πιστοποίησης του σχεδιασμού ράδιο-κάλυψης αγροτικών περιοχών βασίζεται στον κατάλληλο σχεδιασμό της κάτω-ζεύξης (downlink) και συγκεκριμένα στα **Reference Signals** και στην ισχύ λήψης τους (**Reference Signal Received Power, RSRP**) όπως έχει ήδη επεξηγηθεί στο δεύτερο κεφάλαιο. Τα σήματα αναφοράς στην κάτω ζεύξη αποτελούνται από τα αποκαλούμενα **σύμβολα αναφοράς (reference symbols RS ή CSRS)** τα οποία είναι γνωστές ακολουθίες από σύμβολα τα οποία τοποθετούνται σε συγκεκριμένες θέσεις στο πλαίσιο χρόνου-συχνοτήτων του OFDM [14]. Ο μέγιστος αριθμός των cell-specific reference signals είναι τέσσερα σε κάθε slot (RB) ή οκτώ συνολικά σε ένα subframe χρονικής διάρκειας 1 ms (SB). Αυτό ισχύει για την περίπτωση που έχουμε μία κεραία (σύστημα SISO). Αν έχουμε στο φυσικό κανάλι περισσότερες από μία κεραία (MIMO με διαφορετικό τεχνικό σχεδιασμό – Antenna configuration) τότε σύμφωνα με τα πρότυπα έχουμε το μέγιστο οκτώ σήματα αναφοράς σε κάθε φυσικό κανάλι κεραίας. Η φορητή συσκευή θα πρέπει να μπορεί να διαχωρίζει στην κάτω ζεύξη τα σήματα αναφοράς κάθε κεραίας σε περίπτωση πολλαπλών κεραιών στο ίδιο κύτταρο (MIMO 2x2 ή 4x4 διατάξεις κεραιών). Αυτό συνεπάγεται ότι στην θέση (Resource Element) όπου εκπέμπεται η πληροφορία της ακολουθίας των συμβόλων των σημάτων αναφοράς μία κεραίας (antenna port), στις άλλες κεραίες δεν θα πρέπει να απεικονιστεί καμία πληροφορία και αυτές οι θέσεις (Resource Elements) θα πρέπει να μείνουν κενές. Αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά στο σχήμα 2.11 της παραγράφου 2.5 όπου απεικονίζονται τα σήματα αναφοράς καθώς και οι κενές θέσεις στο πλαίσιο χρόνου-συχνότητας για ένα σύστημα MIMO 2x2. Αυτές οι απεικονίσεις και οι κενές θέσεις δεν θα πρέπει να επιλέγονται τυχαία αλλά θα πρέπει να έχουν προκαθορισμένες θέσεις στο πλαίσιο χρόνου-συχνότητας. Τα πρότυπα 3GPP έχουν προκαθορίσει λοιπόν τα **Resource Elements** στα οποία θα πρέπει να απεικονιστούν τα σύμβολα των σημάτων αναφοράς, όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 2.12.

Εφόσον η κάτω ζεύξη σχετίζεται με τον δέκτη, ο οποίος στην προκειμένη περίπτωση είναι η μονάδα λειτουργίας του πελάτη CPE-eA380, η διαδικασία πιστοποίησης βασίζεται εν τέλει στις προδιαγραφές του δέκτη του χρήστη (εξοπλισμός λήψης CPE) της εταιρείας Huawei. Ακολουθεί ο πίνακας 3.7 με τις προδιαγραφές του εξοπλισμού CPE [24] με έμφαση στην τεχνική προδιαγραφή **“Receiver Sensitivity”** και συγκεκριμένα στην κατηγορία CPE eA380-123 στην ζώνη συχνοτήτων LTE-TDD 43 (B42/43) για το μέγιστο εύρος φάσματος τομέα LTE 20 MHz.

**Πίνακας 3.7:** Τεχνικές προδιαγραφές εξοπλισμού CPE της εταιρείας Huawei

Category	Description	
Receiving sensitivity	LTE	<p>eA380-123</p> <p>B38/40:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• &lt; -100 dBm/5 MHz</li> <li>• &lt; -97 dBm/10 MHz</li> <li>• &lt; -94 dBm/20 MHz</li> </ul> <p>B41/B7:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• &lt; -98 dBm/5 MHz</li> <li>• &lt; -95 dBm/10 MHz</li> <li>• &lt; -92 dBm/20 MHz</li> </ul> <p>eA380-135</p> <p>B42/43:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• &lt; -99 dBm/5 MHz</li> <li>• &lt; -96 dBm/10 MHz</li> <li>• &lt; -93 dBm/20 MHz</li> </ul>

Η απαιτούμενη ευαισθησία του CPE δέκτη, σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές του κατασκευαστή Huawei, είναι επομένως -93 dBm. Η ενδεικτική τιμή της συσκευής του πελάτη, σύμφωνα με τον κατασκευαστή (Huawei) είναι προφανώς συμβατή με τις προδιαγραφές της 3GPP [18], όπως είναι εμφανές στον πίνακα 3.8 όπου εν τέλει υποδεικνύει την απαίτηση στην ευαισθησία του δέκτη για ράδιο ζεύξη με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης QPSK σε φάσμα λειτουργίας 20 MHz.

**Πίνακας 3.8:** 3GPP Τεχνικές προδιαγραφές αναφοράς ευαισθησίας εξοπλισμού πελάτη -QPSK

E-UTRA Band	Channel bandwidth						Duplex Mode
	1.4 MHz (dBm)	3 MHz (dBm)	5 MHz (dBm)	10 MHz (dBm)	15 MHz (dBm)	20 MHz (dBm)	
1			-100	-97	-95.2	-94	FDD
2	-102.7	-99.7	-98	-95	-93.2	-92	FDD
3	-101.7	-98.7	-97	-94	-92.2	-91	FDD
4	-104.7	-101.7	-100	-97	-95.2	-94	FDD
5	-103.2	-100.2	-98	-95			FDD
6			-100	-97			FDD
7			-98	-95	-93.2	-92	FDD
8	-102.2	-99.2	-97	-94			FDD
9			-99	-96	-94.2	-93	FDD
10			-100	-97	-95.2	-94	FDD
11			-100	-97			FDD
12	-101.7	-98.7	-97	-94			FDD
13			-97	-94			FDD
14			-97	-94			FDD
...							
33			-100	-97	-95.2	-94	TDD
34			-100	-97	-95.2		TDD
35	-106.2	-102.2	-100	-97	-95.2	-94	TDD
36	-106.2	-102.2	-100	-97	-95.2	-94	TDD
37			-100	-97	-95.2	-94	TDD
38			-100	-97	-95.2	-94	TDD
39			-100	-97	-95.2	-94	TDD
40			-100	-97	-95.2	-94	TDD
41			-98	-95	-93.2	-92	TDD
42			-99	-96	-94.2	-93	TDD
43			-99	-96	-94.2	-93	TDD
44		[-100.2]	[-98]	[-95]	[-93.2]	[-92]	TDD

Εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι είναι αναμενόμενη η εξάρτηση της ευαισθησίας δέκτη από την διαμόρφωση, καθώς επηρεάζει την διακριτική ικανότητα του δέκτη, όπως ευαισθησία σε σφάλματα, παρεμβολές και μη-γραμμικότητα καναλιού.

Για τον σχεδιασμό και την πιστοποίηση των μετρήσεων θα πρέπει να συμπεράνουμε την **ελάχιστη τιμή μέτρησης στάθμης λήψης (RSRP)** ώστε να είναι ο σχεδιασμός αλλά και το δίκτυο μέτρησης συμβατό με την προαναφερθείσα ευαισθησία δέκτη. Σε άλλη περίπτωση δεν θα μπορέσει ποτέ ο δέκτης να αποκωδικοποιήσει την πληροφορία ούτε των RS signals ούτε του καναλιού PDSCH της πληροφορίας του πελάτη με συνέπεια να έχουμε συνεχώς CQI  $\approx 0$  και συνεχείς απαιτήσεις σε επανεκπομπή (PDSCH retransmission) τα οποία αναπόφευκτα θα οδηγήσουν σε μηδενικό throughput. Εν ολίγοις απαιτείται να ικανοποιηθεί η συνθήκη:

$$\mathbf{RSRP \approx CPE\ receiver\ Sensitivity = -93\ dBm}$$

Για αυτόν τον λόγο θα πρέπει να υπολογίσουμε τις συνθήκες ράδιο-κάλυψης και κατ' επέκτασιν ισχύος λήψης RSRP στην χειρότερη των περιπτώσεων, η οποία είναι τα άκρα της κυψέλης, θεωρώντας έναν χρήστη της υπηρεσίας ως χρήστη στο άκρο της κυψέλης (cell edge user).

**Πίνακας 3.9:** 3GPP τεχνικές προδιαγραφές διαμόρφωση και Transport Block Size (TBS) για PDSCH

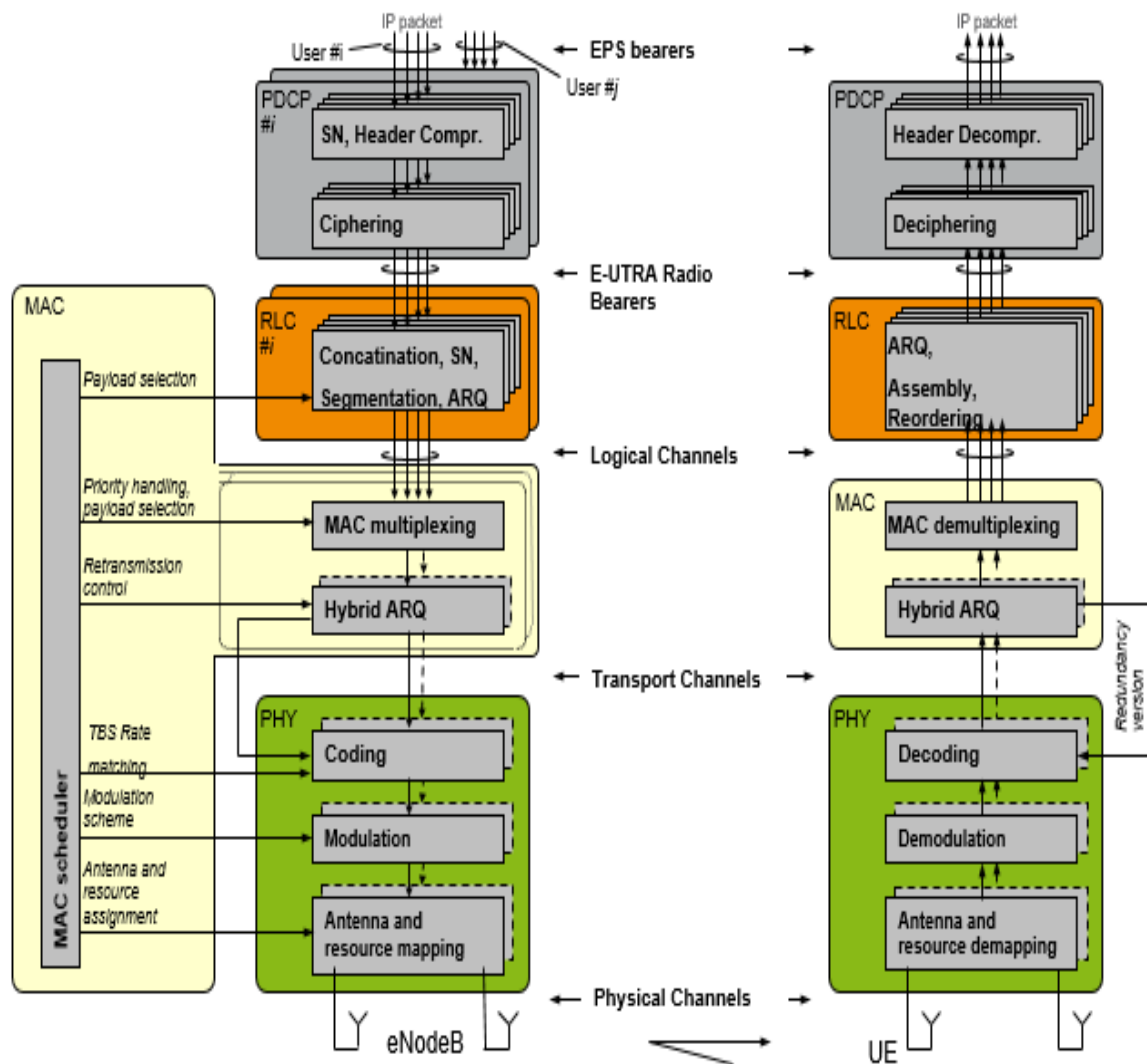


MCS Index	Modulation Order	TBS Index
$I_{MCS}$	$Q_m$	$I_{TBS}$
0	2	0
1	2	1
2	2	2
3	2	3
4	2	4
5	2	5
6	2	6
7	2	7
8	2	8
9	2	9
10	4	9
11	4	10
12	4	11
13	4	12
14	4	13
15	4	14
16	4	15
17	6	15
18	6	16
19	6	17
20	6	18
21	6	19
22	6	20
23	6	21
24	6	22
25	6	23
26	6	24
27	6	25
28	6	26
29	2	reserved
30	4	
31	6	

Σύμφωνα με την 3GPP [25] για τον προαναφερθέντα χρήστη (cell edge user) επιλέγεται η τιμή της ευαισθησίας δέκτη για την μικρότερη διαμόρφωση (δηλαδή την QPSK) καθώς ο MAC scheduler στα άκρα της κυψέλης θα δώσει την μικρότερη δυνατή διαμόρφωση QPSK (τιμή  $Q_m = 2$  στον πίνακα 3.9) με το μεγαλύτερο ποσοστό κωδικοποίησης bits καναλιού ( $I_{MCS}$ ) για να εγγυηθεί την καλύτερη δυνατή απόδοση του δέκτη.

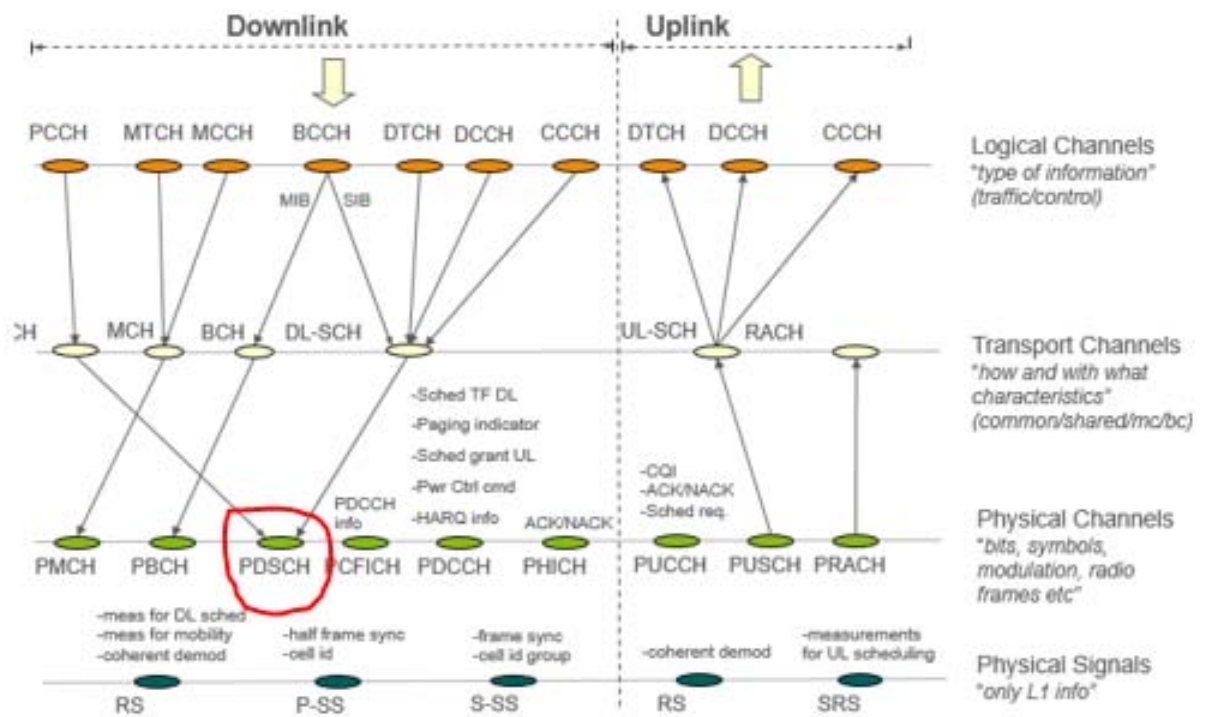
Από τον πίνακα 3.9 προκύπτει, για τις τιμές στα άκρα της κυψέλης Modulation & Coding Scheme index  $I_{MCS} = 0$  και Modulation Order  $Q_m = 2$  (QPSK), η επιλογή της ένδειξης του μεγέθους του πακέτου **Transport Block Selection**  $I_{TBS} = 0$ .

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να εξηγηθεί εν συντομία η λειτουργία του MAC scheduler [14], ο οποίος βρίσκεται στο επίπεδο MAC στην διεπαφή αέρα, σχήμα 3.6



Σχήμα 3.6: Στοίβα πρωτοκόλλων LTE διεπαφής αέρα

Ο scheduler, μεταξύ πολλών διαφορετικών συνδυασμών, θα αποδώσει τον ελάχιστο αριθμό από φυσικούς πόρους ( $n_{PRB}$ ) ώστε να μπορέσει το κανάλι μεταφοράς πληροφορίας (MAC transport channel), μετά την κατάλληλη επεξεργασία η οποία περιλαμβάνει διαδικασίες κωδικοποίησης καναλιού (CRC & FEC Turbo Coding με Interleaver), framing, scrambling & modulation, να πάρει το συνολικό του μέγεθος και να ονομαστεί **Transport Block (Trblk)** με συγκεκριμένο μήκος bits. Αυτό το transport block θα εισαχθεί στο κοινόχρηστο MAC transport channel **DL-SCH** και εν συνεχεία θα απεικονιστεί (διαδικασία γνωστή στα πρότυπα της 3GPP ως channel mapping) στο φυσικό επίπεδο στο φυσικό κανάλι **PDSCH**, σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7: Channel mapping στο PDSCH φυσικό κανάλι

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να κατανοήσουμε ότι η επιλογή των ράδιο-πόρων (Physical Resource Blocks, nPRB) του MAC scheduler εξαρτάται από την τιμή του σήματο-θορυβικού λόγου του καναλιού PDSCH,  $\gamma_0 = \text{SINR}_{\text{PDSCH}}$ . Ο λόγος  $\gamma_0 = \text{SINR}_{\text{PDSCH}}$  είναι συνυφασμένος με την ευαισθησία του δέκτη, δηλαδή την τιμή του σήματος λήψης RSRP και του σήματο-θορυβικού λόγου  $\gamma = \text{SINR}_{\text{RS}}$ . Η όλη διαδικασία βασίζεται στην αρχή λειτουργίας της ανάδρασης του καναλιού, γνωστή στην διεθνή ορολογία ως **closed loop channel feedback**. Το φυσικό κανάλι το οποίο χρησιμοποιείται για την αναφορά ανάδρασης (channel feedback report ή **Channel Quality Index CQI**) είναι το φυσικό κανάλι Physical Uplink Common Control Channel, **PUCCH** όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7. Πράγματι κατά την διαδικασία της διασύνδεσης της συσκευής του χρήστη στο δίκτυο υπάρχει η βασική διαδικασία ανταλλαγής μηνυμάτων σηματοδοσίας (πρωτόκολλο σηματοδοσίας layer 3 RRC σχήμα 3.6) γνωστή ως **RRC connection establishment procedure** όπου το δίκτυο μεταδίδει στην συσκευή του χρήστη τεχνικές παραμέτρους σχετιζόμενες με την λειτουργικότητα της συσκευής σε κατάσταση ενεργούς λειτουργίας (connected mode). Μία από αυτές τις παραμέτρους αφορά και την περιοδικότητα της αναφοράς ανάδρασης. Το ερώτημα είναι πως σχετίζεται αυτή η αναφορά ανάδραση με την στάθμη λήψης; Πράγματι στην κάτω ζεύξη η φορητή μονάδα διαβάζει την στάθμη λήψης RSRP και αποφαινεται για την τιμή του  $\gamma = \text{SINR}_{\text{RS}}$  χρησιμοποιώντας την τιμή του  $\text{Gain} = 1/\text{pathloss}$  η οποία είναι ανεξάρτητη ποσότητα σε σχέση με την ισχύ εκπομπής ανά φυσικό ράδιο πόρο (Physical Resource Block), δηλαδή την

RS Power Spectral Density =  $PSD_{RS}$  = RS transmitted power/PRB [watt/Hz].

$$\gamma = SINR_{RS} = \frac{\text{received signal } RS}{N+I} = \frac{\text{Transmitted power } RS / Pathloss}{N+I} = \frac{Gain \cdot \text{Transmitted power } RS}{N+I} =$$

$$= \text{Transmitted power } RS * \frac{Gain}{N+I} = PSD_{RS} \cdot GINR \quad (3.1)$$

ή σε dB:

$$SINR_{RS} [dB] = PSD_{RS} \left[ \frac{dBm}{Hz} \right] + GINR [dB] \Rightarrow GINR [dB] = SINR_{RS} [dB] - RSRP \quad (3.2)$$

Εν συνεχεία, ο δέκτης της συσκευής του χρήστη CPE υπολογίζει τη τιμή της  $\gamma_0 = SINR_{PDSCH}$  ως ακολούθως:

$$\gamma_0 = SINR_{PDSCH} [dB] = PSD_{PDSCH} \left[ \frac{dBm}{Hz} \right] + GINR [dB] \quad (3.3)$$

Η τιμή της ποσότητας  $\gamma_0 = SINR_{PDSCH}$  δεν αποστέλλεται αυτούσια στην άνω ζεύξη καθώς το εύρος τιμών της ποσότητας αυτής είναι μεγάλο και θα απαιτούσε μεγάλο αριθμό από bits αναπαράστασης αυξάνοντας την επιβάρυνση του σήματος (signaling overhead). Αντιθέτως, μετατρέπεται σε μία τιμή αναφοράς CQI η οποία έχει μήκος 4 bits και εύρος τιμών [0, ..., 15] και αποστέλλεται στην άνω ζεύξη στο κανάλι PUCCH, πίνακας 3.10.

**Πίνακας 3.10:** Αντιστοίχιση 16 τιμών CQI σε παραμέτρους της λειτουργίας Link Adaptation

CQI Index	Modulation	Code rate x 1024	Efficiency
0	Out of range		
1	QPSK	78	0.1523
2	QPSK	120	0.2344
3	QPSK	193	0.3770
4	QPSK	308	0.6016
5	QPSK	449	0.8770
6	QPSK	602	1.1758
7	16QAM	378	1.4766
8	16QAM	490	1.9141
9	16QAM	616	2.4063
10	64QAM	466	2.7305
11	64QAM	567	3.3223
12	64QAM	666	3.9023
13	64QAM	772	4.5234
14	64QAM	873	5.1152
15	64QAM	948	5.5547

Επομένως ο σχεδιαστής του δικτύου συνήθως επιλέγει ένα ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στα άκρα της κυψέλης λαμβάνοντας υπόψιν και την ισχύ λήψης στην ευαισθησία

του δέκτη και εν συνεχεία αποφαινεται για την απόσταση ράδιο-κάλυψης στην χειρότερη των περιπτώσεων (με ή χωρίς συνθήκες NLoS).

Στην παρούσα πτυχιακή, κατά τον σχεδιασμό, η επιλογή είναι η ελάχιστη ρυθμαπόδοση (throughput) στα άκρα της κυψέλης να είναι 200 kbps. Βάσει των πινάκων της 3GPP, (πίνακας 3.11) το μέγεθος των αποδιδόμενων ράδιο-πόρων  $n_{PRB}$  για να μπορέσει να «φιλοξενήσει» το MAC transport channel θα είναι από πέντε έως δέκα PRBs, [25], καθώς το πακέτο μετάδοσης δεδομένων PDSCH έχει μικρό μέγεθος (συνολικά από 120 έως 256 bits) με συνέπεια χαμηλή ρυθμαπόδοση.

**Πίνακας 3.11:** Πίνακας επιλογής μεγέθους πακέτου transport Block (trblk) έως 10 PRBs κατά 3GPP

$I_{TBS}$	$N_{PRB}$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	16	32	56	88	120	152	176	208	224	256
1	24	56	88	144	176	208	224	256	328	344
2	32	72	144	176	208	256	296	328	376	424
3	40	104	176	208	256	328	392	440	504	568
4	56	120	208	256	328	408	488	552	632	696
5	72	144	224	328	424	504	600	680	776	872
6	328	176	256	392	504	600	712	808	936	1032
7	104	224	328	472	584	712	840	968	1096	1224
8	120	256	392	536	680	808	968	1096	1256	1384
9	136	296	456	616	776	936	1096	1256	1416	1544
10	144	328	504	680	872	1032	1224	1384	1544	1736
11	176	376	584	776	1000	1192	1384	1608	1800	2024
12	208	440	680	904	1128	1352	1608	1800	2024	2280
13	224	488	744	1000	1256	1544	1800	2024	2280	2536
14	256	552	840	1128	1416	1736	1992	2280	2600	2856
15	280	600	904	1224	1544	1800	2152	2472	2728	3112
16	328	632	968	1288	1608	1928	2280	2600	2984	3240
17	336	696	1064	1416	1800	2152	2536	2856	3240	3624
18	376	776	1160	1544	1992	2344	2792	3112	3624	4008
19	408	840	1288	1736	2152	2600	2984	3496	3880	4264

Υιοθετώντας τα προηγούμενα τεχνικά σχόλια, η ευαισθησία του εξοπλισμού CPE μπορεί να προδιαγραφεί ως η μικρότερη επιτρεπόμενη δυνατή ισχύς λήψης του καναλιού μετάδοσης δεδομένων PDSCH, δηλαδή  $REFSENS_{min} = PDSCH_{min}$  στην κάτω ζεύξη. Αυτό αντιστοιχεί σε μία ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή της μετρούμενης ποσότητας SINR στην κάτω ζεύξη, ήτοι:

$$\gamma_0 = SINR_{min} = Power_{PDSCH_{min}} / (N_t + I) \quad (3.4)$$

Εφόσον δεν υπάρχουν παρεμβολές ( $I \approx 0$ ), καθώς ο σχεδιασμός του δικτύου ράδιο-κάλυψης Rural περιοχών χαρακτηρίζεται από προσεκτικό σχεδιασμό ράδιο-κάλυψης και επικάλυψης κυψελών με συνεπή απόδοση φασματικών συχνοτήτων και παραμέτρου PCI ασυρμάτου

προσβάσεως RACH, προκύπτει ότι για  $n_{PRB} = 10$  η απαίτηση σχεδιασμού στα άκρα της κυψέλης είναι:

$$\gamma_0 = SINR_{min} = PDSCH_{min} / N_t = PDSCH_{min} [\text{Watts}/20\text{MHz}] \cdot n_{PRB} / N_t \rightarrow$$

$$\gamma_0 [\text{dB}] = -93 [\text{dBm}/20 \text{ MHz}] - (10\log(n_{PRB}) - 119) [\text{dBm}/20 \text{ MHz}] \rightarrow$$

$$\gamma_0 [\text{dB}] = -93 [\text{dBm}/20 \text{ MHz}] - (10\log(10) - 119) [\text{dBm}/20 \text{ MHz}] \rightarrow$$

$$\gamma_0 [\text{dB}] = -93 [\text{dBm}/20 \text{ MHz}] - (10 - 119) [\text{dBm}/20 \text{ MHz}] \approx \mathbf{15 \text{ dB}} \quad (3.5)$$

### Απαίτηση στάθμης λήψης RSRP

Η επαρκής και αιτιολόγηση της διαδικασίας σχεδιασμού της ράδιο-κάλυψης των αγροτικών περιοχών απαιτεί την σύνδεση της απαιτούμενης ελάχιστης τιμής της SINR  $\gamma_0 [\text{dB}] \approx 15 \text{ dB}$  με την μετρήσιμη ποσότητα ράδιο-κάλυψης RSRP.

Η 3GPP δεν προσδιορίζει κάποια συνάρτηση συσχέτισης μεταξύ RSRP vs. RS-SINR και PDSCH-RSRP καθώς η απαιτήσεως της μετρήσιμης τιμής της RS-SINR εξαρτάται από τον πάροχο του εξοπλισμού. Στην περίπτωση μας, η εταιρεία Huawei ακολουθεί τον μαθηματικό τύπο συσχέτισης RS-SINR vs. RSRP [18]

$$\gamma_0 = SINR = \frac{1}{\frac{1}{12 \cdot RSRQ} - Q_i} = \frac{1}{\frac{RSSI}{12 \cdot RSRP \cdot Q_i \cdot N_{RB}} - Q_i} \quad (3.6)$$

όπου η τιμή  $Q_i$  αντιστοιχεί στο ποσοστό χρήσης των PRB στον τομέα. Στην δική μας περίπτωση ράδιο-κάλυψης περιοχών Rural η σχεδίαση έχει υλοποιηθεί για το μέγιστο φορτίο του τομέα,  $Q_i = 1$ , δηλαδή για την περίπτωση όπου η κυψέλη εξυπηρετεί πελάτες με όλους τους πόρους του.

Κατά τον σχεδιασμό η παραμετροποίηση έχει υλοποιηθεί (βάσει των προδιαγραφών του λογισμικού) για πλήρες φορτίο τομέα ( $Q_i = 1$ ) με την λογική υπόθεση χρήσης όλων των φυσικών πόρων PRBs (δηλαδή  $N_{PRB} = 100$ ). Ακολουθώντας τις προδιαγραφές της 3GPP [25], η επιλεγείσα τιμή της ευαισθησίας δέκτη αντιστοιχεί στην διαμόρφωση QPSK για  $Q_m = 2$  και  $I_{TBS} = 0$  καθώς και  $N_{PRB} = 100$ , σύμφωνα με τον πίνακα 3.12.

Πίνακας 3.12: Πίνακας επιλογής μεγέθους πακέτου transport Block (trblk) έως 100 PRBs κατά 3GPP

$I_{TBS}$	$N_{PRB}$									
	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
0	2536	2536	2600	2600	2664	2664	2728	2728	2728	2792
1	3368	3368	3368	3496	3496	3496	3496	3624	3624	3624
2	4136	4136	4136	4264	4264	4264	4392	4392	4392	4584
3	5352	5352	5352	5544	5544	5544	5736	5736	5736	5736
4	6456	6456	6712	6712	6712	6968	6968	6968	6968	7224
5	7992	7992	8248	8248	8248	8504	8504	8760	8760	8760
6	9528	9528	9528	9912	9912	9912	10296	10296	10296	10296
7	11064	11448	11448	11448	11448	11832	11832	11832	12216	12216
8	12576	12960	12960	12960	13536	13536	13536	13536	14112	14112
9	14112	14688	14688	14688	15264	15264	15264	15264	15840	15840
10	15840	16416	16416	16416	16992	16992	16992	16992	17568	17568
11	18336	18336	19080	19080	19080	19080	19848	19848	19848	19848
12	20616	21384	21384	21384	21384	22152	22152	22152	22920	22920
13	23688	23688	23688	24496	24496	24496	25456	25456	25456	25456
14	26416	26416	26416	27376	27376	27376	28336	28336	28336	28336
15	28336	28336	28336	29296	29296	29296	29296	30576	30576	30576
16	29296	30576	30576	30576	30576	31704	31704	31704	31704	32856
17	32856	32856	34008	34008	34008	35160	35160	35160	35160	36696
18	36696	36696	36696	37888	37888	37888	37888	39232	39232	39232
19	39232	39232	40576	40576	40576	40576	42368	42368	42368	43816
20	42368	42368	43816	43816	43816	45352	45352	45352	46888	46888
21	45352	46888	46888	46888	46888	48936	48936	48936	48936	51024
22	48936	48936	51024	51024	51024	51024	52752	52752	52752	55056
23	52752	52752	52752	55056	55056	55056	55056	57336	57336	57336
24	55056	57336	57336	57336	57336	59256	59256	59256	61664	61664
25	57336	59256	59256	59256	61664	61664	61664	61664	63776	63776
26	66592	68808	68808	68808	71112	71112	71112	73712	73712	75376

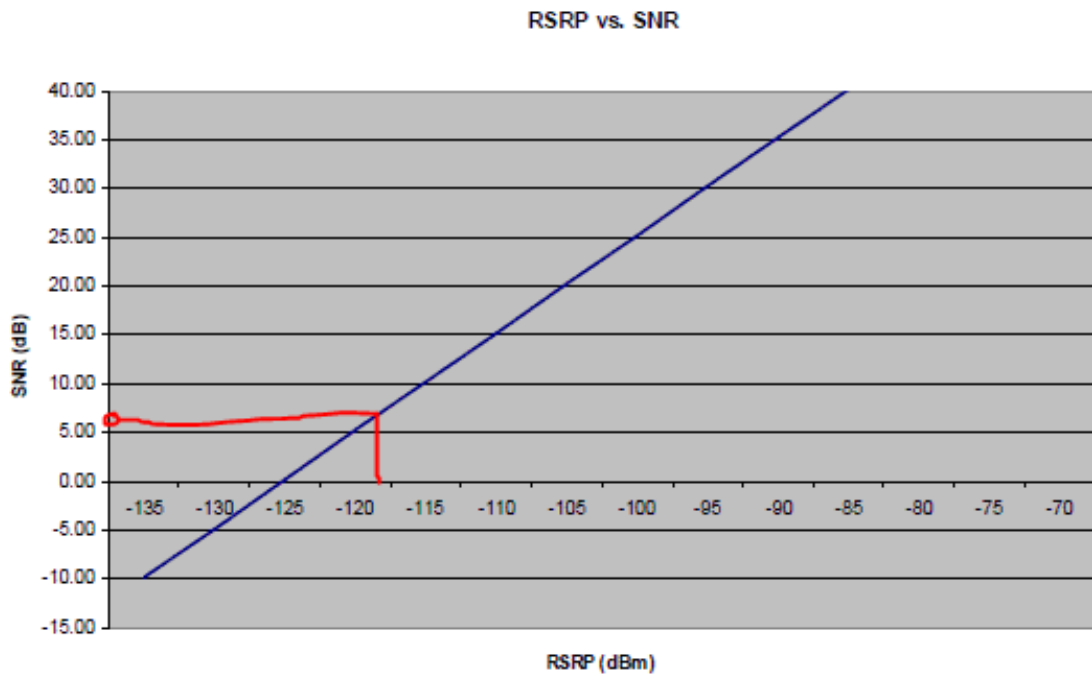
Αυτό αντιστοιχεί σε μία ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή της μετρούμενης ποσότητας PDSCH-SINR:

$$\gamma_0 [\text{dB}] = -93 [\text{dBm}] - (10\log(100) - 119) [\text{dBm}] \rightarrow$$

$$\gamma_0 [\text{dB}] = -93 [\text{dBm}] - (20 - 119) [\text{dBm}] \approx \mathbf{6 \text{ dB}} \quad (3.7)$$

Ακολουθεί η γραφική παράσταση συσχέτισης SINR vs. PDSCH-RSRP για  $Q_i = 1$

$$\gamma_0 [\text{dB}] = 10 \log \left( \frac{1}{\frac{RSSI}{12 \cdot RSRP \cdot Q_i \cdot N_{RB}} - Q_i} \right) \quad (3.8)$$



**Καμπύλη 3.1:** Γραφική παράσταση συσχέτισης SINR vs. PDSCH-RSRP

**Συμπέρασμα:** Από την προηγούμενη ανάλυση προκύπτει η απαίτηση σχεδιασμού ράδιο κάλυψης αγροτικών περιοχών στο εύρος  $-70 \text{ dBm} \leq \text{RSRP} \leq -120 \text{ dBm}$  με ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή  $\text{RSRP} \approx -120 \text{ dBm}$ .



# Κεφάλαιο 4

## Μοντέλα απωλειών διάδοσης

### 4.1 Εισαγωγή

**Απώλειες διαδρομής ή διάδοσης** ασυρμάτου ζεύξης ονομάζουμε τη συνολική εξασθένηση της ισχύος του σήματος κατά τη διάρκεια της διαδρομής του από τον πομπό στον δέκτη. Οι βασικοί μηχανισμοί που επηρεάζουν την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος βασίζονται στην φυσική της κυματικής διάδοσης της Ήλεκτρο-Μαγνητικής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης, περιλαμβάνοντας τα κυματικά φαινόμενα της ανάκλασης, διάθλασης, σκέδασης και περίθλασης. **Ανάκλαση** λαμβάνει χώρα στα φυσικά εμπόδια και στην επιφάνεια της Γης συμβάλλοντας σε φαινόμενα πολύ-όδευσης, απωλειών σκέδασης και μερικής αλλαγής πόλωσης (μερική από-πόλωση).

**Διάθλαση** λαμβάνει χώρα όταν έχουμε την μετάδοση Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας διαμέσου υλικών με διαφορετικό δείκτη διάθλασης, συμβάλλοντας στην εξασθένηση του κύματος λόγω οπισθοδρομούντων κυμάτων (backwards reflected signals) και μερική αλλαγή πόλωσης (μερική από-πόλωση).

**Περίθλαση** συμβαίνει όταν έχουμε παρουσία φυσικού ή τεχνητού (λόγω ανθρωπίνου παράγοντα) εμποδίου στην ευθεία μεταξύ πομπού και δέκτη, προκαλώντας τη δημιουργία δευτερευόντων κυμάτων πίσω από το εμπόδιο στην περιοχή σκίασης. Αυτό το φαινόμενο λέγεται σκίαση (shadowing) και ευθύνεται για τη λήψη σήματος από τον δέκτη ακόμα κι όταν δεν υπάρχει οπτική επαφή (LOS) μεταξύ πομπού και δέκτη. Επιπλέον το διαδιδόμενο κύμα πίσω από το εμπόδιο έχει υποστεί απώλεια ισχύος η οποία περιγράφεται από τον τύπο Περίθλασης Fresnel ή αλλιώς φαινόμενο απωλειών knife-edge.

Τέλος, το **φαινόμενο της σκέδασης** λαμβάνει χώρα είτε κατά την πρόσπτωση της Ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε μη-λεία (τραχειά) επιφάνεια του εδάφους ή τεχνητού εμποδίου είτε κατά την διάδοση της Ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας διαμέσου νεφών, βροχόπτωσης ή φυλλωμάτων δέντρων. Το φαινόμενο της σκέδασης παρουσιάζει έντονα στατιστικά φαινόμενα απωλειών και απόσβεσης της ληφθείσης ισχύος. Η ενέργεια ανακλάται και σκεδάζεται (διασκορπίζεται) προς όλες τις διευθύνσεις.

Στις επόμενες παραγράφους θα παρουσιάσουμε μία περιληπτική επισκόπηση των βασικών μοντέλων απωλειών και θα εξηγήσουμε το ημι-εμπειρικό και ευρέως γνωστό στην βιβλιογραφία Standard Propagation Model (SPM) [8, 10], στο οποίο θα βασιστεί η ανάλυση των μετρήσεων στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Επιπλέον θα περιγραφούν και οι απώλειες φυλλωμάτων, απωλειών διαδρομής Fresnel και ο υπολογισμός του κέρδους της κεραίας.

## **4.2. Επισκόπηση Μοντέλων Απωλειών Ασυρμάτου Καναλιού**

Σε γενικές γραμμές μπορούμε να πούμε ότι η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως το κλίμα, το γεωγραφικό ανάγλυφο της περιοχής, η περιοχή ράδιο-κάλυψης και η περιοχή ραδιοσυχνοτήτων. Οι μηχανισμοί οι οποίοι βρίσκονται πίσω από τη διάδοση αυτή μπορούν να αποδοθούν στα φαινόμενα της ανάκλασης, της περίθλασης και της σκέδασης. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα φαινόμενα διάδοσης σε συνδυασμό με τα εμπόδια, φυσικά ή τεχνητά, τα οποία και ορίζουν τις συνθήκες διάδοσης σε οπτική επαφή (Line of Site, LoS) και σε μη-οπτική επαφή (non Line of Site, NLoS).

Ο μηχανισμός της οπτικής επαφής αναφέρεται στη μετάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας των ραδιοκυμάτων, η οποία διαδίδεται και προσλαμβάνεται από τον δέκτη χωρίς κάποια οπτική σκίαση ή οπτικό εμπόδιο. Είναι ο απλούστερος μηχανισμός διάδοσης ο οποίος υπόκειται σε απλές φυσικές αρχές απωλειών. Ωστόσο, τα ραδιοκύματα σε πραγματικές

συνθήκες διαδίδονται μέσω ανακλάσεων, διαθλάσεων περιθλάσεων από φυσικά ή τεχνητά εμπόδια καθώς και απορροφώνται από υλικά κατασκευής κτιρίων και ατμοσφαιρικά συστατικά.

Επομένως ένα H/M κύμα υπόκειται σε απώλειες της ισχύος του κατά την διάδοσή του. Οι σχεδιαστές ασυρμάτων δικτύων θα ήθελαν να είχαν μία διαδικασία υπολογισμού των απωλειών ραδιο-διάδοσης ώστε να εκτελέσουν έναν προϋπολογισμό της ζεύξης (Link budget analysis) και να αποφανθούν για τις παραμέτρους του δικτύου. Μία ολοκληρωμένη μελέτη των απωλειών αυτών θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί επιλύοντας αναλυτικά τις εξισώσεις του Maxwell, κάτι το οποίο είναι ανέφικτο ή έστω εξαιρετικά δύσκολο καθώς οι υπολογισμοί που απαιτούνται είναι περίπλοκοι με την ταυτόχρονη ύπαρξη παραμέτρων και υποθέσεων οι οποίες δεν είναι διαθέσιμες. Για να ανταπεξέλθουμε σε αυτήν την αναγκαιότητα χρησιμοποιούμε μοντέλα απωλειών τα οποία βασίζονται σε συνδυασμό μετρήσεων, φυσικών αρχών καθώς και στατιστικών αναλύσεων δεδομένων.

#### 4.2.1 Μοντέλο Απωλειών Ελευθέρου χώρου

Το απλούστερο πρότυπο για τη διάδοση κυμάτων είναι η περίπτωση του ελεύθερου χώρου (Free Space Loss, FSL), δηλαδή ενός «ιδανικού» χώρου διάδοσης H/M κυμάτων όπου δεν υπάρχει κανένα εμπόδιο ή φυσικό κυματικό φαινόμενο το οποίο θα οδηγούσε σε απώλειες λόγω ανακλάσεων, διαθλάσεων, περιθλάσεων, απορροφήσεων, σκιάσεων κτλ. Προφανώς ένα τέτοιο μέσο μετάδοσης δεν υφίσταται στην επιφάνεια της Γης. Επομένως οι μόνες απώλειες που αναμένονται είναι οι απώλειες ελευθέρου χώρου λόγω απόστασης, τις οποίες συμβολίζουμε ως  $L_p$ , καθώς η ισχύς διανέμεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια στο αποκρινόμενο H/M κύμα από την πηγή ακτινοβολίας. Για να είναι το μοντέλο συνεπές με τις ιδανικές συνθήκες διάδοσης της ακτινοβολίας, υποθέτουμε ότι οι κεραιές εκπομπής και λήψης είναι τοποθετημένες σε μια μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, ώστε να μην εμπίπτουμε στο κοντινό πεδίο της κεραιάς.

Οι απώλειες ελευθέρου χώρου  $L_p$  δίδονται από τον ακόλουθο τύπο [26]:

$$L_p = \left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2 \Rightarrow L_p[dBm] = 20 \cdot \log\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) = 32.4 + 20 \cdot \log f + 20 \cdot \log R \quad (4.1)$$

με τις ακόλουθες μεταβλητές:

- R την απόσταση των δύο κεραιών
- $\lambda$  το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, όπου  $\lambda = c/f$  και  $f$  η συχνότητα ακτινοβολίας

Εάν γράψουμε υπό μορφή λογαριθμικής αναπαράστασης την σχέση αυτή προκύπτει ότι:

$$L_p = 10 \log_{10} \left( \frac{4\pi R f}{c} \right)^2 = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi R f}{c} \right) \quad (4.2)$$

Θεωρούμε τις μεταβλητές R [km] και f [MHz], οπότε αντικαθιστώντας όπου  $c = 3 \times 10^5 \text{ km/sec}^2$  και  $f = 10^6 \text{ Hz}$  (δηλαδή MHz), τότε  $f/c = 3.33$ , επομένως:

$$L_{sp} = 10 \log_{10} \left( \frac{4\pi R f}{c} \right)^2 = 20 \log_{10} (3.33 \cdot 4\pi \cdot R \cdot f) \Rightarrow$$

$$L_{sp} = 20 \log_{10} (3.33 \cdot 4\pi) + 20 \log_{10} (R) + 20 \log_{10} (f) \Rightarrow$$

$$L_{sp} [dB] = 32.5 [dB] + 20 \log_{10} (R [km]) + 20 \log_{10} (f [MHz]) \quad (4.3)$$

Η απόσταση R υπολογίζεται από την γεωμετρική σχέση:

$$R = \sqrt{d^2 + (h_{eNodeB} - h_{CPE})^2} \quad (4.4)$$

#### 4.2.2 Διόρθωση Μοντέλου Απωλειών Ελευθέρου Χώρου (FSL)

Κατά την μετάδοση Η/Μ ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης, στον δέκτη, έχουμε την συμβολή τριών κυματικών συνιστωσών:

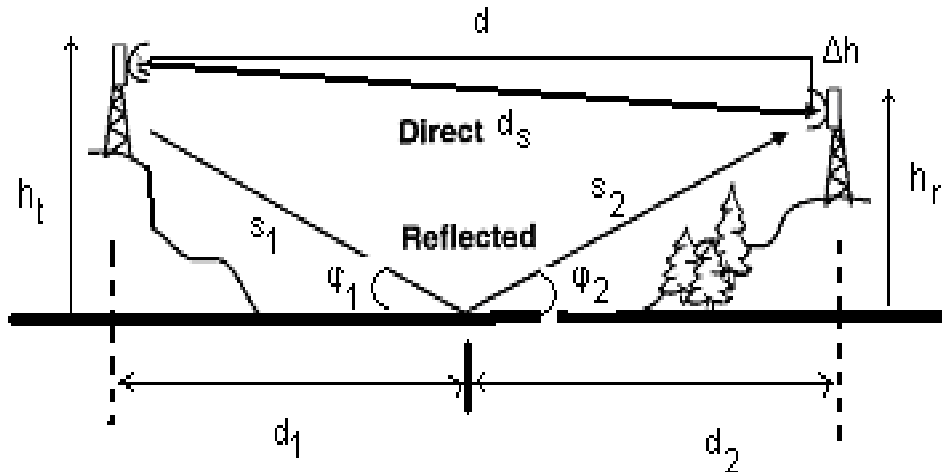
- της **απ' ευθείας** συνιστώσας (**LoS**), το οποίο είναι ουσιαστικά το μοντέλο ελευθέρου χώρου.
- της **ανακλώμενης συνιστώσας (reflected wave)** από το κοντινό επίπεδο επιφάνειας της γης προς την κεραία
- καθώς και τα **κύματα εδάφους (ground waves)**.

Επομένως το μοντέλο ελευθέρου χώρου θα πρέπει να τροποποιηθεί ώστε να περιλαμβάνει και τα φαινόμενα της ανακλώμενης συνιστώσας. Ουσιαστικά έχουμε πολλαπλές ανακλώμενες συνιστώσες αλλά επί της ουσίας μία είναι η συνιστώσα, η δεύτερη ζώνη Fresnel, η οποία θα συνεισφέρει στο μοντέλο. Τα κύματα εδάφους δεν θα μας απασχολήσουν σε αυτήν την διατριβή καθώς δεν θα επηρεάσουν κεραίες ευρισκόμενες σε ύψος άνω των 5 m στον πυλώνα του σταθμού βάσης (eNodeB Tower), επομένως μόνο τα ανακλώμενα κύματα, καθώς και η LoS συνιστώσα θα πρέπει να μας απασχολήσουν. Το τροποποιημένο μοντέλο ονομάζεται **μοντέλο απωλειών επίπεδης γης (PEL)**.

Οι ανακλάσεις αναμένεται να είναι πολλαπλές καθώς η επιφάνεια της Γης είναι τραχειά, επομένως οι σχεδιαστές ασυρμάτων συστημάτων χρησιμοποιούν τεχνικές υπολογισμού (ray-trace) υπέρθεσης των φάσεων και των πλατών των διαφορετικών ακτινικών (rays)

συνιστωσών. Σε αυτήν την περίπτωση θα παρουσιάσουμε την εξίσωση των απωλειών επιπέδου γης (Plane Earth Losses - PEL) θεωρώντας μόνον την κυρία ανακλώμενη συνιστώσα από την επιφάνεια της Γης.

Θεωρούμε λοιπόν μία διάταξη ενός συστήματος ασυρμάτου μετάδοσης, όπως στο κάτωθι σχήμα 4.1, [14]:



**Σχήμα 4.1:** Διάταξη Ράδιο-ζεύξης ασυρμάτου καναλιού για την μελέτη ανακλάσεων

Ακολουθώντας τον νόμο των ανακλάσεων προκύπτουν τα κάτωθι συμπεράσματα:

$$\varphi_1 = \varphi_2 \text{ και } d = d_1 + d_2 \quad (4.5)$$

Το ευθύ μονοπάτι (Direct path Los) είναι:  $d_s = \sqrt{d^2 + \Delta h^2}$

Από την τριγωνομετρία του σχήματος 4.1 συμπεραίνουμε ότι:

$$\tan(\varphi_1) = \frac{h_t}{d_1} \Rightarrow \varphi_1 = \tan^{-1}\left(\frac{h_t}{d_1}\right) \quad \varphi_2 = \tan^{-1}\left(\frac{h_r}{d_2}\right)$$

Λόγω του νόμου του Snell προκύπτει ότι οι δύο γωνίες ανάκλασης και πρόσπτωσης είναι ίσες, οπότε

$$\frac{h_t}{d_1} = \frac{h_r}{d_2} .$$

Επίσης:

$$d_1 h_r = d_2 h_t = (d - d_1) h_t \Rightarrow d_1 = \frac{d \cdot h_t}{h_r + h_t} .$$

Επομένως:

$$d_2 = d - \frac{d \cdot h_t}{h_r + h_t} = \frac{d \cdot h_r}{h_r + h_t} .$$

Λαμβάνοντας υπόψιν τους παραπάνω τύπους και έχοντας κατά νου το σχήμα προκύπτει:

$$s_1 = \sqrt{d_1^2 + h_t^2} = h_t \sqrt{1 + \frac{d^2}{(h_r^2 + h_t^2)}}$$

$$s_2 = \sqrt{d_2^2 + h_r^2} = h_r \sqrt{1 + \frac{d^2}{(h_r^2 + h_t^2)}}$$

$$d_s = \sqrt{d^2 + \Delta h^2} = \sqrt{d^2 + (h_t - h_r)^2}$$

Η διαφορά των διαδρομών D μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως:

$$D = s_1 + s_2 - d_s =$$

$$h_t \sqrt{1 + \frac{d^2}{(h_r^2 + h_t^2)}} + \sqrt{1 + \frac{d^2}{(h_r^2 + h_t^2)}} - \sqrt{d^2 + (h_t - h_r)^2} =$$

$$d \left( \sqrt{1 + \frac{(h_r + h_t)^2}{d^2}} - \sqrt{1 + \frac{(h_t - h_r)^2}{d^2}} \right) \quad (4.6)$$

Η ανακλώμενη και η απ'ευθείας LoS δέσμη θα συμβάλουν ταυτόχρονα και οι δύο στην κεραία του δέκτη. Λόγω της διαφοράς των μονοπατιών των δύο δεσμών θα έχουμε και αντίστοιχη διαφορά φάσης με αποτέλεσμα καταστρεπτική ή εποικοδομητική συμβολή. Επομένως, χρειάζεται να υπολογίσουμε την διαφορά φάσης, όπου θα εξαρτώνται από τη γωνία πρόσπτωσης στην ανακλώμενη επιφάνεια, από την πόλωση της κεραίας, από τη συχνότητα ακτινοβολίας (καθότι η διαφορά δρόμου συγκρίνεται και υπολογίζεται βάσει του μήκους κύματος της δέσμης) και από το υλικό του εδάφους.

Το έδαφος θεωρείται στις πλείστες των περιπτώσεων καλό ανακλαστικό υλικό οπότε μπορούμε να θεωρήσουμε συντελεστή ανάκλασης ίσο με  $\rho = -1$  καθότι δεν θεωρούμε κάποια απώλεια και επιπλέον έχουμε αλλαγή φάσης  $180^\circ$ . Για να κάνουμε μία εκτίμηση της συμβολής στην κεραία λήψης θα πρέπει να θεωρήσουμε ποιο είναι το Ηλεκτρικό πεδίο λήψης.

Επομένως, κάνουμε την καλά τεκμηριωμένη θεώρηση ότι το ηλεκτρικό πεδίο  $\vec{E}$  στην κεραία λήψης, ύστερα από ανάκλαση σε μία επιφάνεια λεία θα αποτελείται από δύο συμβολές, την απ'ευθείας (direct LoS) με σημείο αναφοράς φάσης  $0^\circ$  και την ανακλώμενη (reflected) δέσμη με διαφορά φάσης  $\Delta\theta^\circ$  ως ακολούθως:

$$\vec{E} = \vec{E}_d + \vec{E}_R = E_d e^{-j0^\circ} + \rho E_d e^{-j\Delta\theta} = E_d + \rho E_d e^{-j\Delta\theta} = E_d - E_d e^{-j\Delta\theta}$$

Το μέτρο του συνισταμένου Ηλεκτρικού Πεδίου  $E$  θα είναι:

$$|\vec{E}| = |E_d - E_d e^{-j\Delta\theta}| = |E_d (1 - \cos(\Delta\theta) + j \sin(\Delta\theta))|$$

Και χρησιμοποιώντας τον τύπο του μέτρου μιγαδικού αριθμού θα έχουμε:

$$\begin{aligned} |\vec{E}| &= |E_d| \sqrt{(1 - \cos(\Delta\theta))^2 + \sin^2(\Delta\theta)} = \\ &= |E_d| \sqrt{(1 - 2\cos(\Delta\theta) + \cos^2(\Delta\theta) + \sin^2(\Delta\theta))} = |E_d| \sqrt{(2 - 2\cos(\Delta\theta))} = \\ &= 2|E_d| \sqrt{\frac{1}{2}(1 - \cos(\Delta\theta))} \Rightarrow |\vec{E}| = 2|E_d| \sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right). \end{aligned} \quad (4.7)$$

Η διαφορά φάσης λόγω των δύο διαφορετικών μονοπατιών μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} \Delta\theta = kD &= \frac{2\pi}{\lambda} D = \frac{2\pi(s_1 + s_2 - d_s)}{\lambda} = \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} d \left( \sqrt{1 + \frac{(h_r + h_t)^2}{d^2}} - \sqrt{1 + \frac{(h_t - h_r)^2}{d^2}} \right) \end{aligned} \quad (4.8)$$

Η ισχύς λήψης στον δέκτη δίδεται από τον τύπο  $P_R = \frac{P_T \cdot G_R \cdot G_T}{L_p}$  και θεωρώντας ότι  $P_T = |\vec{E}|^2$  προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} P_R &= \frac{|\vec{E}|^2 \cdot G_R \cdot G_T}{L_p} = \frac{4|E_d|^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) G_R \cdot G_T}{L_p} \Rightarrow \\ \frac{P_R}{|E_d|^2} &= \frac{P_R}{P_T} = \frac{4 \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) G_R \cdot G_T}{L_p} = \frac{G_R \cdot G_T}{\frac{L_p}{4 \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right)}} \end{aligned}$$

Επομένως, η συνισταμένη προκύπτουσα απώλεια διαδρομής (απώλεια επιπέδου Γης) είναι:

$$L_{PEL} = \frac{L_{sp}}{4 \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right)} \Rightarrow L_{PEL}[dB] = 10\log_{10}\left(\frac{L_p}{4 \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right)}\right) \Rightarrow$$

$$L_{PEL}[dB] = 10\log_{10}(L_p) - 10\log_{10}\left(4 \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right)\right) \quad (4.9)$$

**Συνθήκη απλοποίησης:** Όταν η απόσταση των δύο κεραιών είναι πολύ μεγαλύτερη του ύψους των κεραιών (μία συνθήκη η οποία ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις σχεδιασμού ασυρμάτων ζεύξεων), δηλαδή για τιμές  $d > 5(\mathbf{h_1 + h_2})$ , ο τύπος της απώλειας επιπέδου Γης απλοποιείται και δεν εξαρτάται από την συχνότητα εκπομπής. Πράγματι, για τυπικές τιμές  $h_t$  και  $h_r$  της τάξης των 50 m, η απόσταση των κεραιών της ασύρματης ζεύξης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη των  $d > 500$  m, κάτι το οποίο ισχύει σχεδόν πάντα !!!!!

Ακολουθώντας την σχετική απλοποίηση η γωνία  $\Delta\theta$  υπολογίζεται ως:

$$\frac{2\pi}{\lambda} d \left( \sqrt{1 + \frac{(h_r + h_t)^2}{d^2}} - \sqrt{1 + \frac{(h_t - h_r)^2}{d^2}} \right) \quad (4.10)$$

δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση  $\Delta\theta \approx \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d}$ , επομένως η απώλεια επιπέδου Γης ξαναγράφεται ως:

$$L_{PEL} = \frac{L_p}{\frac{16\pi^2 h_t^2 h_r^2}{\lambda^2 d^2}} = \frac{\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2}{\frac{16\pi^2 h_t^2 h_r^2}{\lambda^2 d^2}} = \frac{d^4}{h_t^2 h_r^2} \quad (4.11)$$

ή σε dB:

$$L_{PEL}[dB] = 10\log\left(\frac{d^4}{h_t^2 h_r^2}\right) = 40\log(d) - 20\log(h_t) - 20\log(h_r) \quad (4.12)$$

**Συμπέρασμα:** Η προκύπτουσα απώλεια επιπέδου Γης είναι ανεξάρτητη από την συχνότητα ακτινοβολίας και εξαρτάται από:

- **Την απόσταση των δύο κεραιών:** μεγαλύτερη η απόσταση μεγαλύτερη η απώλεια
- **Το γινόμενο των υψών των δύο κεραιών:** μεγαλύτερο το γινόμενο, μικρότερη η απώλεια. Αυτό σημαίνει ότι εάν αυξήσουμε την διαφορά των υψών των κεραιών



ελαττώνουμε την απώλεια, επομένως είναι η βασική αρχή λειτουργίας της χωρικής διαφορικής λήψης χώρου (Space Diversity)

### 4.3 Μοντέλο ράδιο-κάλυψης Standard Propagation Model (SPM)

Τα δύο προηγούμενα μοντέλα απωλειών, το Free Space Loss και το Plane Earth Loss, βασίζονται σε βασικές αρχές φυσικής και οι μαθηματικοί τύποι που χρησιμοποιούνται έχουν βασικά δομικά σφάλματα εκτίμησης της απώλειας σε πραγματικές συνθήκες. Αυτό διότι στις πραγματικές συνθήκες διάδοσης στο περιβάλλον της επιφάνειας της Γης έχουμε πληθώρα γραμμικών και μη γραμμικών συνεισφορών όλων των φυσικών φαινομένων κυματικής διάδοσης (ανάκλαση, διάθλαση, περίθλαση, σκέδαση, από-πόλωση κτλ.) τα οποία δεν μπορούν να υπολογιστούν αναλυτικά από βασικές αρχές. Επομένως θα πρέπει να «φύγουμε» από τα μοντέλα αυτά και να πάμε στα ημι-εμπειρικά μοντέλα απωλειών, τα οποία βασίζονται σε μετρήσεις πεδίου οι οποίες θα προσαρμοστούν σε κάποιο βασικό μαθηματικό μοντέλο. Στα ημι-εμπειρικά μοντέλα υπάρχουν κάποιοι πολλαπλασιαστικοί συντελεστές βασικών παραμέτρων (ύψη κεραιών, συχνότητα λειτουργίας, απόσταση, απώλειες περίθλασης Fresnel, κτλ) καθώς και κάποιοι προσθετικοί παράγοντες οι οποίοι θα πρέπει να προσαρμοστούν στις τιμές μετρήσεων (curve fitting).

Ένα τέτοιο μοντέλο, ευρέως χρησιμοποιούμενο στην διεθνή βιβλιογραφία, είναι το προτεινόμενο Standard Pathloss Model (ή Standard Propagation Model), SPM [12]. Το μοντέλο αυτό εξήχθη ως μετεξέλιξη του βασικού εμπειρικού μοντέλου Hata και εφαρμόζεται για συχνότητες στο εύρος [150 MHz – 5000 MHz] και αποστάσεις [1 km – 20 km].

Ο μαθηματικός τύπος είναι ο ακόλουθος:

$$L_{SPM} = K_1 + K_2 \cdot \log(d) + K_3 \cdot \log(h_t) + K_4 \cdot Diff_{Loss} + K_5 \cdot \log(d) \cdot \log(h_t) + K_6 \cdot h_r + K_7 \cdot \log(h_r) + K_{clutter} \cdot f_{clutter} + K_{hill} \quad (4.13)$$

Όπου:

$K_1$  = Σταθερά αντιστάθμισης (Constant offset) σε dB

$K_2$  = Πολλαπλασιαστικός παράγοντας (Multiplying factor) της ποσότητας  $\log(d)$  όπου η απόσταση  $d$  μετριέται σε meters

$K_3$  = Πολλαπλασιαστικός παράγοντας (Multiplying factor) της ποσότητας  $\log(h_t)$

$h_t$  = Ύψος κεραίας πομπού συμπεριλαμβανομένου και του υψόμετρου του γεωγραφικού αναγλύφου (Effective transmitter antenna height) σε meters

$K_4$  = Πολλαπλασιαστικός παράγοντας (Multiplying factor) περίθλασης

$K_5$  = Πολλαπλασιαστικός παράγοντας (Multiplying factor) της ποσότητας  $\log d \cdot \log(h_t)$

$K_6$  = Πολλαπλασιαστικός παράγοντας (Multiplying factor) του ύψους του δέκτη  $h_r$  το οποίο συμπεριλαμβάνει και το υψόμετρο του γεωγραφικού αναγλύφου και μετράται σε meters

$K_7$  = Πολλαπλασιαστικός παράγοντας (Multiplying factor) της ποσότητας  $\log(h_r)$

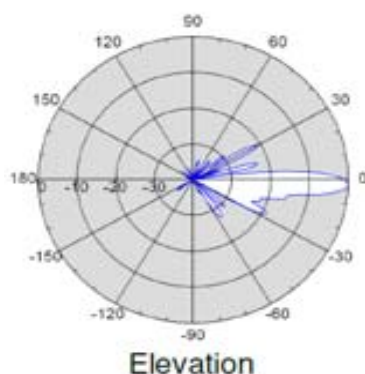
$K_{clutter}$  = Πολλαπλασιαστικός παράγοντας (Multiplying factor) της ποσότητας  $f_{clutter}$

$f_{clutter}$  = Μέση τιμή των σταθμισμένων απωλειών (Average of the weighted losses) λόγω των ατελειών και σφαλμάτων του γεωγραφικού αναγλύφου των χαρτών (clutter)

$K_{hill}$  = Διορθωτικός παράγοντας (Corrective factor) λοφώδους περιβάλλοντος (hilly regions)

## 4.4 Υπολογισμός κέρδους κεραίας εκπομπής σταθμού βάσης

Σύμφωνα με το 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο, η χρησιμοποιηθείσα κεραία του κέραιο-συστήματος SSPX310M με μέγιστο κέρδος ( $G_T$  antenna Gain) **18 dBi**, έχει το διάγραμμα ακτινοβολίας στο κάθετο επίπεδο ή αλλιώς επίπεδο Ανυψώσεως  $\varphi^\circ$  (elevation – tilt diagram), σχήμα 4.2:



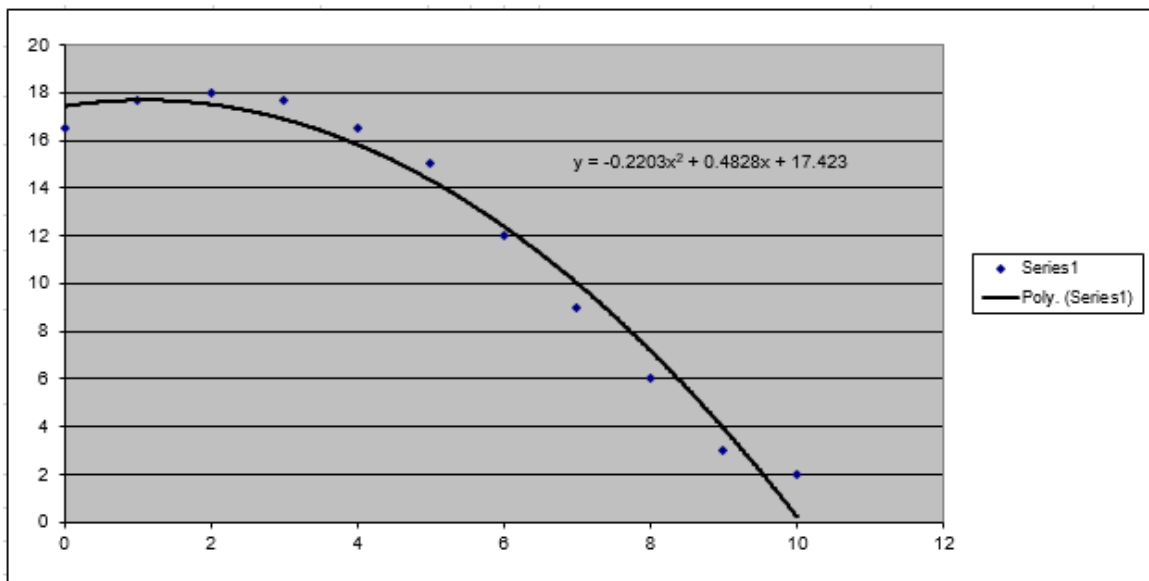
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας στο κάθετο επίπεδο Ανυψώσεως

Η αποτύπωση των τιμών της διαφοροποίησης του κέρδους-απολαβής της κεραίας ως συνάρτηση της γωνίας του επιπέδου Ανυψώσεως  $\varphi^\circ$  είναι η ακόλουθη (Πίνακας 4.1):

**Πίνακας 4.1:** Υπολογισμός κέρδους κεραίας συναρτήσει της γωνίας του επιπέδου Ανυψώσεως  $\varphi^\circ$

eNodeB GAIN Calculator	
angle antenna tilt	Gain [dB]
0	16.5
1	17.7
2	18
3	17.7
4	16.5
5	15
6	12
7	9
8	6
9	3
10	2

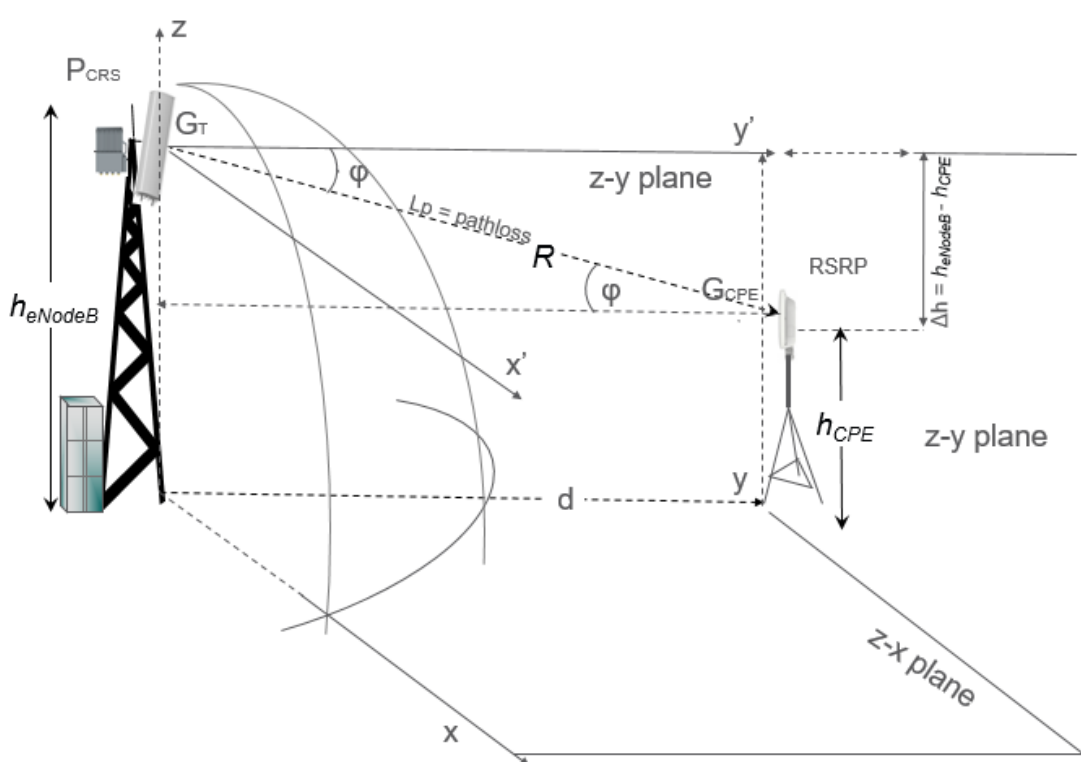
Η συνάρτηση η οποία περιγράφει την διαφοροποίηση του κέρδους της κεραίας ως συνάρτηση της γωνίας του του επιπέδου Ανυψώσεως  $\varphi^\circ$  είναι η ακόλουθη, σχήμα 4.3:



**Σχήμα 4.3:** Κέρδος κεραίας συναρτήσει της γωνίας του επιπέδου Ανυψώσεως  $\varphi^\circ$

$$G(\varphi) = -0.2203\varphi^2 + 0.4828\varphi + 17.423 \quad (4.14)$$

Η γωνία  $\varphi^\circ$  υπολογίζεται από την γεωμετρία του ακόλουθου σχήματος 4.4 στο κάθετο επίπεδο z-y:

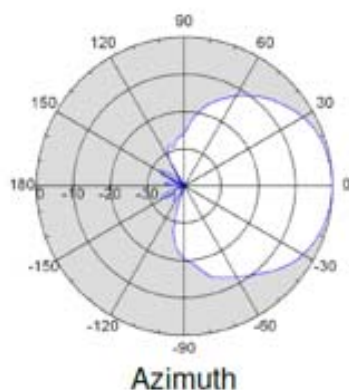


Σχήμα 4.4: Γεωμετρική παρουσίαση γωνίας ανύψωσης  $\varphi^\circ$

$$\sin(\varphi) = \frac{\Delta h}{R} \implies \varphi^\circ = \sin^{-1}\left(\frac{\Delta h}{R}\right)$$

(4.15)

Ομοίως, η χρησιμοποιηθείσα κεραία του κέραιο-συστήματος SSPX310M με μέγιστο κέρδος ( $G_T$  antenna Gain) **18 dBi**, έχει το διάγραμμα ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο ή αλλιώς επίπεδο Αζιμουθίου  $\theta^\circ$  (Azimuth diagram), σχήμα 4.5:



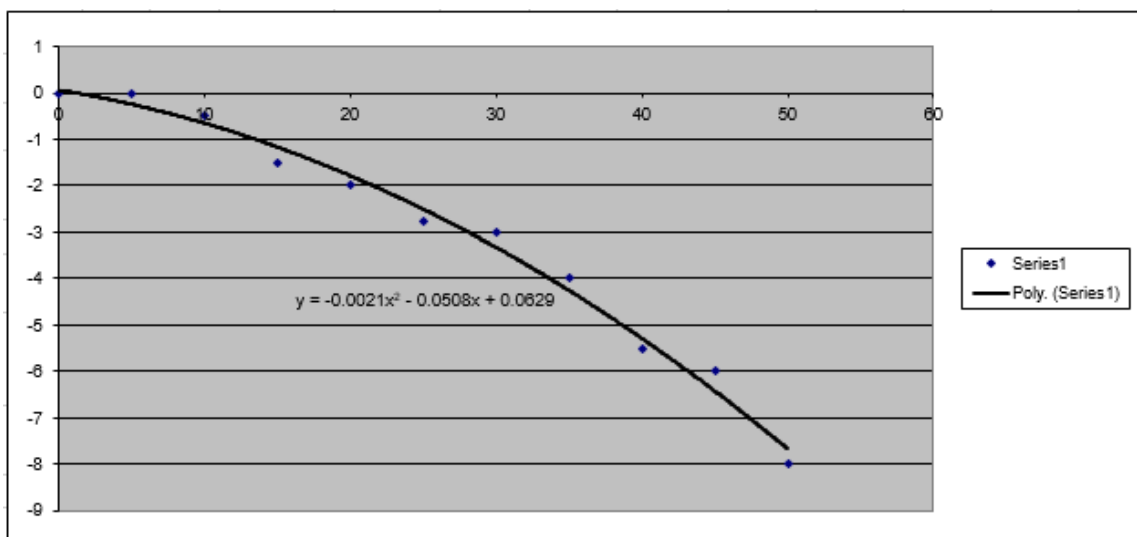
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας στο οριζόντιο επίπεδο ή αλλιώς επίπεδο αζιμουθίου  $\theta^\circ$

Η αποτύπωση των τιμών της διαφοροποίησης του κέρδους-απολαβής της κεραίας ως συνάρτηση της γωνίας του Αζιμουθίου  $\theta^\circ$ , σε σχέση με την μέγιστη απολαβή  $G_{max} = 18$  dB είναι, πίνακας 4.2:

**Πίνακας 4.2:** Υπολογισμός κέρδους κεραίας συναρτήσει της γωνίας του αζιμουθίου  $\theta^\circ$

eNodeB horizontal deviation factor	
horizontal angle deviation (degrees)	Gain [dB]
0	0
5	0
10	-0.5
15	-1.5
20	-2
25	-2.75
30	-3
35	-4
40	-5.5
45	-6
50	-8

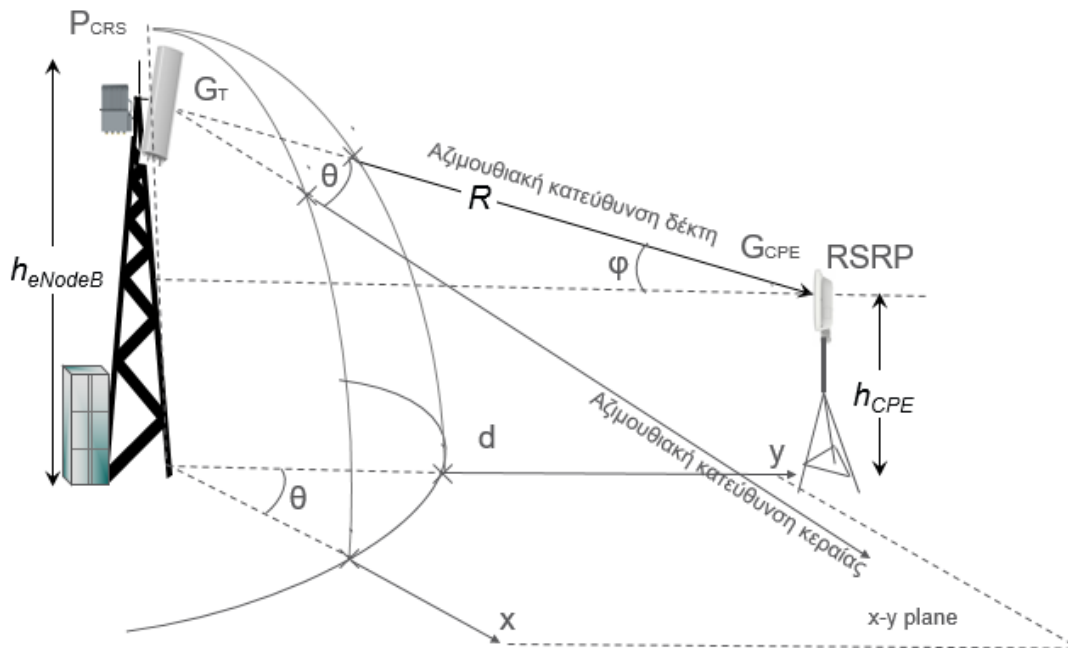
Η συνάρτηση η οποία περιγράφει την διαφοροποίηση του κέρδους της κεραίας ως συνάρτηση της γωνίας του Αζιμουθίου  $\theta^\circ$ , σε σχέση με την μέγιστη απολαβή  $G_{max} = 18$  dB είναι η ακόλουθη, σχήμα 4.6:



**Σχήμα 4.6:** Συνάρτηση κέρδους κεραίας συναρτήσει της γωνίας του αζιμουθίου  $\theta^\circ$ ,

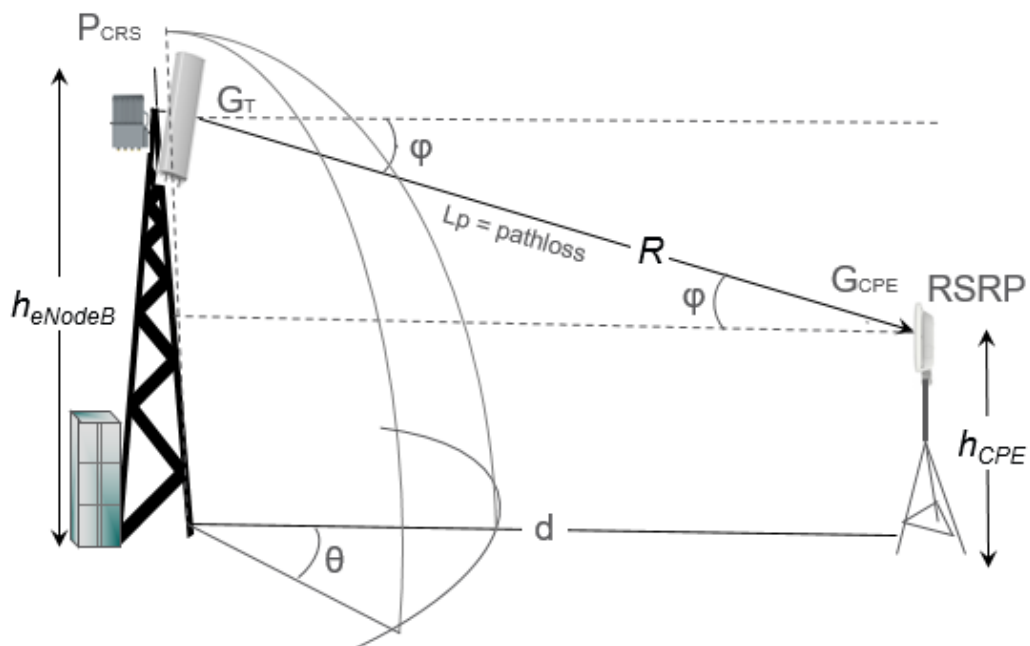
$$G(\theta) = G_{max} - 0.0021\varphi^2 - 0.0508\varphi + 0.0629 = 18 - 0.0021\varphi^2 - 0.0508\varphi + 0.0629$$

Η γωνία  $\theta^\circ$  υπολογίζεται από την αζιμουθιακή διαφορά της κατεύθυνσης της κεραίας σε σχέση με την θέση του σταθμού βάσης, στο επίπεδο εδάφους (οριζόντιο επίπεδο) x-y, σχήμα 4.7:



Σχήμα 4.7: Γεωμετρική παρουσίαση γωνίας αζιμουθίου  $\theta^\circ$

Συνοψίζοντας στο ακόλουθο σχήμα, οι γωνίες ανυψώσεως  $\varphi^\circ$  και αζιμουθίου  $\theta^\circ$  θα πρέπει να συνυπολογιστούν ώστε να υπολογίσουμε το συνολική κέρδος της κεραίας εκπομπής σε κάποια συγκεκριμένη θέση του εξοπλισμού του δέκτη στο τρισδιάστατο επίπεδο, σχήμα 4.8:



Σχήμα 4.8: Συνολική παρουσίαση γωνιών ανυψώσεως  $\varphi^\circ$  και αζιμουθίου  $\theta^\circ$

Η απόσταση της κεραίας από τον εξοπλισμό λήψης του πελάτη είναι σταθερή, ίση με R, επομένως ο υπολογισμός του κέρδους της κεραίας στο σημείο του δέκτη είναι:

$$G(\varphi, \theta) = |(-0.2203\varphi^2 + 0.4828\varphi + 17.423) - (18 - (-0.0021\varphi^2 - 0.0508\varphi + 0.0629))|$$

## 4.5 Συνθήκες Μερικής μη-Οπτικής Επαφής - Απώλειες λόγω φυλλωμάτων (foliage losses)

Στις περιπτώσεις μη-οπτικής επαφής λόγω φυλλωμάτων δέντρων και βλάστησης στην Rural περιοχή, στην διεθνή βιβλιογραφία χρησιμοποιείται ευρέως η προδιαγραφή της ITU-R P.833-7 [27] η οποία προτείνει ένα μοντέλο διάδοσης δέκτη εντός φυλλωμάτων και δασώδους περιοχής σε συνθήκες διάδοσης Γήινης επιφανείας (terrestrial oath with one terminal in woodland).

Ο υπολογισμός των επιπλέον απωλειών (excessive attenuation) λόγω φυλλωμάτων πρέπει ΠΑΝΤΑ να προστίθεται (εάν χρησιμοποιούμε μονάδα [dB]) στις άλλες απώλειες όπως ελευθέρου χώρου, Fresnel κτλ.

Το μοντέλο αναλυτικού υπολογισμού των επιπλέον απωλειών είναι το ακόλουθο:

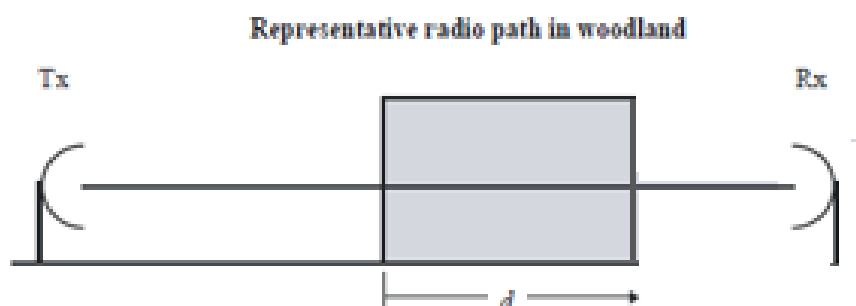
$$L_{fol} = d \cdot \gamma \tag{4.16}$$

Όπου:

d [m]: είναι η απόσταση του δέκτη από τον πομπό διαμέσου των φυλλωμάτων

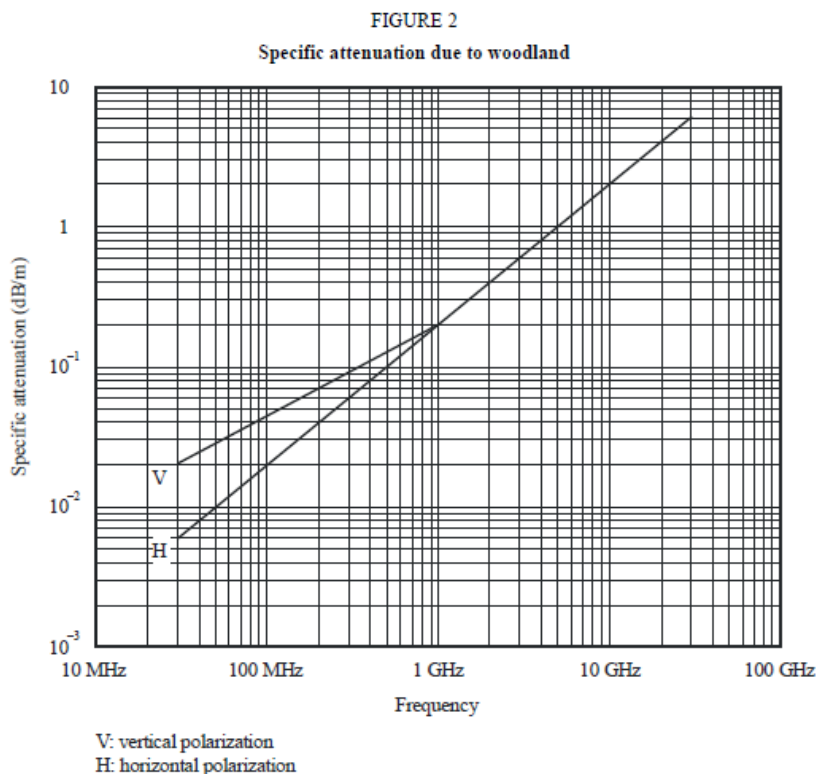
γ [dB/m]: ειδικός συντελεστής απωλειών (specific attenuation) για μικρής απόστασης δασώδους περιοχή

Η επεξήγηση των παραμέτρων του μοντέλου παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα 4.9:



Σχήμα 4.9: Περίπτωση μη-οπτικής επαφής λόγω φυλλωμάτων, προδιαγραφή ITU-R P.833-7

Ο ειδικός συντελεστής απωλειών (specific attenuation coefficient) για μικρής απόστασης δασώδους περιοχή εξαρτάται από την συχνότητα λειτουργίας. Η ITU δίδει τυπικές τιμές του ειδικού συντελεστή  $\gamma$  συναρτήσει της συχνότητας στο ακόλουθο σχήμα 4,10:



**Σχήμα 4.10:** Σχέση ειδικού συντελεστή  $\gamma$  συναρτήσει της συχνότητας λειτουργίας

Οι τυπικές τιμές θα πρέπει να αναπροσαρμοστούν στην περίπτωση όπου έχουμε δέντρα με μερικά φυλλώματα (τυπικές περιπτώσεις χειμώνα), όπου οι τιμές θα πρέπει να πολλαπλασιαστούν με τον συντελεστή 0.8.

Επομένως, στην περίπτωση πλήρους δασώδους κάλυψης στην συχνότητα λειτουργίας των 3,6-3,8 GHz ο ειδικός συντελεστής παίρνει την τιμή  $\gamma = 0,8 \text{ dB/m}$ , ενώ στην περίπτωση δέντρων και δασώδους περιοχής με συνδυασμό φυλλωμάτων και κλαριών (φυλλοβόλα δέντρα) στην συχνότητα λειτουργίας των 3.6-3.8 GHz ο ειδικός συντελεστής παίρνει την τιμή  $\gamma = 0,8 \times 0,8 \text{ dB/m} = 0,64 \text{ dB/m}$ .

Επομένως, ο υπολογισμός της απώλειας διάδοσης περιλαμβάνει και τις επιπλέον απώλειες φυλλωμάτων ως ακολούθως:

$$L_T = \max(L_p, L_{PEL}) + L_{foll} \quad (4.17)$$



Θεωρούμε ότι είναι πάρα πολύ δύσκολο για κάποιον σχεδιαστή δικτύου να μπορέσει να υπολογίζει την απώλεια  $L_{fol}$  βάσει των παραμέτρων  $d$  και  $\gamma$ , όπως έχουν προαναφερθεί. Αυτό διότι σε περιπτώσεις σχεδιασμού δικτύου ενδέχεται να υπάρχουν πολλαπλές απώλειες από συστάδες δέντρων και θάμνων, οι οποίες καθιστούν δύσκολη έως αδύνατη τον αναλυτικό υπολογισμό τους. Επομένως στην παρούσα εργασία θα προσαρμόσουμε το γενικευμένο μοντέλο απωλειών SPM σε πεδιομετρήσεις όπου θα συμπεριλάβουμε και τις επιπλέον απώλειες  $L_{fol}$  του προτύπου της ITU-R P.833-7 [27] στην περίπτωση της συχνότητας 3,6 – 3,8 GHz, Από την ανάλυση των μετρήσεων του κεφαλαίου 5 θα προκύψει ένας γενικευμένος τύπος υπολογισμού απωλειών με έναν συντελεστή επιπλέον απώλειας φυλλωμάτων που πρέπει να υπολογίζει ένας σχεδιαστής δικτύου στην συχνότητα των 3,6 GHz.

## 4.6 Συνθήκες Μερικής ή ολικής μη-Οπτικής Επαφής – Απώλειες Knife-Edge

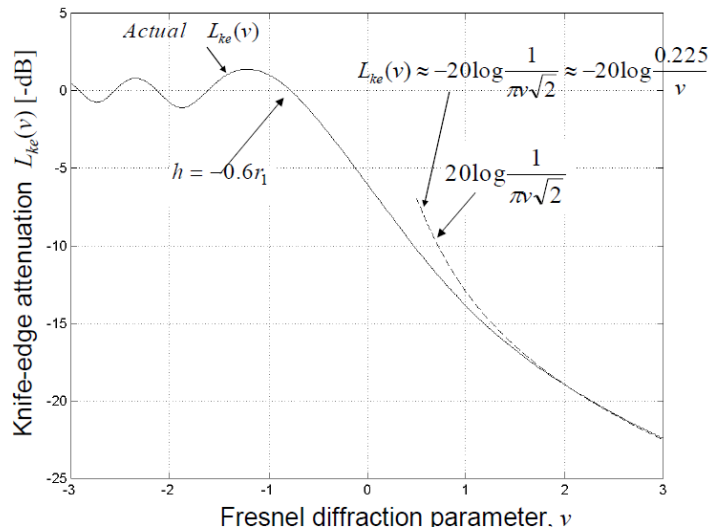
Στις περιπτώσεις μερικής απώλειας (ολικής ή μερικής μη-οπτικής επαφής), όπου το εμπόδιο βρίσκεται σε απόσταση  $h_1$  από τον πομπό του σταθμού και  $h_2$  από τον δέκτη, έχουμε την διάδοση της ακτινοβολίας λόγω φαινομένων περίθλασης και την προκύπτουσα απώλεια της ακτινοβολούμενης ισχύς λήψης λόγω της σκίασης της πρώτης (κατά κύριο λόγο στον σχεδιασμό του δικτύου) ζώνης Fresnel.

Η περίθλαση είναι ένα φυσικό φαινόμενο της διάδοσης των κυμάτων. Είναι μία από τις περιπτώσεις στις οποίες η Ήλεκτρο-Μαγνητική ακτινοβολία εκτρέπεται από την ευθεία πορεία διάδοσης της όταν συναντήσει μία εμπόδιο συγκρίσιμο με το μήκος κύματος της και καμπυλώνει πίσω από το εμπόδιο. Σύμφωνα με την αρχή του Huygens, η διάδοση ενός κύματος παρουσία ενός εμποδίου αιχμής θα οδηγήσει σε φαινόμενα περιθλάσεως πίσω από το εμπόδιο. Αυτό καλείται περίθλαση αιχμής (**knife-edge diffraction**). Βασική προϋπόθεση είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας να είναι συγκρίσιμο με τις διαστάσεις της αιχμής του εμποδίου.

Η μετάδοση μέρους της ακτινοβολίας πίσω από το εμπόδιο εκλαμβάνεται ως απώλεια ισχύος και δίδεται από τον τύπο:

$$L_{ke}(v)[dB] = -20 \log \left( \left| \frac{E_d}{E_i} \right| \right) = -20 \log (|F(v)|) \quad (4.18)$$

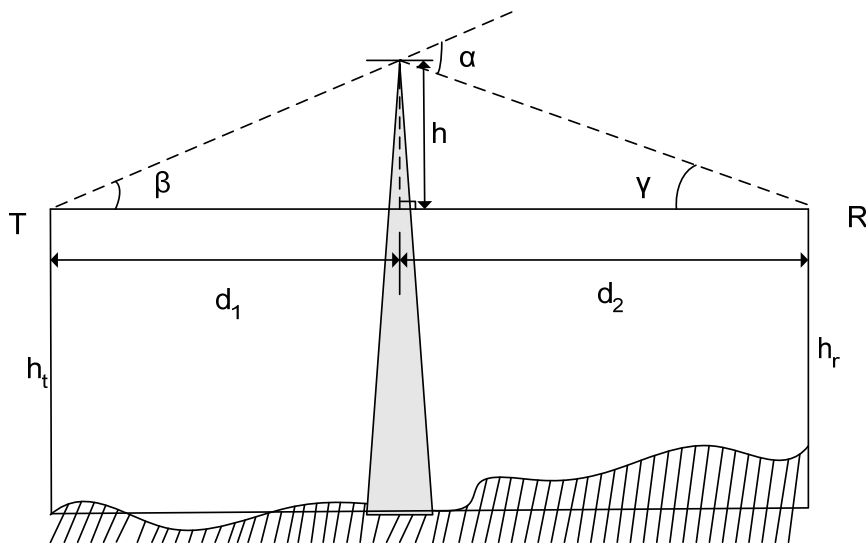
Όπου η τιμή της συνάρτησης  $F(v)$  [2] υπολογίζεται και δίδεται από την γραφική παράσταση του σχήματος 4.11



**Σχήμα 4.11:** Υπολογισμός τιμής της συνάρτησης  $F(v)$

Το ζητούμενο είναι να υπολογίσουμε την τιμή της παραμέτρου  $v$ .

Θεωρούμε ένα πομπό (T) και ένα δέκτη (R) σε περιβάλλον ελεύθερου χώρου και τα ύψη των δύο κεραιών να είναι κατά προσέγγιση ίσα [14], όπως στο ακόλουθο σχήμα 4.12:



**Σχήμα 4.12:** Υπολογισμός συντελεστών περίθλασης από κορυφή (knife Edge) με ίσα ύψη κεραιών

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 το δέκτη, η δε οριζόντια απόσταση του εμποδίου είναι  $d_1$  από τον πομπό και  $d_2$  από το δέκτη.

Θεωρούμε κατ' αρχήν την απ' ευθείας ζεύξη  $TR = d_1 + d_2$  καθώς και την περιθλώμενη ζεύξη:

$$TRP = \sqrt{d_1^2 + h^2} + \sqrt{d_2^2 + h^2} \quad (4.19)$$

Επομένως μπορούμε να υπολογίσουμε τη διαφορά διαδρομών ως εξής:

$$\Delta = \sqrt{d_1^2 + h^2} + \sqrt{d_2^2 + h^2} - d_1 - d_2 \quad (4.20)$$

Στις περισσότερες περιπτώσεις ισχύει με μεγάλη ακρίβεια οπότε  $h \ll d_1$ ,  $h \ll d_2$ . Επιπλέον για την περίπτωση της τετραγωνικής ρίζας μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το διωνυμικό ανάπτυγμα ως εξής:

$$\sqrt{d_1^2 + h^2} = \sqrt{d_1^2 \left(1 + \frac{h^2}{d_1^2}\right)} = d_1 \sqrt{1 + \frac{h^2}{d_1^2}} \approx d_1 \left(1 + \frac{h^2}{2d_1^2}\right)$$

Επομένως, η διαφορά δρόμων  $\Delta$  μεταξύ της «διαδρομής περίθλασης» και της υποθετικής, εάν υπήρχε, διαδρομής άμεσης οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη (LoS) υπολογίζεται από τον τύπο :

$$\begin{aligned} \Delta &= \sqrt{d_1^2 + h^2} + \sqrt{d_2^2 + h^2} - d_1 - d_2 = d_1 + \frac{h^2}{2d_1} + d_2 + \frac{h^2}{2d_2} - d_1 - d_2 \Rightarrow \\ \Delta &= \frac{h^2}{2d_1} + \frac{h^2}{2d_2} \Rightarrow \Delta = \frac{h^2}{2} \cdot \frac{(d_1 + d_2)}{d_1 \cdot d_2}. \end{aligned} \quad (4.21)$$

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

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

Γενικά για οποιαδήποτε τιμή  $\Delta = n \frac{\lambda}{2}$  έχουμε:

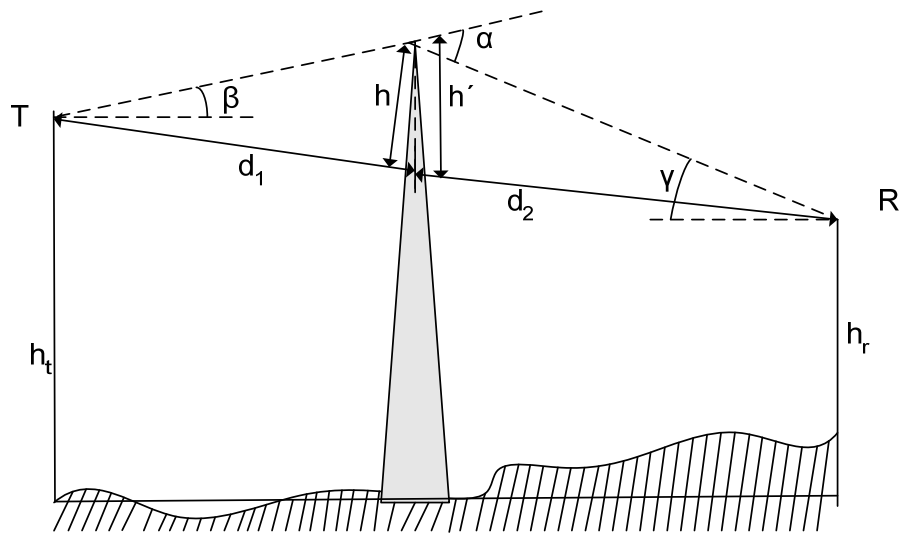
$$\varphi = k\Delta = \frac{2\pi \cdot \Delta}{\lambda} = n\pi, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Οπότε:

$$n\pi = \frac{\pi}{\lambda} \cdot h^2 \cdot \frac{(d_1 + d_2)}{d_1 \cdot d_2} \Rightarrow h_F = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (4.22)$$

Σχετικά με τις τιμές της παραμέτρου  $n$ , για άρτιες τιμές  $n$  θα έχουμε δημιουργική συμβολή ενώ για περιττές τιμές του  $n$  θα έχουμε καταστρεπτική συμβολή.

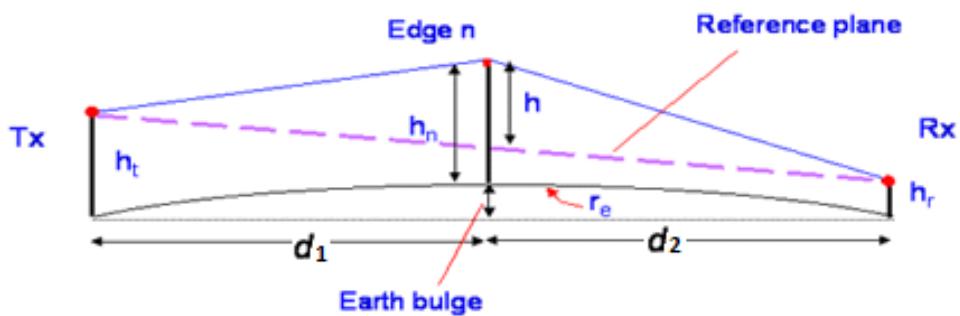
Αν η κεραίες εκπομπής - λήψης έχουν διαφορετικά ύψη, σχήμα 4.13 προκύπτει άμεσα ότι, αν  $\tan x = x$  που συμβαίνει για μικρές τιμές του  $x$ , τότε  $a = \beta + \gamma$  και η γωνία  $\alpha$  προκύπτει από τη σχέση  $a = h \cdot \frac{(d_1 + d_2)}{d_1 \cdot d_2}$ , [14]:



**Σχήμα 4.13:** Υπολογισμός συντελεστών περίθλασης από κορυφή (Knife Edge) με διαφορά υψών κεραιών

Μία πιο απλή έκφραση προκύπτει εάν χρησιμοποιήσουμε την αδιάστατη παράμετρο Fresnel – Kirchoff η οποία ορίζεται από τη σχέση :

$$v = h \cdot \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda \cdot d_1 \cdot d_2}} \quad (4.23)$$



$$h \approx h_n + \frac{d_1 d_2}{2r_e} - \frac{h_t d_2 + h_r d_1}{d_1 + d_2} \quad v = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}}$$

$$J(v) = 6.9 + 20 \log(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1) \text{ for } v \geq -0.7$$

**Σχήμα 4.14:** Επεξήγηση αδιάστατης παραμέτρου Fresnel – Kirchoff v

Στο σχήμα σχήμα 4.14 το ύψος h στην παραπάνω σχέση δίδεται από τον τύπο:

$$h \approx h_n + \frac{d_1 \cdot d_2}{2 \cdot r_e} - \frac{h_t \cdot d_2 + h_r \cdot d_1}{d_1 + d_2} \quad (4.24)$$

όπου:

- $h_n$  είναι το ύψος το εμποδίου, όπως αποτυπώνεται στο σχήμα 4.14

- $r_e$  είναι η απόσταση του τόξου της Γήινης επιφανείας σε σχέση με την απόσταση πομπού-δέκτη

Επομένως, εφόσον  $v > -0.7$  προκύπτει ο προσεγγιστικός τύπος απωλειών knife-edge:

$$L_{ke}(v)[dB] \approx -20 \log \left( \frac{0.225}{v} \right) \approx 6.9 + 20 \log \left( \sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right) \quad (4.25)$$

Επομένως, ο τελικός υπολογισμός της απώλειας διάδοσης περιλαμβάνει και τις επιπλέον απώλειες Fresnel knife-edge και ο τύπος υπολογισμού του path-loss υπολογίζεται κατά περίπτωση ως ακολούθως:

$$L_T = \max(L_p, L_{PEL}) + L_{foll} + L_{ke}(v)$$

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

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

Οι παραπάνω σχέσεις δείχνουν ότι η διαφορά φάσης  $\varphi$  εξαρτάται από το ύψος και τη θέση του εμποδίου καθώς και από τη θέση και απόσταση του πομπού και του δέκτη. Πράγματι:

- εάν το εμπόδιο είναι υψηλότερο από την ευθεία διαδρομή της ζεύξης (LoS), τότε  $h$  είναι θετικό και  $v$  θετικό.
- Εάν  $h=0$  τότε έχουμε  $v = 0$  και επομένως  $\varphi = 0^\circ$ .
- Τέλος εάν το εμπόδιο είναι χαμηλότερα από τη LoS ζεύξη, συνήθως συνθήκη που ισχύει στην περίπτωση επίγειων ζεύξεων, τότε  $h < 0$  και συνεπώς  $v < 0$ .

# Κεφάλαιο 5

## Εξαγωγή Μοντέλου Απωλειών Διάδοσης

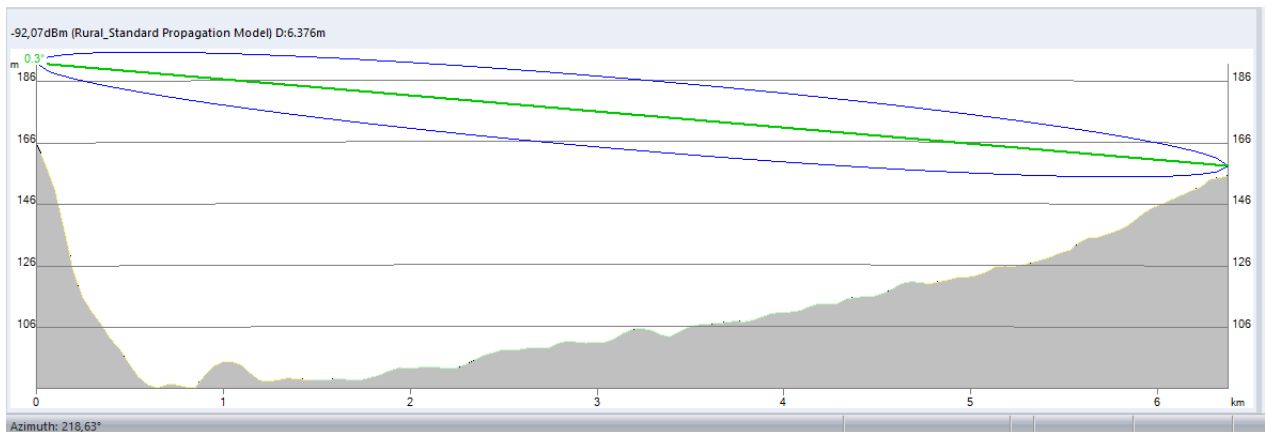
### 5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε μία αναλυτική προσέγγιση των μετρήσεων ράδιο-κάλυψης, οι οποίες επιτελέστηκαν σε διάφορες αγροτικές περιοχές της Ελλάδος υπό την ράδιο-κάλυψη διαφόρων σταθμών βάσεως. Ο αντικειμενικός σκοπός των μετρήσεων ήταν η εξαγωγή ενός ημι-εμπειρικού μοντέλου απωλειών (semi-empirical path-loss model), βασισμένου κατά κύριο λόγο στο γνωστό και ευρέως αποδεκτό μοντέλο SPM της διεθνής βιβλιογραφίας, όπως περιεγράφηκε ήδη στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο.

Η διαδικασία εκτέλεσης των μετρήσεων βασίστηκε στην αξιολόγηση της ράδιο-κάλυψης υπό συνθήκες οπτικής επαφής (LoS) και μη-οπτικής επαφής (NLoS):

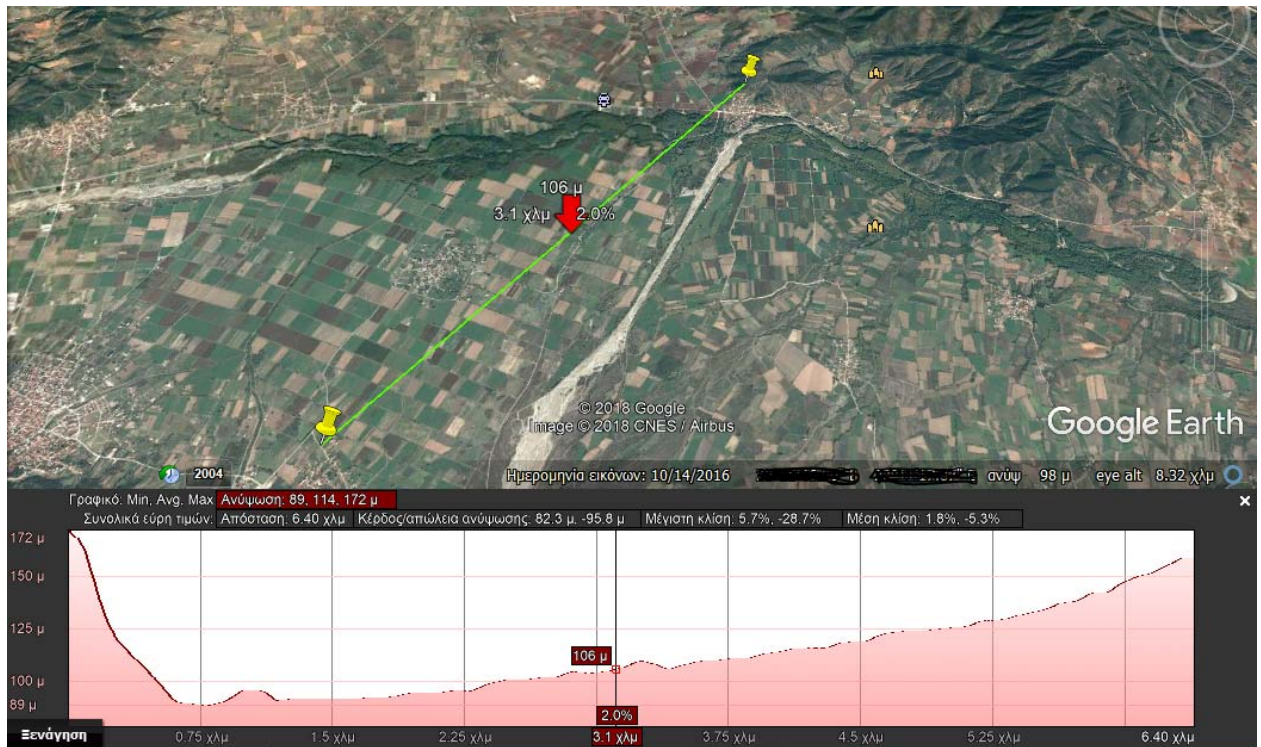
- **LoS εκτελεσθείσες μετρήσεις:** έγιναν σε γεωγραφικό ανάγλυφο το οποίο παρουσίαζε καθαρή οπτική επαφή ράδιο-κάλυψης, απουσία κάποιου φυσικού (λόφος, δέντρα,

φυλλώματα) ή τεχνητού εμποδίου (οικίες, αγροικίες, άγρο-κατοικίες) το οποίο θα δημιουργούσε συνθήκες απωλειών λόγω σκίασης (shadowing) ή ακόμη και συνθήκες μερικής ράδιο-κάλυψης λόγω περίθλασης (Fresnel). Η θέση του σταθμού βάσης και του εξοπλισμού λήψης του πελάτη είναι σε κατάλληλο ύψος ώστε να παρέχουν τις συνθήκες οπτικής επαφής, όπως φαίνεται στην ακόλουθη Σχήμα 5.1, όπου παρουσιάζεται το ανάγλυφο ράδιο-κάλυψης στο λογισμικό σχεδιασμού.



**Σχήμα 5.1:** Γεωγραφικό ανάγλυφο περιοχής μετρήσεων ράδιο-κάλυψης LoS

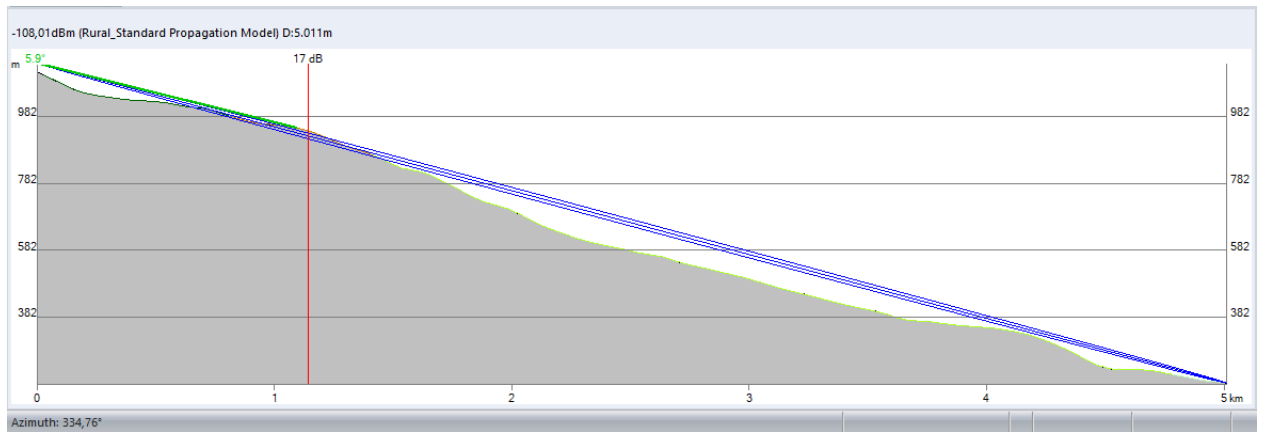
Ο σταθμός βάσης βρίσκεται σε συνολικό υψόμετρο 192 m (γεωγραφικό υψόμετρο 166 m και υψόμετρο κέραιο-συστήματος στον πυλώνα 26 m). Αντιστοίχως, η μονάδα λήψης του πελάτη (CPE) βρίσκεται σε υψόμετρο 153 m (γεωγραφικό υψόμετρο 150 m και υψόμετρο δέκτη CPE 3 m). Επομένως οι αναμενόμενες απώλειες είναι μόνον απώλειες διαδρομής λόγω της απόστασης σταθμού βάσης (πομπός) και εξοπλισμού λήψης μονάδος CPE (δέκτης). Το σημείο μέτρησης που παρουσιάσαμε στο σχήμα 5.1 είναι σε απόσταση 6,4 km όπως φαίνεται η αποτύπωση του στο λογισμικό Google Earth, όπου η πράσινη γραμμή αποτυπώνει την LoS επιβατική ακτίνα ράδιο-κάλυψης σε απόσταση 6,4 km, σχήμα 5.2. Στις μετρήσεις εν γένει η απόσταση μέτρησης εκτάθηκε μέχρι τα 13 km διότι στον συγκεκριμένο εξοπλισμό του σταθμού βάσης είχε ενεργοποιηθεί άδεια λογισμικού (software license) λειτουργίας έως τα 13 km.



Σχήμα 5.2: Παρουσίαση σημείου μέτρησης LoS στο Google Earth

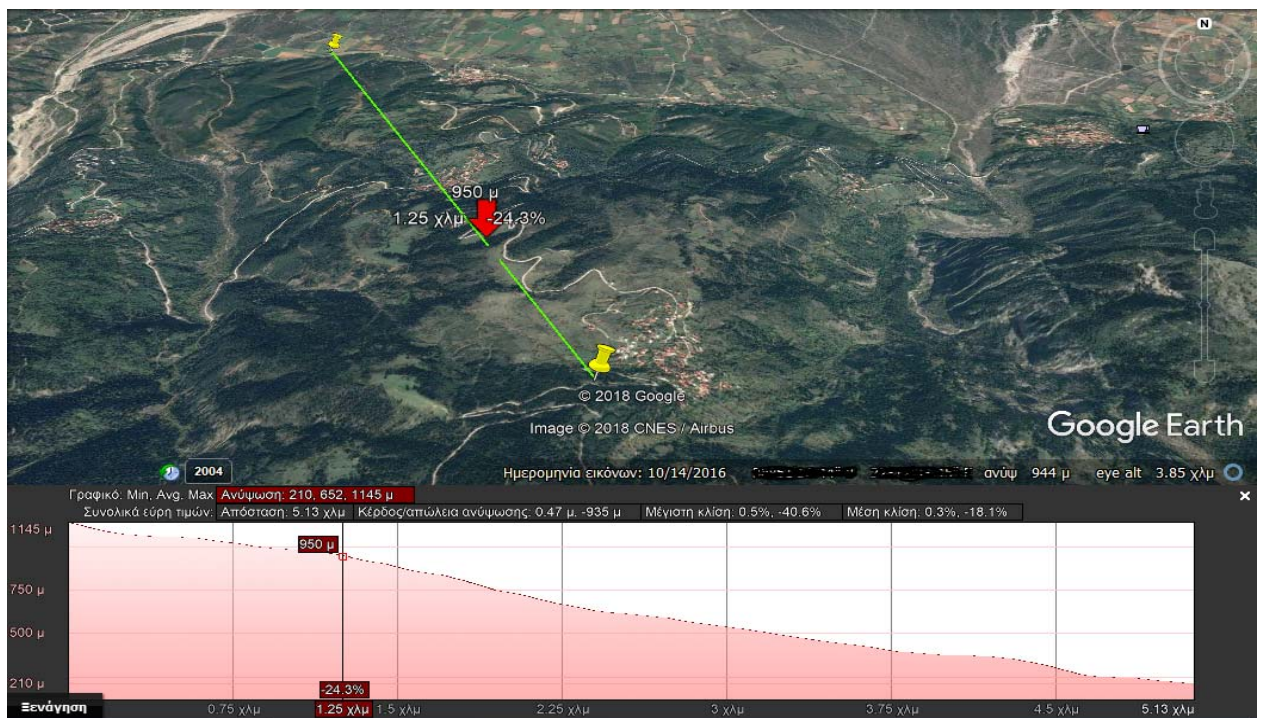
- **NLoS μετρήσεις:** επιτελέστηκαν με την απαιτούμενη μελέτη του γεωγραφικού αναγλύφου ώστε να υπάρχουν συνθήκες:
  - απωλειών χλωρίδας μη-οπτικής επαφής λόγω εμποδίων φυλλωμάτων, κλαδιών και ευρύτερων περιοχών δασών-δέντρων στην οπτική επαφή. Οι περιοχές αυτές ορίζουν συνήθως έναν επιπλέον παράγοντα απωλειών ισχύος λήψης, τον οποίο αποκαλούμε foliage loss,  $L_{fol}$  και παρουσιάστηκε στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο της παρούσης μεταπτυχιακής διατριβής. Ο συντελεστής αυτός θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν ως επιπλέον συντελεστής απωλειών στο ημι-εμπειρικό μοντέλο απωλειών χώρου στην συχνότητα των 3,6-3,8 GHz
  - απωλειών περίθλασης μη-οπτικής επαφής σε περιοχές κυρίως πίσω από λόφους, ή αγροικίες και οικίες οι οποίες εμποδίζουν παντελώς την οπτική επαφή και την διάδοση του σήματος. Σε τέτοιες περιοχές μετρήσεων αναμένουμε να έχουμε απώλειες ραδιο-κάλυψης λόγω φαινομένων Fresnel όπου η αναμενόμενη ραδιο-διάδοση είναι κυρίως αποτέλεσμα περιθλάσεων και εν μέρει ανακλάσεων λόγω γειτονικών εμποδίων. Στην ακόλουθη σχήμα 5.3 φαίνεται η σκίαση λόγω του λοφώδους γεωγραφικού αναγλύφου στο λογισμικό σχεδιασμού με εμφανή την απώλεια περίθλασης Fresnel 17dB. Η απόσταση του σταθμού βάσης από το σημείο μέτρησης του δέκτη είναι 5 km.





**Σχήμα 5.3:** Γεωγραφικό ανάγλυφο περιοχής μετρήσεων ράδιο-κάλυψης NLoS με απώλειες περίθλασης Fresnel.

Σημαντική παράμετρος σε αυτήν την περίπτωση είναι και η απόσταση του εμποδίου από τον σταθμό βάσης  $r_1 = 1.25$  km, καθώς και από το σημείο εκτέλεσης της μέτρησης  $r_2 = 3,75$  km, όπως παρουσιάζεται η διακεκομμένη πράσινη γραμμή στην σχήμα 5.4.



**Σχήμα 5.4:** Παρουσίαση σημείου μέτρησης NLoS με Fresnel στο Google Earth

Ο επιπλέον παράγοντας απόσβεσης ονομάζεται Diffraction Loss ( $Diff_{Loss}$ ), έχει ήδη παρουσιαστεί στο μοντέλο SPM καθώς και έχει επαρκώς αναλυθεί στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο.

## 5.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Παραμέτρων Εξοπλισμού των Μετρήσεων

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιάσουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά των παραμέτρων του εξοπλισμού των μετρήσεων, τα οποία θα χρησιμοποιήσουμε σε αυτό το κεφάλαιο για να κάνουμε μία εκτίμηση του προϋπολογισμού ισχύος (link budget) με απώτερο σκοπό να εκτιμήσουμε την απώλεια διαδρομής (path loss).

Ο σταθμός βάσης, τεχνολογίας Huawei, όπως προαναφέρθηκε βασίζεται στην τεχνολογία DBS3900 με την χρήση εξοπλισμού Distributed RAN (D-RAN). Σε αυτήν την αρχιτεκτονική η μονάδα baseband βρίσκεται εντός του οικίσκου, στο Rack του σταθμού βάσης, ενώ η μονάδα ράδιο-επικοινωνίας (radio unit) βρίσκεται κοντά στην κεραία εκπομπής πάνω στον πυλώνα και καλείται Radio Remote Unit (RRU).

Η χρησιμοποιηθείσα μονάδα ράδιο-επικοινωνίας είναι η RRU3278, έχει οκτώ πόρτες εξόδου και διασυνδέεται σε δύο κεραίες 4x4 (τεχνολογία spatial multiplexing 4x4 MIMO) SSPX310M με τέσσερις πόρτες εισόδου σε κάθε κεραία. Κάθε μία τέτοια κεραία καλύπτει μία περιοχή ράδιο-κάλυψης την οποία καλούμε κυψέλη ή sector. Επιπλέον κάθε πόρτα εξόδου της μονάδος RRU3278 έχει έναν RF ενισχυτή ισχύος (power Amplifier, PA) ο οποίος παρέχει ισχύ 10 Watts σε κάθε πόρτα εισόδου της κεραίας λειτουργίας SSPX310M. Ο αναγνώστης μπορεί να αναφερθεί στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο όπου παρουσιάζονται αναλυτικά τα τεχνικά εγχειρίδια λειτουργίας της μονάδος RRU3278 και της κεραίας.

Το κεραιο-σύστημα (κεραία και εξωτερική RF μονάδα RRU3278) βρίσκεται σε έναν πυλώνα ο οποίος έχει ύψος 30 μέτρα, και κατά την διάρκεια των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε έναν τρίποδο ύψους 3 m για να εγκαταστήσουμε την μονάδα λήψης CPE eA380-135.

Συνοψίζοντας τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κεραιο-συστήματος του πομπού και του δέκτη, στα οποία ο αναγνώστης μπορεί να αναφερθεί εν γένει στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο, είναι τα ακόλουθα:

- Μέγιστη απολαβή-κέρδος κεραίας SSPX310M ( $G_T$  antenna Gain): **18 dBi**
- MIMO rank: **4x4 MIMO (4T1R)** καθώς ο δέκτης της μονάδος CPE έχει μία κεραία λήψης και επομένως στο downlink λειτουργεί ως διαφορεική εκπομπή **Tx diversity**
- Ηλεκτρικό tilt: **+2°**
- Συνολική ισχύς εκπομπής RF μονάδος RRU3278: **40 Watts**
- Ισχύς εκπομπής μονάδος RRU3278 ( $P_{RRU}$ ) ανά πόρτα κεραίας: **10 Watts/antenna port**
- Απώλειες κυματοδηγού/feeder: **0 dB**

- Συχνότητα λειτουργίας: **3.6-3.8 GHz**
- Μέγιστη απολαβή-κέρδος κεραίας μονάδος δέκτη CPE ( $G_{CPE}$  antenna Gain): **13 dBi**
- Ευαισθησία μονάδος λήψης CPE eA380-135, διαμόρφωση QPSK,  $S_{CPE}$ : **-94 dBm/20 MHz**
- Φασματικό εύρος λειτουργίας καναλιού (channel Bandwidth) BW: **20 MHz**
- Ύψος τοποθέτησης κεραίας eNodeB στον πυλώνα: **26 m**
- Ύψος εξοπλισμού δέκτη CPE στο τρίποδο: **3 m**

## 5.3 Υπολογισμός Ισχύος εκπομπής των Cell Specific Reference Signals

Σύμφωνα με το 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο, ενότητα 2.5, η μετρήσιμη ποσότητα την οποία χρησιμοποιεί η μονάδα λήψης του χρήστη στην κάτω ζεύξη είναι η ισχύς των σημάτων αναφοράς reference signals (CRS), η αποκαλούμενη και ισχύς λήψης Reference Signal Received Power RSRP, [20].

Τα σήματα αναφοράς στην κάτω ζεύξη αποτελούνται από τα αποκαλούμενα σύμβολα αναφοράς (reference symbols) τα οποία είναι γνωστές ακολουθίες Zadoff-Chu από σύμβολα τα οποία τοποθετούνται σε συγκεκριμένες θέσεις στο πλαίσιο χρόνου-συχνοτήτων του OFDM [14]. Αυτά τα σήματα αναφοράς χρησιμοποιούνται από τον εξοπλισμό του πελάτη (CPE) στην λήψη της κάτω ζεύξης για τις:

- διαδικασίες μέτρησης όντας σε σύνδεση (connected mode μέτρηση ισχύος σήματος λήψης RSRP καθώς και ποιότητας επικοινωνίας RSRQ για σκανδαλισμό-ενεργοποίηση συγκεκριμένων βασικών και προαιρετικών λύσεων (radio feature triggering) κτλ,
- μετρήσεις ισχύος και ποιότητας σε κατάσταση αδρανής (idle mode μετρήσεις για αποφάσεις επιλογής και αλλαγής κυττάρου – cell selection & reselection),
- μετρήσεις ισχύος και ποιότητας για την εξαγωγή τιμών παραμέτρων κατωφλίου διαδικασιών handovers (mobility measurements),
- διαδικασίες σύμφωνης αποδιαμόρφωσης της πληροφορίας (coherent demodulation) όπου η φορητή συσκευή υπολογίζει την χρονική καθυστέρηση και την διαφορά φάσης σήματος λήψης ώστε να μπορέσει να συγχρονιστεί με το ρολόι του πομπού και να αποδιαμορφώσει την πληροφορία συγχρονισμένα (synchronous demodulation heterodyne receiver),
- εκτίμηση της ποιότητας του καναλιού επικοινωνίας (Channel Quality Estimation). Ειδικά η εκτίμηση της ποιότητας καναλιού εκτιμάται – υπολογίζεται στην φορητή συσκευή και

αποστέλλεται ως αναφορά μέτρησης (Channel Quality Index – CQI) από την φορητή συσκευή στην άνω ζεύξη ώστε να χρησιμοποιηθεί από τον MAC scheduler και την μονάδα Link Adaptation του eNodeB στην απόφαση scheduling.

Τα πρότυπα της 3GPP έχουν προκαθορίσει τα σήματα αναφοράς να ονομάζονται και cell-specific reference signals. Αυτές οι ακολουθίες των cell – specific reference signals είναι ακολουθίες gold με μήκος 31 bits οι οποίες δημιουργούνται από δύο ακολουθίες m-sequences. Η μία εκ των δύο ακολουθιών παράγεται από την ταυτότητα PCI του κυττάρου και εφόσον έχουμε συνολικά 504 διαφορετικές ακολουθίες PCI θα υπάρχουν συνολικά 504 διαφορετικές ακολουθίες cell-specific reference signals.

Ο μέγιστος αριθμός των cell-specific reference signal είναι τέσσερα σε κάθε TTI slot ή οκτώ συνολικά σε ένα subframe χρονικής διάρκειας 1 ms.

Αυτό ισχύει για την περίπτωση που έχουμε μία κεραία (σύστημα SISO). Αν έχουμε στο φυσικό κανάλι περισσότερες από μία κεραία (MIMO με διαφορετικό τεχνικό σχεδιασμό) τότε σύμφωνα με τα πρότυπα έχουμε το μέγιστο οκτώ σήματα αναφοράς σε κάθε φυσικό κανάλι κεραίας. Ο υπολογισμός της ισχύος εκπομπής ενός τέτοιου σήματος αναφοράς CRS βασίζεται στην ισχύ εκπομπής του ενισχυτή PA της μονάδος RRU ( $P_{PA}$ ) σε κάθε μία πόρτα της κεραίας. Η ισχύς αυτή, όπως έχει προαναφερθεί, είναι 10 watts και θα πρέπει να υποδιαιρεθεί σε κάθε Resource Element (RE), όπως αυτό επεξηγήθηκε στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο, ώστε να αντιστοιχηθεί στην ισχύ ενός CRS. Για να επιτευχθεί αυτός ο υπολογισμός πρέπει να υποδιαιρεθεί στον:

- αριθμό των Physical Resource Blocks  $n_{PRB}$ , ο οποίος εξαρτάται από το φασματικό εύρος λειτουργίας του καναλιού (channel Bandwidth). Όπως προαναφέρθηκε αυτό είναι  $BW = 20 \text{ MHz}$ .

Ο αριθμός των Physical Resource Blocks  $n_{PRB}$  υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$n_{PRB} = \frac{20 \text{ MHz}}{180 \text{ KHz}} - 0.1 \left( \frac{20 \text{ MHz}}{180 \text{ KHz}} \right) = 100 \quad (5.1)$$

όπου το φασματικό εύρος ενός Physical Resource Block είναι 180 kHz και ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας 0,1 = 10% προκύπτει από την απαίτηση της 3GPP να υπάρχει guard-band 10% στα άκρα του φάσματος.

- Τον αριθμό των subcarriers σε ένα Physical Resource Block ο οποίος είναι 12 (ο αναγνώστης μπορεί να αναφερθεί στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο της μεταπτυχιακής διατριβής)
- Τον αριθμό των OFDM symbols σε ένα subframe διάρκειας 1 ms εκπομπής, ο οποίος είναι 14 (ο αναγνώστης μπορεί να αναφερθεί στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο της μεταπτυχιακής διατριβής)

Ο αναλυτικός υπολογισμός της ισχύος εκπομπής κάθε CRS, για ισχύ εκπομπής  $P_T = P_{PA} = 10$  watts ανά πόρτα εισόδου της κεραία, ακολουθεί:

$$P_{CRS} [Watts] = \frac{P_{PA}}{n_{PRB}} = \frac{10}{12 \cdot 14} = \frac{100}{12 \cdot 14} = 5.95 \cdot 10^{-4} [Watts] = 0.595 \text{ mW} \Rightarrow$$

$$P_{CRS} [dBm] = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{5.95 \cdot 10^{-4}}{1 \text{ mW}} \right) = -2.253 [dBm]$$

όπου προφανώς για τον παραπάνω υπολογισμό ΔΕΝ υπολογίζουμε την λήψη RSRP για κανάλι με διαφορισμό συχνότητας (frequency dispersive channel), καθώς δεν έχουμε πλήρη εικόνα και γνώση για τον τρόπο μεταβολής της στάθμης λήψης ανά sub-carrier band 180 kHz. Επί της ουσίας, θα πρέπει να υπολογίσουμε ξεχωριστά σε κάθε Resource Element (RE) διαφορετικών sub-carriers την στάθμη λήψης  $P_{CRS}$  και να υπολογίσουμε την μέση τιμή  $\overline{P_{CRS}}$ . Αυτό συμβαίνει διότι έχουμε συνήθως κατακρυμνήσεις της στάθμης λήψης εξαρτώμενα από την συχνότητα (frequency dependent fading).

## 5.4 Επισκόπηση Προϋπολογισμού Ισχύος Ζεύξης – Power Link Budget Analysis

Κατά τον σχεδιασμό ενός ασυρμάτου δικτύου οι σχεδιαστές του συστήματος θα πρέπει να συνυπολογίσουν όλες τις απώλειες (losses) και τα κέρδη (gains) της ζεύξης. Όπως έχουμε προαναφέρει στα προηγούμενα κεφάλαια 2 & 3, οι απώλειες οφείλονται κατά κύριο λόγο σε φυσικά φαινόμενα όπως απώλειες διαδρομής, απώλειες κυματοδηγών, απώλειες ανακλάσεων, απώλειες Fresnel λόγω γεωγραφικού αναγλύφου, ή τεχνητά φαινόμενα όπως σκιάσεις και περιθλάσεις κτιρίων. Σε κάποιες περιπτώσεις απώλειες οφείλονται και σε φαινόμενα κακοτεχνιών στον σχεδιασμό όπως αποπροσανατολισμός (αζιμούθιος ή κάθετος tilt κεραιών γνωστός και ως antenna misalignment), επιλογή λάθος φίλτρων, παρεμβολών ή και στο υλικό (hardware) του συστήματος μετάδοσης όπως μη-σύζευξη κεραίας-κυματοδηγού. Αυτές οι απώλειες δεν θα μας απασχολήσουν σε αυτήν την μεταπτυχιακή διατριβή καθώς αποτελούν κατά κύριο λόγο περιπτώσεις προβληματικού hardware οι οποίες δεν εμπίπτουν στις συνήθεις περιπτώσεις υπολογισμού προϋπολογισμού ζεύξης. Έχοντας κάνει αυτόν τον προϋπολογισμό κερδών και απωλειών μπορεί θεωρητικά ο σχεδιαστής να αποφανθεί για την **αναμενόμενη απώλεια διαδρομής (path loss) σε κάθε σημείο της κάλυψης της περιοχής**.

Τα κέρδη του κεραιο-συστήματος εμπίπτουν εν γένει στην ευρύτερη κατηγορία του:

- παθητικού κέρδους των κεραιών μετάδοσης (antenna gains), όπως τα είδαμε και στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο της μεταπτυχιακής διατριβής, παράγραφος 4.4
- ενεργητικού κέρδους της ισχύος εκπομπής του πομπού (transmitter power), όπως αναλύθηκε στο παρόν κεφάλαιο, παράγραφος 5.3
- κέρδους λόγω χρήσης εξωτερικών ενισχυτών σήματος στον πομπό (power booster)
- κέρδους λόγω χρήσης ενισχυτών λήψης (Low Noise Amplifier – LNA) στον δέκτη.

**Ορισμός:** *προϋπολογισμό ισχύος ζεύξης (power link budget) ορίζεται ο υπολογισμός όλων των παθητικών ή ενεργητικών κερδών (gains) καθώς και των απωλειών (losses) σε μία ζεύξη με απώτερο σκοπό την αποτύπωση τους σε μία μαθηματική σχέση με γενική μορφή (σε μονάδες [dB]):*

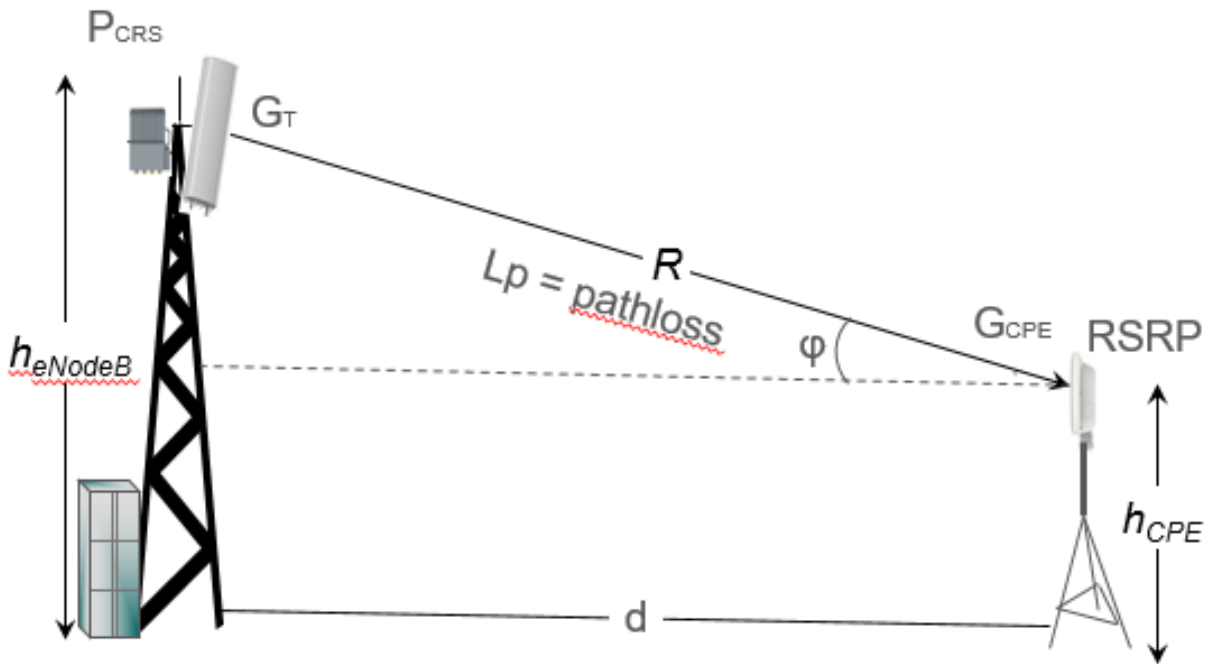
$$\text{Ισχύς λήψης [dBm]} = \text{Εκπεμπόμενη ισχύς [dBm]} + \text{gains [dB]} - \text{losses [dB]}$$

Η ανάλυση του προϋπολογισμού ζεύξης στην περίπτωση της οπτικής επαφής LoS βασίζεται στο σχήμα 5.5. Η σχέση η οποία συνδέει τα μεγέθη του προϋπολογισμού ισχύος είναι:

$$P_R = RSRP = \frac{P_T \cdot G_T \cdot G_{CPE}}{L_{SPM}} = \frac{P_{CRS} \cdot G_T \cdot G_{CPE}}{L_{SPM}} \Rightarrow L_{SPM} = \frac{P_{CRS} \cdot G_T \cdot G_{CPE}}{RSRP} \quad (5.2)$$

Όπου:

- RSRP = P<sub>R</sub> είναι η ισχύς λήψης των σημάτων αναφοράς (cell specific reference signals) στην κεραιά λήψης του δέκτη
- P<sub>CRS</sub> = P<sub>T</sub> είναι η ισχύς εκπομπής των σημάτων αναφοράς (cell specific reference signals) στην κεραιά του πομπού
- G<sub>CPE</sub> = G<sub>R</sub> το κέρδος της κεραιάς στην λήψη του δέκτη (συμβάλλοντας στην EIRP)
- G<sub>T</sub> το κέρδος στην κεραιά εκπομπής (συμβάλλοντας στην EIRP)
- L<sub>SPM</sub> είναι οι απώλειες διαδρομής του μοντέλου SPM



Σχήμα 5.5: Περίπτωση LoS - μελέτη προϋπολογισμού ζεύξης

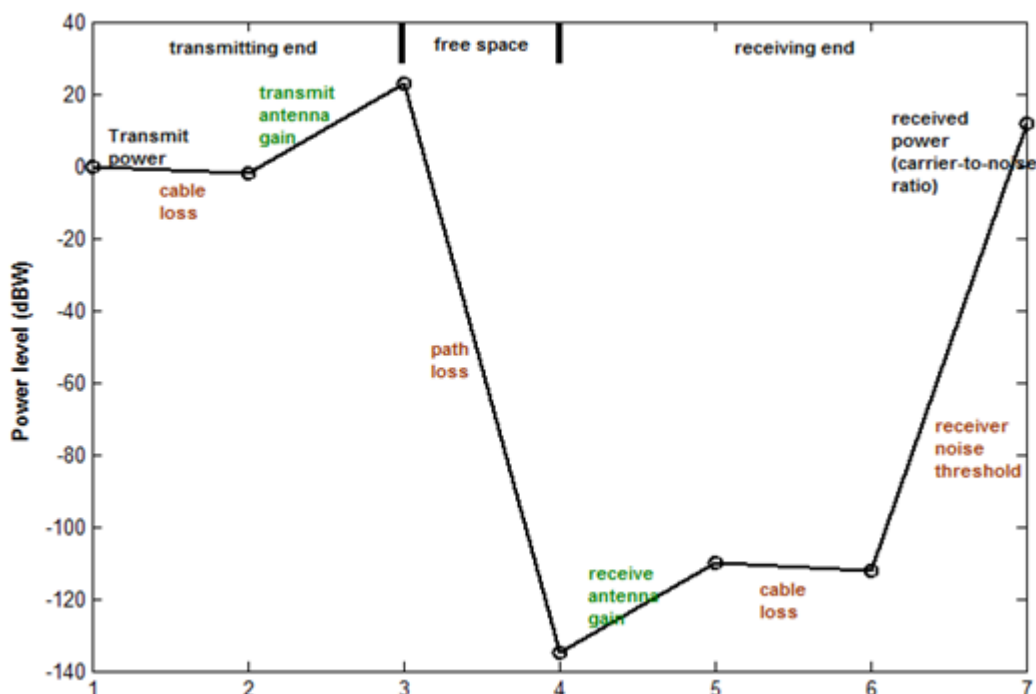
Ο προϋπολογισμός ισχύος είναι μία από τις βασικότερες διαδικασίες στον σχεδιασμό μίας τηλεπικοινωνιακής ζεύξης, καθώς προϋπολογίζει όλα τα φαινόμενα τα οποία συμβάλουν στις απώλειες και στα κέρδη και οδηγεί στον σωστό σχεδιασμό του συστήματος. Πράγματι έχοντας σε μία εξίσωση όλες τις παραμέτρους επηρεασμού της ραδιο-ζεύξης μπορούν οι σχεδιαστές να αποφανθούν σχετικά:

- είτε με την απαιτούμενη ισχύ εκπομπής του πομπού της ζεύξης ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη χωρική κάλυψη (**cell coverage range**),
- είτε να διασφαλισθεί η απαιτούμενη ισχύς στον δέκτη, η οποία οφείλει να είναι μεγαλύτερη της ευαισθησίας  $SS_R$  του δέκτη, όπως μελετήθηκε και επεξηγήθηκε στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο της μεταπτυχιακής διατριβής στην παράγραφο 3.3 , ώστε να διασφαλίσει ο σχεδιαστής την σωστή αποκωδικοποίηση και λήψη των δεδομένων, δηλαδή:

$$P_R [dBm] = P_T [dBm] + G_T [dB] + G_R [dB] - L_T [dB] - L_R [dB] - L_{SPM} [dB] \geq SS_R$$

- είτε να διασφαλισθεί η απαιτούμενη ισχύς στον δέκτη, η οποία οφείλει να είναι μεγαλύτερη των φυσικών απωλειών λόγω ζωνών Fresnel ή NLoS περιπτώσεων,
- είτε να επιλεχθούν οι κεραιές με κριτήριο το μέγιστο κέρδος (Gain) και την κατευθυντικότητα ώστε να βοηθήσουν είτε στην χωρική κάλυψη είτε στην ελάττωση της παρεμβολής είτε εν τέλει στην διασφάλιση της ευαισθησίας του δέκτη.

Συνήθως οι σχεδιαστές ασυρμάτων ζεύξεων χρησιμοποιούν μία αποτύπωση σε τμηματικό σχεδιάγραμμα όπου αποτυπώνουν τις απώλειες, τα κέρδη και τις ισχύς εκπομπής λήψης ως ακολούθως στο σχήμα 5.6:



Σχήμα 5.6: Παράδειγμα προϋπολογισμού ζεύξης

Αυτή η θεώρηση είναι εν γένει πολύ απλοποιημένη σε σχέση με τις πραγματικές απώλειες διαδρομής καθώς χρησιμοποιεί γενικά αιτιοκρατικά (ντετερμινιστικά) μοντέλα ράδιο-διάδοσης βασιζόμενα σε γνωστά φυσικά κυματικά φαινόμενα διάδοσης της Η/Μ ακτινοβολίας όπως περίθλαση, διάθλαση, σκέδαση, ανάκλαση, απορρόφηση, απώλειες Fresnel κτλ. Εντούτοις, η εμπειρία δείχνει ότι το κανάλι μετάδοσης είναι εν γένει μη-στατικό, δηλαδή χρονικά μεταβαλλόμενο), εξαρτώμενο από την χωρική κατανομή των φυσικών και τεχνητών εμποδίων. Συνέπεια τούτου είναι τα εμπλεκόμενα φυσικά φαινόμενα στην διάδοση των Η/Μ κυμάτων να είναι περισσότερο πολύπλοκα από όσο μπορούμε να αποτυπώσουμε με μαθηματικούς τύπους και προφανώς οδηγούν σε απρόβλεπτες στατιστικές διακυμάνσεις.

Υπάρχουν δύο διαφορετικές μέθοδοι επίλυσης αυτής της ασαφούς συμπεριφοράς του καναλιού οι οποίες συμβάλουν είτε στην χρήση περιθωρίων διόρθωσης (margins) είτε στην τροποποίηση του μοντέλου απωλειών ράδιο-διάδοσης στον χώρο (**path-loss tuning**):

- **1ος τρόπος:** Η χρήση λογισμικού προσομοίωσης της διάδοσης της Η/Μ ακτινοβολίας (λογισμικά της αγοράς όπως TEMS cell planner, Atoll Forsk, Mentum Planet κτλ.) το οποίο συνήθως διαμερίζει τον γεωγραφικό χώρο διάδοσης της ακτινοβολίας σε μικρά



τμήματα (finite elements) και επιλύει τις εξισώσεις Maxwell με πολύ μεγάλη ακρίβεια (τεχνική finite elements analysis). Τα αποτελέσματα αυτά συσχετίζονται στατιστικώς με τα απλοποιημένα αποτελέσματα του link budget και προκύπτει ένας συντελεστής διασποράς ή μέσης τυπικής απόκλισης ο οποίος καλείται στατιστικό σφάλμα προσέγγισης.

Αυτό το στατιστικό σφάλμα θα πρέπει να προστεθεί ως **περιθώριο σφάλματος (margin)** στον προϋπολογισμό της ισχύος. Ο πρώτος τρόπος αντιμετώπισης οδηγεί σε μία διαφοροποίηση του γενικού τύπου του προϋπολογισμού ισχύος ζεύξης με την προσθήκη του περιθωρίου σφάλματος:

$$\text{Ισχύς λήψης [dBm]} = \text{Εκπεμπόμενη ισχύς [dBm]} + \text{gains [dB]} - \text{margins [dB]} - \text{losses [dB]}$$

- **2<sup>ος</sup> τρόπος:** Η μέτρηση (**drive test**) της στάθμης λήψης της διαδιδόμενης Η/Μ ακτινοβολίας και η αποτύπωση της σε σχέση με την απόσταση και την χωρική θέση της συσκευής λήψης. Σε αυτήν την περίπτωση οι σχεδιαστές χρησιμοποιούν τις μετρήσεις και εκτελούν μία στατιστική ανάλυση των δεδομένων, συνήθως ακολουθώντας μία ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης (**linear multi-variable regression**) ή μία μη-γραμμική ανάλυση ακολουθώντας εκθετικά ή πολυωνυμικά στατιστικά μοντέλα.

Σκοπός αυτής της στατιστικής ανάλυσης του κεφαλαίου 5 παράγραφος 5.4, είναι η εξαγωγή ενός ημι-εμπειρικού πολύ-παραμετρικού γραμμικού μοντέλου απωλειών διαδρομής (path-loss model) για την συγκεκριμένη περιοχή κάλυψης και για τις συγκεκριμένες σχεδιαστικές παραμέτρους του δικτύου. Οι παράμετροι αυτοί είναι συνήθως το **ύψος του σταθμού βάσης  $h_t$** , το **ύψος του δέκτη  $h_r$** , η **ισχύς εκπομπής  $P_{CRS}$** , η συχνότητα λειτουργίας  **$f$** , το είδος των κεραιών και η τεχνολογία χωρικής πολυπλεξίας (spatial multiplexing – **MIMO rank**), η **απόσταση  $d$**  καθώς και οι ενδεχόμενες επιπλέον απώλειες διαδρομής λόγω εμποδίων (**shadowing**)  $L_{shadow}$  και περιθλάσεων (**Fresnel losses**)  $L_{diff}$ .

Αυτή η διαδικασία καλείται **ρύθμιση μοντέλου απωλειών διάδοσης (path-loss fine tuning process)** και είναι πολύ διαδομένη στους σχεδιαστές δικτύων καθώς προσφέρει πολλαπλά πλεονεκτήματα. Το βασικότερο πλεονέκτημα είναι η ρύθμιση και η προσαρμογή του συγκεκριμένου ημι-εμπειρικού μοντέλου στις εκάστοτε σχεδιαστικές και τοπολογικές γεωγραφικές συνθήκες. Σε μία τέτοια περίπτωση μπορεί να εξαχθεί ένα μοντέλο βασισμένο στην ακόλουθη γραμμική συνάρτηση:

$$L(h_t, h_r, d, L_{diff})[dB] = a_0 + a_1 \cdot 10\log_{10}(h_t) + a_2 \cdot 10\log_{10}(h_r) + a_3 \cdot 10\log_{10}(d) \cdot L_{diff}$$

Το βασικότερο μειονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι η απαίτηση σε μεγάλο αριθμό δειγμάτων ώστε να έχουμε καλή σύγκλιση του μοντέλου παλινδρόμησης, τα οποία θα πρέπει να έχουν ικανοποιητική χωρική διασπορά στο γεωγραφικό ανάγλυφο.

## 5.5 Εξαγωγή Μοντέλου Απωλειών

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή αφορά την ρύθμιση του ημι-εμπειρικού μοντέλου Standard Propagation Model SPM, όπως αυτό περιεγράφηκε στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο στην παράγραφο 4.3, στη ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας των 3,6-3,8 GHz. Σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία ο γενικός τύπος ακολουθεί την γενική δομή ενός μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης και δίδεται από τον τύπο:

$$\begin{aligned} L_{SPM} &= L(h_t, h_r, d, L_{diff})[dB] = \\ &= K_1 + K_2 \cdot \log(d) + K_3 \cdot \log(h_t) + K_4 \cdot Diff_{Loss} + K_5 \cdot \log(d) \cdot \log(h_t) + K_6 \cdot h_r + \\ &K_7 \cdot \log(h_r) + K_{clutter} \cdot f_{clutter} + K_{hill} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Η ρύθμιση του μοντέλου βασίστηκε στην διεξαγωγή μετρήσεων της στάθμης λήψης RSRP, όπως περιεγράφηκε στην παράγραφο 5.3 και ακολουθεί την γενική μεθοδολογία του **2<sup>ου</sup> τρόπου ρύθμισης** του power link budget, παραγράφου 5.4. Οι μετρήσεις, όπως προαναφέρθηκε στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο, έλαβαν χώρα σε μία πεδινή αγροτική περιοχή η οποία επιλέχθηκε λόγω ιδανικού περιβάλλοντος οπτικής επαφής του σταθμού βάσης σε μεγάλο αριθμό γεωγραφικών περιοχών με ταυτόχρονη ύπαρξη λόφων, εν γένει φυσικών εμποδίων και δασωδών περιοχών στο εύρος απόστασης [0 – 13] km που μας ενδιαφέρει.

Η διαδικασία ρύθμισης και εξαγωγής του ημί-εμπειρικού μοντέλου απωλειών SPM ακολουθεί συγκεκριμένα βήματα:

**1<sup>ο</sup> Βήμα:** θα πρέπει να αποτυπωθούν οι μετρήσεις της στάθμης λήψης RSRP σε γεωγραφικές συντεταγμένες (Google Earth) και να μετρηθεί η απόσταση d του σταθμού βάσης από το σημείο μέτρησης.

**2<sup>ο</sup> Βήμα:** θα πρέπει να υπολογιστούν επακριβώς τα γεωγραφικά ύψη της κεραίας του σταθμού βάσης και του σημείου μέτρησης. Το γεωγραφικό ύψος του σταθμού βάσης θα προκύψει από την άθροιση του γεωγραφικού υψόμετρου του σημείου τοποθέτησης του πυλώνα (Google Earth) και του ύψους του πυλώνα, δηλαδή  $h_t = h_{latitude} + h_{NodeB}$ , όπου  $h_{NodeB} = 26$  m σύμφωνα με

την παράγραφο 5.2. Αντιστοίχως το γεωγραφικό ύψος του εξοπλισμού του δέκτη CPE θα προκύψει από την άθροιση του γεωγραφικού υψομέτρου του σημείου τοποθέτησης του CPE (Google Earth) και του ύψους του τρίποδα τοποθέτησης του CPE, δηλαδή  $\mathbf{h}_r = \mathbf{h}_{\text{latitude}} + \mathbf{h}_{\text{CPE}}$ , όπου  $\mathbf{h}_{\text{CPE}} = 3 \text{ m}$  σύμφωνα με την παράγραφο 5.2.

**3ο Βήμα:** θα πρέπει να υπολογιστούν η απόκλιση της γωνίας αζιμούθιου και την αντίστοιχη απόκλιση κάθετης εκτροπής/ανύψωσης (antenna tilt), σύμφωνα με το 4ο κεφάλαιο στην παράγραφο 4.4. Οι δύο γωνιακές αποκλίσεις του αζιμούθιου  $\varphi^\circ$  και κάθετης απόκλισης/ανύψωσης  $\theta^\circ$  θα πρέπει να υπολογιστούν από την γεωμετρία του σχήματος και τις γεωγραφικές ανυψώσεις του γεωγραφικού αναγλύφου, σύμφωνα με το 2ο βήμα.

**4ο Βήμα:** θα πρέπει να υπολογιστεί η αναμενόμενη απολαβή της κεραίας του σταθμού βάσης στο downlink,  $G_T(\varphi, \theta)$ , συνυπολογίζοντας την απόκλιση της γωνίας αζιμούθιου και την αντίστοιχη απόκλιση κάθετης εκτροπής (antenna tilt), σύμφωνα με το 3ο βήμα.

**5ο Βήμα:** θα πρέπει να υπολογιστεί η ισχύς εκπομπής των CRS,  $P_{\text{CRS}}$ , στο downlink, όπως επεξηγήθηκε στην παράγραφο 5.3

**6ο Βήμα:** θα πρέπει να εξαχθεί η αναμενόμενη απώλεια διάδοσης σύμφωνα με τον εξαχθέντα τύπο της παραγράφου 5.4:

$$L_{SPM} = \frac{P_{\text{CRS}} \cdot G_T \cdot G_{\text{CPE}}}{\text{RSRP}} \quad (5.4)$$

**7ο Βήμα:** Η σταθερά (interceptor)  $K_1$  μπορεί να επιλεγεί κατάλληλα, ώστε να δώσει αποτελέσματα συμβατά με τα γενικά μοντέλα Cost-231, καθώς και το προτεινόμενο μοντέλο SPM στο λογισμικό Atoll. Επομένως, επιλέγουμε βάσει της ανάλυσης που έχουμε κάνει στο λογισμικό πακέτο Atoll μία σταθερά  $K_1 = 43 \text{ [dB]}$  ως βέλτιστη τιμή, καθώς συμπίπτουν τα αποτελέσματα του σχεδιασμού του δικτύου με τις μετρήσεις. Εν συνεχεία, θα χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης του λογισμικού Excel της Microsoft, ώστε να εκτιμήσουμε τους συντελεστές  $K_i$  της πολυπαραμετρικής εξίσωσης του μοντέλου SPM:

$$L_{SPM} - K_1 = L_{SPM} - 43 = K_2 \cdot \log(d) + K_3 \cdot \log(h_t) + K_4 \cdot \text{Diff}_{\text{Loss}} + K_5 \cdot \log(d) \cdot \log(h_t) + K_6 \cdot h_r + K_7 \cdot \log(h_r) + K_{\text{clutter}} \cdot f_{\text{clutter}} + K_{\text{hill}} \quad (5.5)$$

### Γενικές Παρατηρήσεις

- Στον μαθηματικό τύπο (5.5) ο συντελεστής  $K_{\text{clutter}}$  της απώλειας  $f_{\text{clutter}}$  της μέσης τιμής σταθμισμένων απωλειών λόγω υποβάθρου κάλυψης χαρτών (Average of the weighted losses due to clutter) θα πρέπει να ρυθμιστεί στην τιμή  $K_{\text{clutter}} = 0$ , καθώς δεν θα

χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο SPM σε κάποιο λογισμικό (TEMS cell planner ή Attol Forsk) το οποίο έχει σφάλματα ανάλυσης υποβάθρου χάρτη (clutter resolution) λόγω της ευκρίνειας ανάλυσης των χαρτών που χρησιμοποιεί.

- Στην περίπτωση της παρούσης μεταπτυχιακής διατριβής, εφόσον εκτελέστηκαν μετρήσεις στις συχνότητες 3,7 GHz και 3,8 GHz, ο όρος  $K \cdot \log(f)$  όπου  $f$  σε [MHz] ο οποίος υπάρχει σε διάφορα εμπειρικά ή θεωρητικά μοντέλα (εκτός του SPM) δεν θα εισαχθεί ως παράμετρος στον τελικό τύπο υπολογισμού των απωλειών αλλά θα συνυπολογιστεί ως σταθερά τιμή  $\log(3700)$  ή  $\log(3800)$  στην σταθερά (interceptor)  $K_1$  των μοντέλων. Αν παρατηρήσουμε τον τύπο απωλειών  $L_{SPM}^{NLOS}$  του ημι-εμπειρικού μοντέλου SPM θα δούμε ότι δεν περιέχει τον όρο  $\log(f)$  καθώς αναφέρεται σε συγκεκριμένες συχνότητες μετρήσεων, αλλά έχει συμπεριληφθεί στην σταθερά τιμή  $K_1$ . Ούτως ή άλλως η διαφορά στην τιμή των  $\log(3700) = 3,5682017$  και  $\log(3800) = 3,5797836$  είναι  $\Delta = 0,0115819$  ή 1,15819%, δηλαδή αμελητέα. Ο προτεινόμενος γενικός τύπος απωλειών θα είναι εφαρμόσιμος στη ζώνη συχνοτήτων 43 της 3GPP για αγροτικό (Rural) περιβάλλον κάλυψης.
- Επίσης, ο διορθωτικός παράγοντας  $K_{hill}$  των αναμενόμενων απωλειών Fresnel λόγω λοφώδους γεωγραφικού αναγλύφου θα πρέπει να ρυθμιστεί στην τιμή  $K_{hill} = 0$ , καθώς το μοντέλο αναφέρεται σε αγροτικές περιοχές και οι απώλειες λόφων έχουν συνυπολογιστεί στις μετρήσεις στον παράγοντα  $Diff_{Loss}$ .
- Τέλος, θα πρέπει να συνυπολογίσουμε και κάποιες απώλειες λόγω φυλλωμάτων δέντρων (foliage losses), δηλαδή να προσθέσουμε έναν επιπλέον όρο στο μαθηματικό τύπο του μοντέλου SPM,  $K_8 \cdot L_{foliage}$ . Αυτές οι απώλειες περιγράφονται γενικά στα πρότυπα της ITU-R, όπως παρουσιάστηκαν στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο, παράγραφος 4.5. Εφόσον δεν υπάρχουν σαφείς ενδείξεις στα πρότυπα αυτά για το εύρος φάσματος 3,6-3,8 GHz θα πρέπει να το εξαγάγουμε επίσης από τις μετρήσεις μας

Ακολουθώντας τις παραπάνω παρατηρήσεις συμπεραίνουμε ότι ο γενικός τύπος του μοντέλου SPM τροποποιείται στην περίπτωση μας ως ακολούθως:

$$L_{SPM} - K_1 = L_{SPM} - 43 = K_2 \cdot \log(d) + K_3 \cdot \log(h_t) + K_4 \cdot Diff_{Loss} + K_5 \cdot \log(d) \cdot \log(h_t) + K_6 \cdot h_r + K_7 \cdot \log(h_r) + K_8 \cdot L_{foliage} \quad (5.6)$$

Πώς υπολογίζονται οι συντελεστές  $K_i$  της εξίσωσης (5.6); Για να απαντήσουμε σε ένα τέτοιο ερώτημα θα πρέπει να εξηγήσουμε την μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης. Η τεχνική της

γραμμικής παλινδρόμησης είναι μία γενική τεχνική της στατιστικής ανάλυσης δεδομένων, η οποία ανήκει στον ευρύτερο μαθηματικό κλάδο της στατιστικής και της μηχανικής εκμάθησης (machine learning) [28]. Πιο αναλυτικά ένα μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης το οποίο περιλαμβάνει περισσότερες του ενός μεταβλητές καλείται μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης πολλαπλών μεταβλητών (multiple linear regression model). Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το ακόλουθο με n-μεταβλητές:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3 + \dots + \beta_n \cdot x_n + \varepsilon = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot x_i + \varepsilon \quad (5.7)$$

Το μοντέλο αυτό καλείται γραμμικό διότι έχει μία γραμμική σχέση εξάρτησης στους πολλαπλασιαστικούς παράγοντες  $\beta_i$  των μεταβλητών  $x_i$

Η ποσότητα  $\varepsilon$  αντιστοιχεί στο σχετικό σφάλμα εκτίμησης του μοντέλου της γραμμικής παλινδρόμησης σε σχέση με την πραγματική σχέση εξάρτησης των μετρούμενων ποσοτήτων. Αυτό το σφάλμα προκύπτει διότι δεν γνωρίζουμε στην ουσία το ακριβές μοντέλο της γραμμικής παλινδρόμησης το οποίο συνδέει τις μεταβλητές μεταξύ τους (για να το γνωρίζαμε θα έπρεπε να είχαμε άπειρα μετρούμενα δεδομένα, όπερ αδύνατον!!!). Στην πραγματικότητα αυτό που κάνει η τεχνική της γραμμικής παλινδρόμησης είναι να κάνει μία εκτίμηση των παραμέτρων  $\beta_i$ , σε σχέση με τις πεπερασμένες μετρήσεις που τροφοδοτούμε το μοντέλο, βασισμένη στην τεχνική της **μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων**, όπως θα εξηγηθεί παρακάτω.

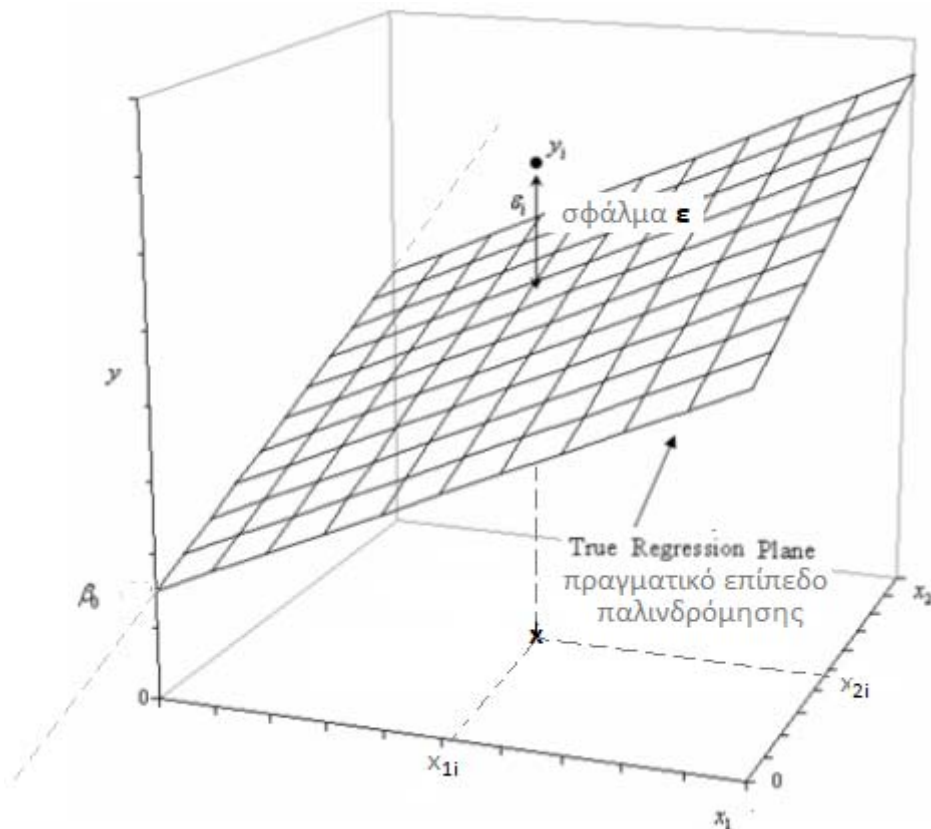
Το μοντέλο της πολλαπλής αυτό περιγράφει μία επιφάνεια χωρίς καμπύλωση σε έναν n+1 χώρο, όπου η παράμετρος  $\beta_0$  περιγράφει το σημείο τομής (interceptor) της επιφάνειας στον άξονα της συνάρτησης Y και οι λοιπές παράμετροι  $\beta_i$ ,  $i \in [1, \dots, n]$  αποτελούν τους **μερικούς συντελεστές παλινδρόμησης (partial regression coefficients - predictor)** των μεταβλητών  $x_i$ ,  $i \in [1, \dots, n]$ .

Όμως τι σημαίνει μερικός συντελεστής παλινδρόμησης (predictor); Στην ουσία αναφερόμαστε στην μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και σε μία τεχνική η οποία χρησιμοποιείται και στον υπολογισμό μερικών παραγώγων. Πράγματι ο παράγοντας – παράμετρος  $\beta_1$  αναπαριστά την μεταβολή στην μέση απόκριση της γραμμικής παλινδρόμησης η οποία αντιστοιχεί στην μοναδιαία μεταβολή της μεταβλητής  $x_1$  όταν η μεταβλητή  $x_2$  κρατείται σταθερή (αμετάβλητη). Ομοίως ο παράγοντας – παράμετρος  $\beta_2$  αναπαριστά την μεταβολή στην μέση απόκριση της γραμμικής παλινδρόμησης η οποία αντιστοιχεί στην μοναδιαία μεταβολή της μεταβλητής  $x_2$  όταν η μεταβλητή  $x_1$  κρατείται σταθερή (αμετάβλητη).

Εφόσον αναφερόμαστε σε  $(n+1)$ -διάστατο χώρο είναι αδύνατον να το αναπαραστήσουμε γεωμετρικά και να έχουμε μία εποπτική αναπαράσταση. Για να γίνουν τα παραπάνω κατανοητά θα δώσουμε μία αντίστοιχη αναπαράσταση σε έναν τρισδιάστατο χώρο, όπου η εξίσωση (5.7) υποβιβάζεται διαστατικά στις τρεις (03) διαστάσεις και περιγράφεται από την αντίστοιχη εξίσωση:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2$$

Όπου η γεωμετρική της αναπαράσταση δίδεται στο σχήμα 5.7.



**Σχήμα 5.7 :** Γεωμετρική αναπαράσταση μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης δύο μεταβλητών

Εάν θέλουμε να δώσουμε την γεωμετρική ερμηνεία των συντελεστών-παραμέτρων  $\beta_i$ ,  $i \in [1,2]$  θα λέγαμε τα ακόλουθα:

- η τρισδιάστατη αναπαράσταση  $(n+1 = 3)$  της επιφάνειας  $Y$  αντιστοιχείται σε μία δισδιάστατη περιοχή  $x_1, x_2$  ( $n = 2$ ) με την τρίτη διάσταση να προσδίδει την εκτιμώμενη τιμή της παλινδρόμησης  $Y$ .
- το σημείο τομής  $\beta_0$  της συνάρτησης  $Y$  καθορίζει και το αρχικό σημείο εκκίνησης της επιφάνειας στον αντίστοιχο άξονα,

- η παράμετρος-συντελεστής  $\beta_1$  καθορίζει την κλίση της επιφάνειας ως προς τον άξονα της μεταβλητής  $x_1$  (κρατώντας σταθερή την μεταβλητή  $x_2$ )
- η παράμετρος-συντελεστής  $\beta_2$  καθορίζει την κλίση της επιφάνειας ως προς τον άξονα της μεταβλητής  $x_2$  (κρατώντας σταθερή την μεταβλητή  $x_1$ )
- το σχετικό σφάλμα  $\varepsilon_i$  εκτίμησης του μοντέλου της γραμμικής παλινδρόμησης  $\tilde{Y}_i$  σε σχέση με την πραγματική τιμή της συνάρτησης  $Y_i$  σε κάθε  $i$ -συνδυασμό μεταβλητών  $(x_{1i}, x_{2i})$  αντιστοιχείται σε μία απόκλιση  $\|\tilde{Y}_i - Y_i\| = \varepsilon_i$  στον άξονα  $Y$

Κατ' αντιστοιχία με το προηγούμενο παράδειγμα όπου μία 2-διάστατη επιφάνεια απεικονίζεται σε μία τρίτη διάσταση στον άξονα  $Y$  και προκύπτει μία γεωμετρική αναπαράσταση πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης σε έναν 3-διάστατο χώρο (σχήμα 5.7), ομοίως μπορούμε να πούμε ότι σε ένα  $n$ -διάστατο μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης μπορούμε να έχουμε μία  $n$ -διάστατη επιφάνεια η οποία αντιστοιχείται σε μία παραπάνω διάσταση  $(n+1)$  του αντίστοιχου άξονα  $Y$ , δίδοντας την τελική γεωμετρική αναπαράσταση της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης σε ένα  $(n+1)$ -διάστατο χώρο.

Ας προχωρήσουμε στο τελευταίο μέρος της παρουσίασης επεξήγησης η οποία αφορά την παρουσίαση του αναλυτικού τρόπου υπολογισμού των συντελεστών-παραμέτρων  $\beta_i$ ,  $i \in [1, \dots, n]$  της γραμμικής παλινδρόμησης με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Ας θεωρήσουμε το αντίστοιχο μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης με  $n$ -μεταβλητές της εξίσωσης (5.7):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3 + \dots + \beta_n \cdot x_n + \varepsilon = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot x_i + \varepsilon$$

Εάν ακολουθήσουμε την γεωμετρική αναπαράσταση της γραμμικής παλινδρόμησης μπορούμε να θεωρήσουμε ότι κάθε  $i$ -τιμή της συνάρτησης  $Y$ , δηλαδή  $Y_i$ ,  $i \in [1, \dots, n]$ , παράγεται από έναν μοναδικό συνδυασμό παραγόντων-παραμέτρων  $\beta_i$ ,  $i \in [1, \dots, n]$ , με το σχετικό σφάλμα  $\varepsilon_i$ . Ακολουθώντας αυτήν την θεώρηση μπορούμε να πούμε ότι κάθε μία εκ των  $n^{\text{th}}$  μεταβλητών  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , έχει  $n$ -διαφορετικές τιμές, δηλαδή ισχύει το σύστημα εξισώσεων:

$$\begin{aligned} Y_1 &= \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{1,1} + \beta_2 \cdot x_{1,2} + \beta_3 \cdot x_{1,3} + \dots + \beta_n \cdot x_{1,n} + \varepsilon_1 \\ Y_2 &= \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{2,1} + \beta_2 \cdot x_{2,2} + \beta_3 \cdot x_{2,3} + \dots + \beta_n \cdot x_{2,n} + \varepsilon_2 \\ Y_3 &= \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{3,1} + \beta_2 \cdot x_{3,2} + \beta_3 \cdot x_{3,3} + \dots + \beta_n \cdot x_{3,n} + \varepsilon_3 \\ &\dots \end{aligned}$$

$$Y_n = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{n,1} + \beta_2 \cdot x_{n,2} + \beta_3 \cdot x_{n,3} + \dots + \beta_n \cdot x_{n,n} + \varepsilon_n$$

όπου οι ποσότητες  $x_{i,j}$  αντιστοιχούν στην  $i$ -συνεισφορά του μερικού συντελεστή παλινδρόμησης  $x_j$ . Το παραπάνω γραμμικό σύστημα εξισώσεων είναι γραμμικώς ανεξάρτητο και μπορεί να γραφεί υπό μορφή άλγεβρας πινάκων ως ακολούθως:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (5.8)$$

όπου κάθε διάνυσμα στην εξίσωση (5.8) έχει την μορφή πίνακα ως ακολούθως:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n,1} & x_{n,2} & \dots & x_{n,n} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

Ο πίνακας  $X$  καλείται και ο πίνακας σχεδιασμού (design matrix) και αποτελείται από τις τιμές των μεταβλητών των αντιστοιχών συντελεστών, οι οποίες και προσδιορίζονται από τις μετρήσεις που εκτελείται η παλινδρόμηση. Ο πίνακας-διάνυσμα  $\boldsymbol{\beta}$  αποτελείται από όλους τους συντελεστές της παλινδρόμησης. Εφόσον ζητείται η πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση των μετρήσεων θα πρέπει να εκτιμηθούν (προσεγγιστούν) τα στοιχεία του πίνακα  $\boldsymbol{\beta}$  με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Λύνοντας την εξίσωση (5.8) με την προσέγγιση των ελαχίστων τετραγώνων ως προς τον πίνακα  $\boldsymbol{\beta}$  προκύπτει:

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X})^{-1} \cdot \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{y} \quad (5.9)$$

όπου  $\mathbf{X}^T$  είναι ο ανάστροφος (Transpose) του  $\mathbf{X}$  και ο  $\mathbf{X}^{-1}$  είναι ο αντίστροφος του  $\mathbf{X}$ .

Έχοντας την εκτίμηση  $\hat{\boldsymbol{\beta}}$  του πίνακα  $\boldsymbol{\beta}$  μπορούμε να προσεγγίσουμε την εκτίμηση του αποτελέσματος της παλινδρόμησης ως:

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X} \cdot \hat{\boldsymbol{\beta}} \quad (5.10)$$

όπου η διαφορά των εκτιμώμενων τιμών  $\hat{y}_i$  (estimated values) από τις τιμές των μετρήσεων  $y_i$  είναι αυτό που ονομάζουμε υπολειπόμενο σφάλμα (residual error)  $e_i = \|\hat{y}_i - y_i\|$ . Αυτό φαίνεται επίσης εάν αντικαταστήσουμε την εξίσωση (5.9) στην (5.10):



$$\hat{y} = X \cdot \hat{\beta} = X \cdot (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot y = H \cdot y \Rightarrow$$

$$\hat{y} - H \cdot y = e_i \neq 0 \quad (5.11)$$

Μπορούμε να δώσουμε ένα παράδειγμα στο αρχείο excel που έχουμε αποτυπώσει τις μετρήσεις και την ανάλυση της εκτίμησης των συντελεστών της γραμμικής παλινδρόμησης. Πράγματι στην στήλη Z έχουμε υπολογίσει την απώλεια διαδρομής (path-loss) βάσει των μετρήσεων του πεδίου, σχήμα 5.8.

Z4		=S4+P4+E4-10*LOG10(R4)-10*LOG10(Y4)-10*LOG(12)-U4-X4					
	V	W	X	Y	Z	AA	AB
1							
2	Pathloss PL Estimation					Εκτίμηση Εξαγωγόμενου Μοντέλου Μοντέλου LoS - Φύλλο "LoS Pathloss Model" Σφάλμα Εκτίμησης	
3	eNodeB to CPE Distance LOS (km)	Carrier Frequency [MHz]	Measured RSRP (dBm)	NPRB	Measured Pathloss Estimation Lp [dB]	Regression pathloss estimation [dB]	Difference [dB]
4	3.35	3795	-77	50	119.7708819	121.9727714	2.201889584
5	3.34	3795	-75	50	117.7718485	121.9495049	4.177656426
6	3.36	3795	-78	50	120.7787328	121.9959686	1.217235854
7	10.65	3777.5	-86	75	126.3982452	131.3889153	4.990670033
8	10.64	3777.5	-84	75	124.4013414	131.3816042	6.980262761

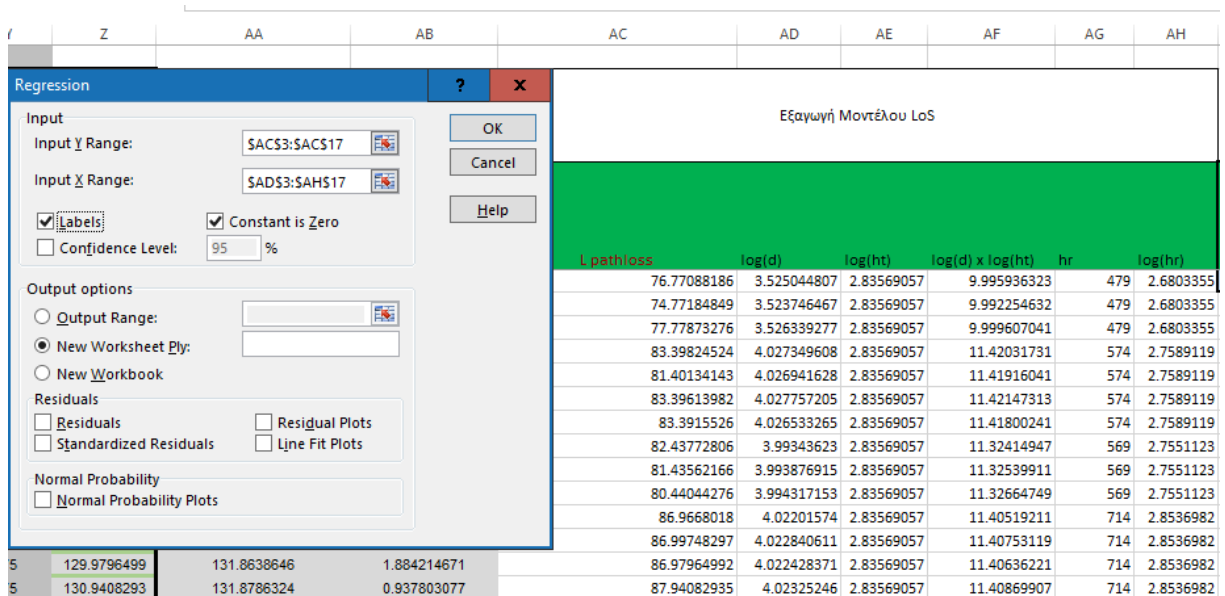
Σχήμα 5.8: Παρουσίαση απωλειών διαδρομής βάσει μετρήσεων στο πεδίο

Εν συνεχεία στις στήλες AC έως AH έχουμε αποτυπώσει τις τιμές των μεταβλητών  $x_i$ , σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση στην εξίσωση (5.7), σχήμα 5.9.

AC	AD	AE	AF	AG	AH
Εξαγωγή Μοντέλου LoS					
L pathloss	log(d)	log(ht)	log(d) x log(ht)	hr	log(hr)
119.7708819	3.525044807	2.83569057	9.995936323	479	2.6803355
117.7718485	3.523746467	2.83569057	9.992254632	479	2.6803355
120.7787328	3.526339277	2.83569057	9.999607041	479	2.6803355
126.3982452	4.027349608	2.83569057	11.42031731	574	2.7589119

Σχήμα 5.9: Τιμές των μεταβλητών  $x_i$  για την εξαγωγή του εκτιμώμενου μοντέλου

Το λογισμικό πακέτο excel έχει ενσωματωμένη ρουτίνα υπολογισμού των συντελεστών  $\hat{\beta}_i$  του μοντέλου της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, επομένως δεν χρειάζεται να υπολογίσουμε αναλυτικά τους όρους  $(X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T$  της εξίσωσης (5.9). Πράγματι επιλέγοντας τις στήλες AC έως AH και ενεργοποιώντας την διαδικασία εκτίμησης της γραμμικής παλινδρόμησης (Data – regression), σχήμα 5.10, προκύπτουν οι συντελεστές  $\hat{\beta}_i$ , σχήμα 5.11.



Σχήμα 5.10: Διαδικασία εκτίμησης γραμμικής παλινδρόμησης (Data – regression) λογισμικού πακέτου excel

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>
Intercept - $\beta_0$	<b>43</b>	N/A
log(d) - $\beta_1$	<b>18.89080706</b>	0.598474058
log(ht) - $\beta_2$	<b>2.99323194</b>	0.893649681
log(d) x log(ht) - $\beta_3$	<b>-0.342280245</b>	0.255885045
hr - $\beta_4$	<b>0.002473909</b>	0.001568018
log(hr) - $\beta_5$	<b>2.287161249</b>	0.858721744

Σχήμα 5.11: εκτίμηση συντελεστών  $\hat{\beta}_i$  γραμμικής παλινδρόμησης λογισμικού πακέτου excel

Χρησιμοποιώντας τους συντελεστές εκτίμησης  $\hat{\beta}_i$  προκύπτει η εκτιμώμενη τιμή της απώλειας διαδρομής  $\hat{L}_{pathloss}$  στην στήλη AA, σχήμα 5.12, σύμφωνα με την εξίσωση (5.10)

='LoS Pathloss Model'!B\$21+'LoS Pathloss Model'!B\$22*AD4+'LoS Pathloss Model'!B\$26*AH4					
	X	Y	Z	AA	AB
Loss PL Estimation			Εκτίμηση Εξαγωγόμενου Μοντέλου Μοντέλου LoS - Φύλλο "LoS Pathloss Model" Σφάλμα Εκτίμησης		
Frequency	Measured RSRP (dBm)	NPRB	Measured Pathloss Estimation Lp [dB]	Regression pathloss estimation [dB]	Difference [dB]
	-77	50	119.7708819	121.9727714	2.201889584
	-75	50	117.7718485	121.9495049	4.177656426
	-78	50	120.7787328	121.9959686	1.217235854
	-86	75	126.3982452	131.3889153	4.990670033
	-84	75	124.4013414	131.3816042	6.980262761

Σχήμα 5.12: εκτιμώμενη τιμή της απώλειας διαδρομής  $\hat{L}_{pathloss}$

Στην στήλη AB του σχήματος 5.12 βλέπουμε το υπολειπόμενο σφάλμα (residual error)  $e_i$ , σύμφωνα με την εξίσωση (5.11).

### 5.5.1 Μοντέλο Απωλειών Αγροτικής Περιοχής Line of Site – LoS

Στην περίπτωση μετρήσεων LoS:

- οι απώλειες  $Diff_{Loss}$  θα πρέπει να παραληφθούν καθώς δεν έχουμε περιθλάσεις ή Fresnel losses, δηλαδή θα πρέπει να θέσουμε την τιμή του συντελεστή  $K_4 = 0$
- οι απώλειες  $L_{folliage}$  θα πρέπει να παραληφθούν καθώς δεν έχουμε απώλειες από φυλλώματα δέντρων, δηλαδή θα πρέπει να θέσουμε την τιμή του συντελεστή  $K_8 = 0$

Ο τύπος του LoS μοντέλου SPM τροποποιείται ως ακολούθως:

$$L_{SPM}^{LoS} - K_1 = K_2 \cdot \log(d) + K_3 \cdot \log(h_t) + K_5 \cdot \log(d) \cdot \log(h_t) + K_6 \cdot h_r + K_7 \cdot \log(h_r) \quad (5.12)$$

Ακολουθώντας τα προαναφερθέντα βήματα της παραγράφου 5.5, φτιάχνουμε από την επεξεργασία των μετρήσεων ένα αρχείο excel με τις ακόλουθες στήλες:

Στήλη AD :  $\log(d)$  → λογαριθμική απόσταση κεραίας σταθμού βάσης από το σημείο μέτρησης. Υπολογίζεται βάσει του λογισμικού Atoll σε συγκεκριμένες γεωγραφικές συντεταγμένες στους χάρτες του Google Earth για κάθε μέτρηση στο excel ως ακολούθως, σχήμα 5.13:

AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH
Εκτίμηση Εξαγωγόμενου Μοντέλου Μοντέλου LoS - Φύλλο " LoS Pathloss Model"		Εξαγωγή Μοντέλου LoS					
Σφάλμα Εκτίμησης							
Regression pathloss estimation [dB]	Difference [dB]	L.pathloss	log(d)	log(ht)	log(d) x log(ht)	hr	log(hr)
121,9727714	2,201889584	76,77088186	3,525044807	2,83569057	9,995936323	479	2,6803355
121,9495049	4,177656426	74,77184849	3,523746467	2,83569057	9,992254632	479	2,6803355
121,9959686	1,217235854	77,77873276	3,526339277	2,83569057	9,999607041	479	2,6803355
131,3889153	4,990670033	83,39824524	4,027349608	2,83569057	11,42031731	574	2,7589119
131,3816042	6,980262761	81,40134143	4,026941628	2,83569057	11,41916041	574	2,7589119
131,3962195	5,00007967	83,39613982	4,027757205	2,83569057	11,42147313	574	2,7589119
131,3742862	4,982733632	83,3915526	4,026533265	2,83569057	11,41800241	574	2,7589119
130,7601207	5,322392595	82,43772806	3,99343623	2,83569057	11,32414947	569	2,7551123
130,7680178	6,332396146	81,43562166	3,993876915	2,83569057	11,32539911	569	2,7551123
130,775907	7,335464204	80,44044276	3,994317153	2,83569057	11,32664749	569	2,7551123
131,8564701	1,889668351	86,9668018	4,02201574	2,83569057	11,40519211	714	2,8536982
131,871252	1,873769035	86,99748297	4,022840611	2,83569057	11,40753119	714	2,8536982
131,8638646	1,884214671	86,97964992	4,022428371	2,83569057	11,40636221	714	2,8536982
131,8786324	0,937803077	87,94082935	4,02325246	2,83569057	11,40869907	714	2,8536982
126,8670676	4,732345807	79,13472179	3,796574333	2,75739603	10,46865899	515	2,7118072

Σχήμα 5.13: Λογαριθμική απόσταση κεραίας σταθμού βάσης από το σημείο μέτρησης

Η στήλη AD αναφέρεται στις μετρούμενες τιμές της απόστασης σε km οι οποίες έχουν αποτυπωθεί στο excel αρχείο στην στήλη V, σχήμα 5.14

T	U	V	W	X	Y	Z
Fresnel Loss Calculator		Pathloss PL Estimation				
LoS	Overall Fresnel Losses [dB]	eNodeB to CPE Distance LOS (km)	Carrier Frequency [MHz]	Measured RSRP (dBm)	NPRB	Measured Pathloss Estimation Lp [dB]
YES	0	3,35	3795	-77	50	119,7708819
YES	0	3,34	3795	-75	50	117,7718485
YES	0	3,36	3795	-78	50	120,7787328
YES	0	10,65	3777,5	-86	75	126,3982452
YES	0	10,64	3777,5	-84	75	124,4013414
YES	0	10,66	3777,5	-86	75	126,3961398
YES	0	10,63	3777,5	-86	75	126,3915526
YES	0	9,85	3777,5	-85	75	125,4377281
YES	0	9,86	3777,5	-84	75	124,4356217
YES	0	9,87	3777,5	-83	75	123,4404428
YES	0	10,52	3777,5	-89	75	129,9668018
YES	0	10,54	3777,5	-89	75	129,997483
YES	0	10,53	3777,5	-89	75	129,9796499
YES	0	10,55	3777,5	-90	75	130,9408293
YES	0	6,26	3777,5	-81	75	122,1347218
YES	0	6,24	3777,5	-80	75	121,0923838

Σχήμα 5.14: Απόσταση κεραίας σταθμού βάσης από το σημείο μέτρησης

Στήλη AE:  $\log(h_t) \rightarrow$  λογαριθμικό ύψος κεραίας σταθμού βάσης, συνυπολογίζοντας το γεωγραφικό ύψος καθώς και το ύψος του πυλώνα βάσει των υψομετρικών μετρήσεων των συντεταγμένων του σημείου μέτρησης στους χάρτες της εφαρμογής Google Earth ως ακολούθως, σχήμα 5.15:

AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH
Εκτίμηση Εξαγόμενου Μοντέλου LoS - Φύλλο "LoS Pathloss Model"		Εξαγωγή Μοντέλου LoS					
Σφάλμα Εκτίμησης							
Regression pathloss estimation [dB]	Difference [dB]	L pathloss	log(d)	log(ht)	log(d) x log(ht)	hr	log(hr)
121,9727714	2,201889584	76,77088186	3,525044807	2,83569057	9,995936323	479	2,6803355
121,9495049	4,177656426	74,77184849	3,523746467	2,83569057	9,992254632	479	2,6803355
121,9959686	1,217235854	77,77873276	3,526339277	2,83569057	9,999607041	479	2,6803355
131,3889153	4,990670033	83,39824524	4,027349608	2,83569057	11,42031731	574	2,7589119
131,3816042	6,980262761	81,40134143	4,026941628	2,83569057	11,41916041	574	2,7589119
131,3962195	5,00007967	83,39613982	4,027757205	2,83569057	11,42147313	574	2,7589119
131,3742862	4,982733632	83,3915526	4,026533265	2,83569057	11,41800241	574	2,7589119
130,7601207	5,322392595	82,43772806	3,99343623	2,83569057	11,32414947	569	2,7551123
130,7680178	6,332396146	81,43562166	3,993876915	2,83569057	11,32539911	569	2,7551123
130,775907	7,335464204	80,44044276	3,994317153	2,83569057	11,32664749	569	2,7551123
131,8564701	1,889668351	86,9668018	4,02201574	2,83569057	11,40519211	714	2,8536982
131,871252	1,873769035	86,99748297	4,022840611	2,83569057	11,40753119	714	2,8536982
131,8638646	1,884214671	86,97964992	4,022428371	2,83569057	11,40636221	714	2,8536982
131,8786324	0,937803077	87,94082935	4,02325246	2,83569057	11,40869907	714	2,8536982
126,8670676	4,732345807	79,13472179	3,796574333	2,75739603	10,46865899	515	2,7118072

Σχήμα 5.15: Λογαριθμικό ύψος κεραίας σταθμού βάσης

Η στήλη AE αναφέρεται στο συνολικό ύψος του πυλώνα (γεωγραφικό ύψος συν το ύψος του πυλώνα) το οποίο έχει αποτυπωθεί στο excel αρχείο στην στήλη H, σχήμα 5.16

B	C	D	E	F	G	H	I
CPE Measurements & Characteristics							
CPE Geographical Height [m]	CPE pole Height (m)	CPE overall height [m]	CPE Antenna Gain Gr [dBi]	eNodeB geographical Location Height [m]	eNodeB antenna Height on Tower [m]	eNodeB antenna overall height [m]	eNodeB Antenna sector Planning Azimuth [°]
476	3	479	13	659	26	685	200
476	3	479	13	659	26	685	200
476	3	479	13	659	26	685	200
571	3	574	13	659	26	685	143
571	3	574	13	659	26	685	143
571	3	574	13	659	26	685	143
571	3	574	13	659	26	685	143
566	3	569	13	659	26	685	143
566	3	569	13	659	26	685	143
566	3	569	13	659	26	685	143
711	3	714	13	659	26	685	143
711	3	714	13	659	26	685	143
711	3	714	13	659	26	685	143
711	3	714	13	659	26	685	143
512	3	515	13	546	26	572	325
512	3	515	13	546	26	572	325
512	3	515	13	546	26	572	325
524	3	527	13	546	26	572	230

Σχήμα 5.16: Συνολικό (effective) ύψος κεραίας σταθμού βάσης

Στήλη AF :  $\log(d) \cdot \log(h_t) \rightarrow$  γινόμενο λογαριθμικού ύψους κεραίας σταθμού βάσης και λογαριθμικής απόστασης κεραίας σταθμού βάσης από το σημείο μέτρησης.

Στήλη AG :  $h_r \rightarrow$  ύψους κεραίας εξοπλισμού λήψης (μονάδα CPE), συνυπολογίζοντας το γεωγραφικό ύψος καθώς και το ύψος του τρίποδα τοποθέτησης της μονάδος CPE βάσει των υψομετρικών μετρήσεων των συντεταγμένων του σημείου μέτρησης στους χάρτες της εφαρμογής Google Earth ως ακολούθως, σχήμα 5.17:

AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH
Εκτίμηση Εξαγώμενου Μοντέλου Μοντέλου LoS - Φύλλο " LoS Pathloss Model"		Εξαγωγή Μοντέλου LoS					
Σφάλμα Εκτίμησης							
Regression pathloss estimation [dB]	Difference [dB]	L pathloss	log(d)	log(ht)	log(d) x log(ht)	hr	log(hr)
121,9727714	2,201889584	76,77088186	3,525044807	2,83569057	9,995936323	479	2,6803355
121,9495049	4,177656426	74,77184849	3,523746467	2,83569057	9,992254632	479	2,6803355
121,9959686	1,217235854	77,77873276	3,526339277	2,83569057	9,999607041	479	2,6803355
131,3889153	4,990670033	83,39824524	4,027349608	2,83569057	11,42031731	574	2,7589119
131,3816042	6,980262761	81,40134143	4,026941628	2,83569057	11,41916041	574	2,7589119
131,3962195	5,00007967	83,39613982	4,027757205	2,83569057	11,42147313	574	2,7589119
131,3742862	4,982733632	83,3915526	4,026533265	2,83569057	11,41800241	574	2,7589119
130,7601207	5,322392595	82,43772806	3,99343623	2,83569057	11,32414947	569	2,7551123
130,7680178	6,332396146	81,43562166	3,993876915	2,83569057	11,32539911	569	2,7551123
130,775907	7,335464204	80,44044276	3,994317153	2,83569057	11,32664749	569	2,7551123
131,8564701	1,889668351	86,9668018	4,02201574	2,83569057	11,40519211	714	2,8536982
131,871252	1,873769035	86,99748297	4,022840611	2,83569057	11,40753119	714	2,8536982
131,8638646	1,884214671	86,97964992	4,022428371	2,83569057	11,40636221	714	2,8536982

Σχήμα 5.17: Συνολικό (effective) ύψος κεραίας εξοπλισμού λήψης (μονάδα CPE)

Η στήλη AG αναφέρεται στο συνολικό ύψος κεραίας εξοπλισμού λήψης (γεωγραφικό ύψος συν ύψος του τρίποδα τοποθέτησης της μονάδος CPE) το οποίο έχει αποτυπωθεί στο excel αρχείο στην στήλη D, σχήμα 5.18

B	C	D	E
CPE Measurements & Characteristics			
CPE Geographical Height [m]	CPE pole Height (m)	CPE overall height [m]	CPE Antenna Gain Gr [dBi]
476	3	479	13
476	3	479	13
476	3	479	13
571	3	574	13
571	3	574	13
571	3	574	13
571	3	574	13
566	3	569	13
566	3	569	13
566	3	569	13
711	3	714	13
711	3	714	13
711	3	714	13
711	3	714	13
512	3	515	13
512	3	515	13

Σχήμα 5.18: Υπολογισμός συνολικού (effective) ύψους κεραίας εξοπλισμού λήψης (μονάδα CPE)

Στήλη AH :  $\log(h_r)$  → λογαριθμικό ύψος κεραίας εξοπλισμού λήψης (μονάδα CPE), συνυπολογίζοντας το γεωγραφικό ύψος καθώς και το ύψος του τρίποδα τοποθέτησης της μονάδος CPE, σχήμα 5.19.

AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH
Εκτίμηση Εξαγωγόμενου Μοντέλου Μοντέλου LoS - Φύλλο" LoS Pathloss Model"		Εξαγωγή Μοντέλου LoS					
Σφάλμα Εκτίμησης							
Regression pathloss estimation [dB]	Difference [dB]	L pathloss	log(d)	log(ht)	log(d) x log(ht)	hr	log(hr)
121,9727714	2,201889584	76,77088186	3,525044807	2,83569057	9,995936323	479	2,6803355
121,9495049	4,177656426	74,77184849	3,523746467	2,83569057	9,992254632	479	2,6803355
121,9959686	1,217235854	77,77873276	3,526339277	2,83569057	9,999607041	479	2,6803355
131,3889153	4,990670033	83,39824524	4,027349608	2,83569057	11,42031731	574	2,7589119
131,3816042	6,980262761	81,40134143	4,026941628	2,83569057	11,41916041	574	2,7589119
131,3962195	5,00007967	83,39613982	4,027757205	2,83569057	11,42147313	574	2,7589119
131,3742862	4,982733632	83,3915526	4,026533265	2,83569057	11,41800241	574	2,7589119
130,7601207	5,322392595	82,43772806	3,99343623	2,83569057	11,32414947	569	2,7551123
130,7680178	6,332396146	81,43562166	3,993876915	2,83569057	11,32539911	569	2,7551123
130,775907	7,335464204	80,44044276	3,994317153	2,83569057	11,32664749	569	2,7551123
131,8564701	1,889668351	86,9668018	4,02201574	2,83569057	11,40519211	714	2,8536982
131,871252	1,873769035	86,99748297	4,022840611	2,83569057	11,40753119	714	2,8536982
131,8638646	1,884214671	86,97964992	4,022428371	2,83569057	11,40636221	714	2,8536982
131,8786324	0,937803077	87,94082935	4,02325246	2,83569057	11,40869907	714	2,8536982
126,8670676	4,732345807	79,13472179	3,796574333	2,75739603	10,46865899	515	2,7118072
126,8421259	5,74974202	78,09238384	3,79518459	2,75739603	10,46482692	515	2,7118072

Σχήμα 5.19: Λογαριθμικό ύψος κεραίας εξοπλισμού λήψης (μονάδα CPE)

Η στήλη AH αναφέρεται στο συνολικό λογαριθμικό ύψος της κεραίας εξοπλισμού λήψης (γεωγραφικό ύψος συν ύψος του τρίποδα τοποθέτησης της μονάδος CPE) το οποίο έχει αποτυπωθεί στο excel αρχείο στην στήλη AG, σχήμα 5.17

Ακολουθώντας την τεχνική της γραμμικής παλινδρόμησης [29], προκύπτουν οι ακόλουθοι συντελεστές του LoS μοντέλου SPM με τα αντίστοιχα σφάλματα της προσέγγισης της γραμμικής παλινδρόμησης, Πίνακας 5.1:

Πίνακας 5.1: Συντελεστές του LoS μοντέλου SPM

	Coefficients	Standard Error
Intercept - K1	<b>43</b>	N/A
log(d) - K2	<b>18.89080706</b>	0.598474058
log(ht) - K3	<b>2.99323194</b>	0.893649681
log(d) x log(ht)- K5	<b>-0.342280245</b>	0.255885045
hr - K6	<b>0.002473909</b>	0.001568018
log(hr) - K7	<b>2.287161249</b>	0.858721744

Επομένως, το μοντέλο απωλειών διαδρομής στην περίπτωση LoS είναι το ακόλουθο:

$$L_{SPM}^{LoS} = 43 + 18.89080706 \cdot \log(d) + 2.99323194 \cdot \log(h_t) - 0.342280245 \cdot \log(d) \cdot \log(h_t) + 0.002473909 \cdot h_r + 2.287161249 \cdot \log(h_r) \quad (5.13)$$

Η στήλη standard error παρουσιάζει την εκτιμώμενη τυπική απόκλιση (estimated standard deviation) στις μεθόδους των ελαχίστων τετραγώνων στην γραμμική παλινδρόμηση από στις μετρούμενες τιμές του πίνακα.

Πράγματι, θεωρώντας στις τιμές του πίνακα μετρήσεων ως:

$$Y - \beta_1 = \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_5 x_5 + \beta_6 x_6 + \beta_7 x_7$$

ακολουθώντας η μέθοδος στις γραμμικής παλινδρόμησης εφαρμόσει στις αρχές των ελαχίστων τετραγώνων και εξήγαγε το αντίστοιχο μοντέλο παλινδρόμησης:

$$y - b_1 = b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_5 x_5 + b_6 x_6 + b_7 x_7$$

Η στήλη standard error του πίνακα 5.1 στην ουσία παρουσιάζει την τυπική απόκλιση των τιμών  $b_i$  από στις τιμές  $\beta_i$  όπου  $i = 1, 2, \dots, N$ , δηλαδή:

$$\text{Standard error} = \sqrt{\frac{\sum_i (b_i - \beta_i)^2}{N}} \quad (5.14)$$

Από στις τιμές των σφαλμάτων του πίνακα 5.1, παρατηρούμε ότι έχουμε πολύ καλή σύγκλιση στην προσέγγιση καθώς τα σφάλματα είναι πολύ μικρά.

Ο πίνακας 5.2 παρουσιάζει την στατιστική ανάλυση στις γραμμικής παλινδρόμησης:

**Πίνακας 5.2** Στατιστική ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης μοντέλου LoS

<i>egression Statistics</i>	
Multiple R	0.99754892
R Square	0.995103847
Observations	1194

Η μετρική R square =  $R^2 = 0.995103847$  σημαίνει ότι το ποσοστό 99.5103847% στις απόκλισης (variation) στις εκτιμώμενης τιμές  $y_i$  από την μέση τιμή  $\bar{y}_i$  κάθε μέτρησης της απώλειας διαδρομής (pathloss) του μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης μπορεί να εξηγηθεί από στις μεταβλητές  $\log(d)$ ,  $\log(h_t)$ ,  $\log(d) \cdot \log(h_t)$ ,  $h_r$  και  $\log(h_r)$ . Όσο μεγαλύτερο το ποσοστό τόσο καλύτερη είναι η εκτιμώμενη τιμή στις γραμμικής παλινδρόμησης, επομένως στην περίπτωση στις η τιμή των 99.5103847% θεωρείται πάρα πολύ καλή.



Η μετρική Multiple R είναι η τετραγωνική ρίζα του  $R^2$  και η τιμή Observations υποδηλώνει τον αριθμό των δειγμάτων επί των οποίων έγινε η εκτίμηση στις γραμμικής παλινδρόμησης.

Ακολουθεί ο πίνακας 5.3 της στατιστικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων του εκτιμώμενου μοντέλου σε σχέση με στις μετρήσεις του πεδίου.

**Πίνακας 5.3:** Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων εκτιμώμενου μοντέλου LoS vs. πραγματικών μετρήσεων πεδίου

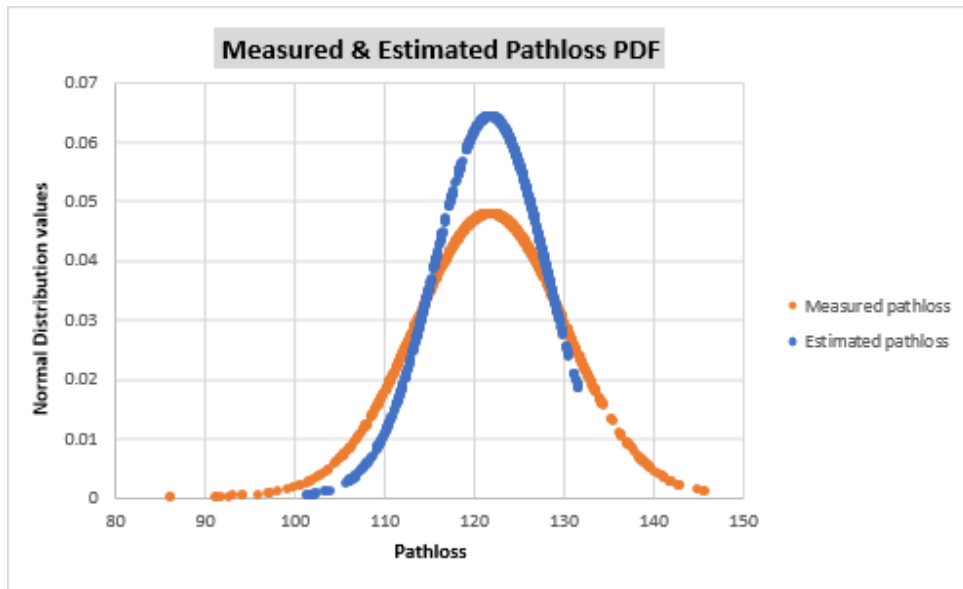
Statistical analysis		
Measurements	Mean $\mu$ [dB]	Standard Deviation $\sigma$ [dB]
Measured Pathloss Estimation LP [dB]	122.0153099	8.359080839
Regression pathloss estimation [dB]	122.0173515	6.216168012
Σφάλμα Εκτίμησης (Difference) [dB]	4.223826049	3.615265517

Η πρώτη γραμμή του πίνακα παρουσιάζει την στατιστική των μετρήσεων απωλειών του πεδίου, δηλαδή την μέση τιμή (mean  $\mu$ ) καθώς και την τυπική απόκλιση (standard deviation  $\sigma$ ) των τιμών

Αντιστοίχως, η δεύτερη γραμμή του πίνακα παρουσιάζει την στατιστική των εκτιμώμενων τιμών απωλειών βάσει της εξίσωσης (5.8), δηλαδή την μέση τιμή (mean  $\mu$ ) καθώς και την τυπική απόκλιση (standard deviation  $\sigma$ ) των τιμών αυτών.

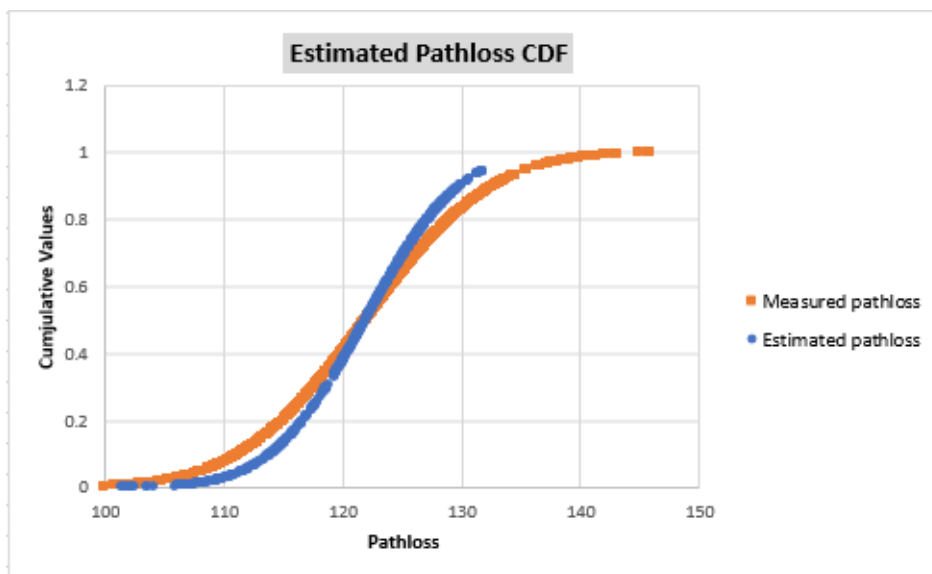
Παρατηρούμε ότι το εκτιμώμενο μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης παρουσιάζει ελάχιστη απόκλιση από στις πραγματικές μετρήσεις στην μέση τιμή, ήτοι  $|122.0153099 - 122.0173515| = 0.0020416 = 0.20416\%$ . Αυτό υποδηλώνει ότι το εκτιμώμενο μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης έχει πολύ καλή απόκριση στις μέσες τιμές των μετρούμενων απωλειών.

Ακολουθεί η κατανομή PDF, σχήμα 5.20, της απώλειας διαδρομής των πραγματικών μετρήσεων πεδίου και των εκτιμωμένων τιμών.



**Σχήμα 5.20:** Κατανομή PDF απωλειών διαδρομής των πραγματικών μετρήσεων πεδίου και των εκτιμωμένων τιμών στην περίπτωση LoS

Και αντιστοίχως η κατανομή CDF σχήμα 5.21 της απώλειας διαδρομής των πραγματικών μετρήσεων πεδίου και των εκτιμωμένων τιμών του μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης.



**Σχήμα 5.21:** Κατανομή CDF των πραγματικών μετρήσεων πεδίου και των εκτιμωμένων τιμών γραμμικής παλινδρόμησης στην περίπτωση LoS

Παρατηρούμε από τα σχήματα 5.20 και 5.21 ότι το εκτιμώμενο μοντέλο ΔΕΝ δίνει τιμές μεγαλύτερες των απωλειών διαδρομής 133 [dB] σε σχέση με στις πραγματικές μετρήσεις πεδίου οι οποίες έχουν ελάχιστες (σε σχέση με τον αριθμό 1194 δειγμάτων) τιμές μεγαλύτερες του 133 [dB]. Πράγματι το σχήμα 5.21 έχει περικοπή τιμών σε μεγάλες τιμές pathloss (truncated Gaussian

distribution). Αυτό οφείλεται στην μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων η οποία, εφόσον βάσει του συντελεστή  $R^2$  το 99% των τιμών εξηγείται ικανοποιητικά, προσεγγίζει των 99% των τιμών με πολύ καλή ακρίβεια και θεωρεί αμελητέες στις υπόλοιπες μεγαλύτερες τιμές.

Η καμπύλη PDF των εκτιμώμενων μετρήσεων έχει μικρότερη τυπική απόκλιση σε σχέση με αυτήν των πραγματικών μετρήσεων. Αυτό φαίνεται εξάλλου και από την τυπική απόκλιση από την αντίστοιχη μέση τιμή των πραγματικών μετρήσεων πεδίου 8.359080839, η οποία είναι μεγαλύτερη από αυτήν του εκτιμώμενου μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης 6.216168012, πίνακας 5.3. Οι μεγάλες ακραίες τιμές δεν υπάρχουν στο εκτιμώμενο μοντέλο με συνέπεια την καλύτερη προσέγγιση σε τιμές κοντά στην μέση τιμή, πράγμα που σημαίνει ότι το εκτιμώμενο μοντέλο παρουσιάζει μεγαλύτερη συγκέντρωση γύρω από την μέση τιμή.

Επιπλέον, στο αρχείο excel έχουμε υπολογίσει και το σφάλμα εκτίμησης, δηλαδή για κάθε τιμή  $Y_i$  του πίνακα μετρήσεων πεδίου και  $y_i$  του εκτιμώμενου μοντέλου έχουμε υπολογίσει την διαφορά  $|Y_i - y_i|$ , Πίνακας 5.3. Παρατηρούμε ότι το σφάλμα είναι μικρό, στις τάξεις των 4.223826049 με τυπική απόκλιση 3.615265517. Αυτό σημαίνει ότι εφόσον χρησιμοποιήσουμε το εκτιμώμενο μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης για σχεδιασμό δικτύου, θα πρέπει να προσθέτουμε στις εκτιμώμενες μετρήσεις και ένα σφάλμα  $\sim 4.22 \text{ dB} \pm \sigma/2 = 4.22 \text{ dB} \pm 3.615/2 = 4.22 \text{ dB} \pm 1.8$ . Αυτό το σφάλμα (margin) θα πρέπει να το προσθέτουμε σε μεγάλες αποστάσεις καθώς όπως είδαμε προηγουμένως το μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης περικόπτει στις μεγάλες τιμές απωλειών, οπότε εκεί αναμένεται να έχουμε τα μεγάλα σφάλματα εκτίμησης.

Τέλος από την στατιστική γνωρίζουμε ότι η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας (cumulative distribution function) μία πραγματικής τυχαίας μεταβλητής (Random Variable)  $X$  παρουσιάζει την πιθανότητα η τυχαία μεταβλητή  $X$  να πάρει τιμές μικρότερες ή ίσες της τιμής  $x$ , δηλαδή  $F_X(x) = P(X \leq x)$ . Στην προκειμένη περίπτωση οι κατανομές CDF του σχήματος 5.21 παρουσιάζουν την πιθανότητα η τυχαία μεταβλητή  $L$  να πάρει τιμές μικρότερες ή ίσες της τιμής  $L_{pathloss}$ , δηλαδή  $F_L(L_{pathloss}) = P(L \leq L_{pathloss})$ . Παρατηρώντας τις καμπύλες CDF των πραγματικών μετρήσεων πεδίου και των εκτιμώμενων τιμών γραμμικής παλινδρόμησης βλέπουμε ότι διαφέρουν ελάχιστα, το οποίο σημαίνει ότι η εκτίμηση της γραμμικής παλινδρόμησης είναι πολύ επιτυχής καθώς οι πιθανότητες οι τυχαίες μεταβλητές  $L_{estimated}$  και  $L_{measured}$  να πάρουν τιμές μικρότερες ή ίσες της τιμής  $L_{pathloss}$  είναι περίπου ίσες, με ελάχιστες έως αμελητέες αποκλίσεις στα διαστήματα [108 dBm, 118 dBm] και [126 dBm, 132 dBm] καθώς και στις ακραίες τιμές (μικρές ή μεγάλες) όπου το εκτιμώμενο μοντέλο έχει παρουσιάζει το φαινόμενο της σύντμησης (truncated values) λόγω της τεχνικής των ελαχίστων τετραγώνων, όπως εξηγήσαμε παραπάνω.

## 5.5.2 Μοντέλο Απωλειών Αγροτικής Περιοχής, περίπτωση NLoS

Στην περίπτωση μετρήσεων υπό συνθήκες NLoS, παρουσία περίθλασης λόγω Fresnel και φυλλωμάτων, θα εξαχθεί ένα συνολικό μοντέλο το οποίο θα συμπεριλαμβάνει στις απώλειες περίθλασης  $Diff_{Loss}$ . Οι απώλειες  $L_{foliage}$  θα πρέπει να παραληφθούν και εδώ καθώς δεν έχουμε στις μετρήσεις απώλειες από φυλλώματα δέντρων, δηλαδή θα πρέπει να θέσουμε την τιμή του συντελεστή  $K_8 = 0$ .

Ο συνολικός τύπος του NLoS μοντέλου SPM θα γίνει:

$$L_{SPM}^{NLoS} - K_1 = K_2 \cdot \log(d) + K_3 \cdot \log(h_t) + K_4 \cdot Diff_{Loss} + K_5 \cdot \log(d) \cdot \log(h_t) + K_6 \cdot h_r + K_7 \cdot \log(h_r) \quad (5.15)$$

Ακολουθώντας τα προαναφερθέντα βήματα της παραγράφου 5.5.1, φτιάχνουμε από την επεξεργασία των μετρήσεων ένα αρχείο excel, σχήμα 5.22, με τις ακόλουθες στήλες:

Στήλη AD:  $\log(d)$  → λογαριθμική απόσταση κεραίας σταθμού βάσης από το σημείο μέτρησης

Στήλη AE:  $\log(h_t)$  → λογαριθμικό ύψος κεραίας σταθμού βάσης, συνυπολογίζοντας το γεωγραφικό ύψος καθώς και το ύψος του πυλώνα

Στήλη AF:  $Diff_{Loss}$  → απώλειες λόγω περίθλασης – φαινόμενο Fresnel σε [dB]

Στήλη AG:  $\log(d) \cdot \log(h_t)$  → γινόμενο λογαριθμικού ύψους κεραίας σταθμού βάσης και λογαριθμικής απόστασης κεραίας σταθμού βάσης από το σημείο μέτρησης

Στήλη AH:  $h_r$  → ύψους κεραίας εξοπλισμού λήψης (μονάδα CPE), συνυπολογίζοντας το γεωγραφικό ύψος καθώς και το ύψος του τρίποδα τοποθέτησης της μονάδος CPE

Στήλη AI:  $\log(h_r)$  → λογαριθμικό ύψος κεραίας εξοπλισμού λήψης (μονάδα CPE), συνυπολογίζοντας το γεωγραφικό ύψος καθώς και το ύψος του τρίποδα τοποθέτησης της μονάδος CPE

AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI
Εκτίμηση Εξαγόμενου Μοντέλου Μοντέλου nLoS - Φύλλο " nLoS Pathloss Analysis"		Εξαγωγή Μοντέλου LoS						
Regression pathloss estimation								
	Difference	L pathloss	log(d)	log(ht)	Diff <sub>Loss</sub>	log(d) x log(ht)	hr	log(hr)
118,7700608	18,41154079	94,18160161	3,245512668	2,51054501	10	8,148005634	253	2,4031205
118,7294381	17,57521554	93,30465368	3,240308049	2,51054501	10	8,141792991	253	2,4031205
118,6885827	18,4447771	94,13335977	3,240549248	2,51054501	10	8,135544746	253	2,4031205
116,2776446	4,967522926	68,31012171	2,973127854	2,49136169	3	7,407136845	38	1,5797836
116,200919	7,152892005	66,04802698	2,968482949	2,49136169	3	7,395564707	38	1,5797836
116,1233639	4,827747377	68,29561648	2,963787827	2,49136169	3	7,383867462	38	1,5797836
136,3982682	4,04904737	97,44731558	3,1430148	3,02325246	8	9,502127226	628	2,7979596
136,3553841	2,068453161	95,42383727	3,139879086	3,02325246	8	9,492647171	628	2,7979596
136,3121881	3,89953032	97,21171845	3,136720567	3,02325246	8	9,48309817	628	2,7979596
134,9447356	7,696178775	99,64091433	3,212187604	3,02325246	4	9,711254076	565	2,7520484
134,9810624	7,718620031	99,69968244	3,214843848	3,02325246	4	9,719284571	565	2,7520484
134,9081852	6,737290154	98,64547531	3,209515015	3,02325246	4	9,703174162	565	2,7520484
132,6565006	6,016601015	83,63989956	3,426511261	2,83058867	14	9,69904395	510	2,7075702
132,6325361	7,814944805	81,81759126	3,424881637	2,83058867	14	9,694431152	510	2,7075702
131,3355134	4,870208649	83,46530471	3,376576957	2,8488047	13	9,619208309	493	2,6928469
131,3088006	4,824453878	83,48434676	3,374748346	2,8488047	13	9,613998953	493	2,6928469

**Σχήμα 5.22:** Συνολική παρουσίαση των μεταβλητών εξαγωγής nLoS μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης στις στήλες του λογισμικού excel

Ακολουθώντας την τεχνική της γραμμικής παλινδρόμησης προκύπτουν οι ακόλουθοι συντελεστές του NLoS μοντέλου SPM με τα αντίστοιχα σφάλματα της προσέγγισης της γραμμικής παλινδρόμησης, Πίνακας 5.4.

**Πίνακας 5.4:** Συντελεστές του nLoS μοντέλου SPM

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>
Intercept - K1	<b>43</b>	N/A
log(d) - K2	<b>29.83109046</b>	1.625447205
log(ht) - K3	<b>20.06506298</b>	2.949954647
Diff <sub>Loss</sub> - K4	<b>-0.212216823</b>	0.042231627
log(d) x log(ht) - K5	<b>-5.343605022</b>	0.799033567
hr - K6	<b>0.064307469</b>	0.007542621
log(hr) - K7	<b>-17.48945257</b>	2.94795524

Επομένως, το μοντέλο απωλειών διαδρομής στην περίπτωση NLoS είναι το ακόλουθο:

$$L_{SPM}^{NLoS} = 43 + 29.83109046 \cdot \log(d) + 20.06506298 \cdot \log(h_t) - 0.212216823 \cdot Diff_{Loss} - 5.343605022 \cdot \log(d) \cdot \log(h_t) + 0.064307469 \cdot h_r - 17.48945257 \cdot \log(h_r) \quad (5.16)$$

Η στήλη standard error παρουσιάζει την εκτιμώμενη τυπική απόκλιση (estimated standard deviation) της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων στην γραμμική παλινδρόμηση από τις μετρούμενες τιμές του πίνακα.

Πράγματι, θεωρώντας τις τιμές του πίνακα μετρήσεων ως:

$$Y - \beta_1 = \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_5 x_5 + \beta_6 x_6 + \beta_7 x_7$$

ακολουθώντας η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης εφάρμοσε τις αρχές των ελαχίστων τετραγώνων και εξήγαγε το αντίστοιχο μοντέλο παλινδρόμησης:

$$y - b_1 = b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_5 x_5 + b_6 x_6 + b_7 x_7$$

Η στήλη standard error του πίνακα 5.4 στην ουσία παρουσιάζει την τυπική απόκλιση των τιμών  $b_i$  από τις τιμές  $\beta_i$  όπου  $i = 1, 2, \dots, N$ , δηλαδή:

$$\text{Standard error} = \sqrt{\frac{\sum_i (b_i - \beta_i)^2}{N}}$$

Από τις τιμές των σφαλμάτων του πίνακα 5.4, παρατηρούμε ότι έχουμε πολύ καλή σύγκλιση στην προσέγγιση καθώς τα σφάλματα είναι πολύ μικρά.

Ο πίνακας 5.5 παρουσιάζει την στατιστική ανάλυση της γραμμικής παλινδρόμησης:

**Πίνακας 5.5:** Στατιστική ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης μοντέλου nLoS

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.99688967
R Square	0.993789014
Observations	299

Η μετρική R square =  $R^2 = 0.993789014$  σημαίνει ότι το ποσοστό 99.3789014% της απόκλισης (variation) της εκτιμώμενης τιμής  $y_i$  από την μέση τιμή  $\bar{y}_i$  κάθε μέτρησης της απώλειας διαδρομής (pathloss) του μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης μπορεί να εξηγηθεί από τις μεταβλητές  $\log(d)$ ,  $Diff_{Loss}$ ,  $\log(h_t)$ ,  $\log(d) \cdot \log(h_t)$ ,  $h_r$  και  $\log(h_r)$ . Όσο μεγαλύτερο το ποσοστό τόσο καλύτερη είναι η εκτιμώμενη τιμή της γραμμικής παλινδρόμησης, επομένως στην περίπτωση μας η τιμή των 99.3789014% θεωρείται πάρα πολύ καλή.

Η μετρική Multiple R είναι η τετραγωνική ρίζα της  $R^2$  και η τιμή Observations υποδηλώνει τον αριθμό των δειγμάτων επί των οποίων έγινε η εκτίμηση της γραμμικής παλινδρόμησης.

Ακολουθεί ο πίνακας 5.6 της στατιστικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων του εκτιμώμενου μοντέλου σε σχέση με τις μετρήσεις του πεδίου.

**Πίνακας 5.6:** Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων εκτιμώμενου μοντέλου nLoS vs. πραγματικών μετρήσεων πεδίου

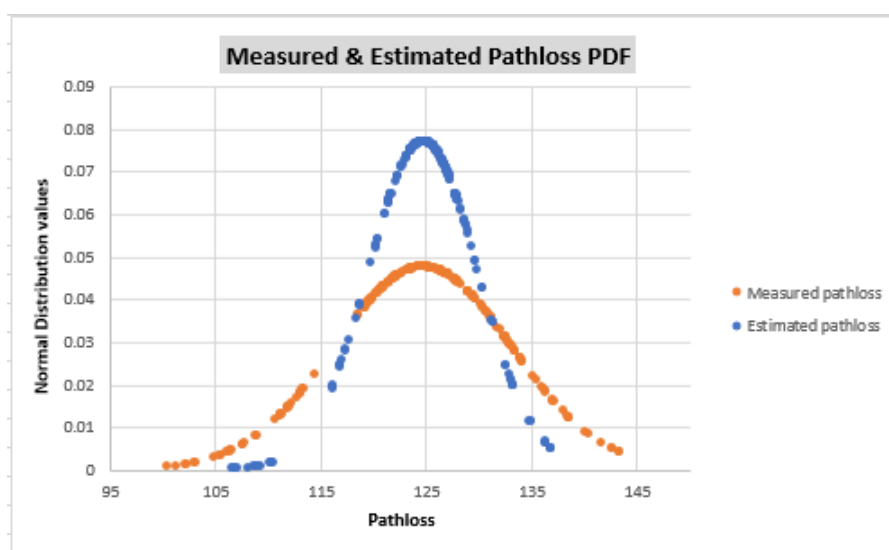
Statistical analysis		
Measurements	Mean $\mu$ [dB]	Standard Deviation $\sigma$ [dB]
Measured Pathloss Estimation LP [dB]	124.7997025	8.380970719
Regression pathloss estimation [dB]	124.8085624	5.176482574
Σφάλμα Εκτίμησης (Difference) [dB]	4.678853721	4.483691126

Η πρώτη γραμμή του πίνακα παρουσιάζει την στατιστική των μετρήσεων απωλειών του πεδίου, δηλαδή την μέση τιμή (mean  $\mu$ ) καθώς και την τυπική απόκλιση (standard deviation  $\sigma$ ) των τιμών

Αντιστοίχως η δεύτερη γραμμή του πίνακα παρουσιάζει την στατιστική των εκτιμώμενων τιμών απωλειών, δηλαδή την μέση τιμή (mean  $\mu$ ) καθώς και την τυπική απόκλιση (standard deviation  $\sigma$ ) των τιμών αυτών.

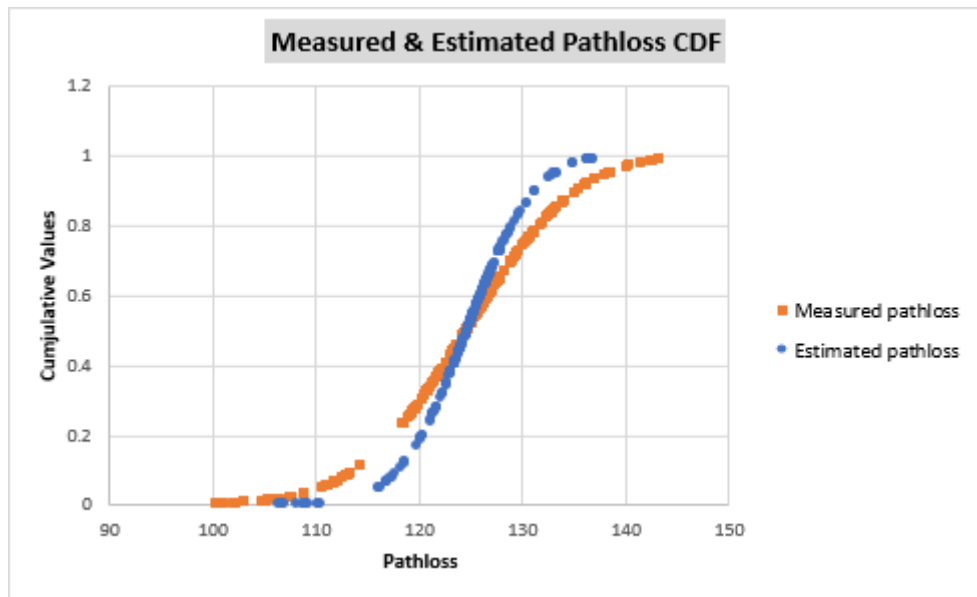
Παρατηρούμε ότι το εκτιμώμενο μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης παρουσιάζει ελάχιστη απόκλιση από τις πραγματικές μετρήσεις στην μέση τιμή, ήτοι  $|124.7997025 - 124.8085624| = 0.0088599 = 0.88599\%$ . Αυτό υποδηλώνει ότι το εκτιμώμενο μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης έχει πολύ καλή απόκριση στις μέσες τιμές των μετρούμενων απωλειών.

Ακολουθεί η κατανομή PDF, σχήμα 5.23, της απώλειας διαδρομής των πραγματικών μετρήσεων πεδίου και των εκτιμωμένων τιμών



**Σχήμα 5.23:** Κατανομή PDF των πραγματικών μετρήσεων πεδίου και των εκτιμωμένων τιμών γραμμικής παλινδρόμησης στην περίπτωση nLoS

Αντιστοίχως ακολουθεί η κατανομή CDF σχήμα 5.24 της απώλειας διαδρομής των πραγματικών μετρήσεων πεδίου και των εκτιμωμένων τιμών μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης.



**Σχήμα 5.24:** Κατανομή CDF των πραγματικών μετρήσεων πεδίου και των εκτιμωμένων τιμών γραμμικής παλινδρόμησης στην περίπτωση nLoS

Παρατηρούμε από τα σχήματα 5.23 και 5.24 ότι το εκτιμώμενο μοντέλο ΔΕΝ δίνει τιμές μεγαλύτερες των απωλειών διαδρομής 138 [dB] σε σχέση με τις πραγματικές μετρήσεις πεδίου οι οποίες έχουν ελάχιστες (σε σχέση με τον αριθμό των 299 δειγμάτων) τιμές μεγαλύτερες του 138 [dB]. Πράγματι το σχήμα 5.24 έχει περικοπή τιμών σε μεγάλες τιμές pathloss (truncated Gaussian distribution). Αυτό οφείλεται στην μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων η οποία, εφόσον βάσει του συντελεστή  $R^2$  το 99% των τιμών εξηγείται ικανοποιητικά, προσεγγίζει των 99% των τιμών με πολύ καλή ακρίβεια και θεωρεί αμελητέες τις υπόλοιπες μεγαλύτερες τιμές.

Η καμπύλη PDF των εκτιμωμένων μετρήσεων έχει μικρότερη τυπική απόκλιση σε σχέση με αυτήν των πραγματικών μετρήσεων. Αυτό φαίνεται εξάλλου και από την τυπική απόκλιση από την αντίστοιχη μέση τιμή των πραγματικών μετρήσεων πεδίου 8.380970719, η οποία είναι μεγαλύτερη από αυτήν του εκτιμωμένου μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης 5.176482574, πίνακας 5.6. Οι μεγάλες ακραίες τιμές δεν υπάρχουν στο εκτιμώμενο μοντέλο με συνέπεια την καλύτερη προσέγγιση σε τιμές κοντά στην μέση τιμή, πράγμα που σημαίνει ότι το εκτιμώμενο μοντέλο παρουσιάζει μεγαλύτερη συγκέντρωση γύρω από την μέση τιμή και λειτουργεί ικανοποιητικά σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Ορίζουμε κανονικές συνθήκες λειτουργίας



την ράδιο-κάλυψη από μία κεραία σταθμού βάσεις στα πλαίσια εκπομπής του διαγράμματος ακτινοβολίας της όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4 παράγραφος 4.4.

Επιπλέον στο αρχείο excel έχουμε υπολογίσει και το σφάλμα εκτίμησης, δηλαδή για κάθε τιμή  $Y_i$  του πίνακα μετρήσεων πεδίου και  $y_i$  του εκτιμώμενου μοντέλου έχουμε υπολογίσει την διαφορά  $|Y_i - y_i|$ , πίνακας 5.6. Παρατηρούμε ότι το σφάλμα είναι μικρό, της τάξης των 4.678853721 με τυπική απόκλιση 4.483691126. Αυτό σημαίνει ότι εφόσον χρησιμοποιήσουμε το εκτιμώμενο μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης για σχεδιασμό δικτύου, θα πρέπει να προσθέτουμε στις εκτιμώμενες μετρήσεις και ένα σφάλμα  $\sim 4.68 \text{ dB} \pm \sigma/2 = 4.68 \text{ dB} \pm 2.24$ . Αυτό το σφάλμα (margin) θα πρέπει να το προσθέτουμε σε μεγάλες αποστάσεις καθώς όπως είδαμε προηγουμένως το μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης περικόπτει τις μεγάλες τιμές απωλειών, οπότε εκεί αναμένεται να έχουμε τα μεγάλα σφάλματα εκτίμησης.

Τέλος από την στατιστική γνωρίζουμε ότι η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας (cumulative distribution function) μία πραγματικής τυχαίας μεταβλητής (Random Variable)  $X$  παρουσιάζει την πιθανότητα η τυχαία μεταβλητή  $X$  να πάρει τιμές μικρότερες ή ίσες της τιμής  $x$ , δηλαδή  $F_X(x) = P(X \leq x)$ . Στην προκειμένη περίπτωση οι κατανομές CDF του σχήματος 5.24 παρουσιάζουν την πιθανότητα η τυχαία μεταβλητή  $L$  να πάρει τιμές μικρότερες ή ίσες της τιμής  $L_{pathloss}$ , δηλαδή  $F_L(L_{pathloss}) = P(L \leq L_{pathloss})$ . Παρατηρώντας τις καμπύλες CDF των πραγματικών μετρήσεων πεδίου και των εκτιμωμένων τιμών γραμμικής παλινδρόμησης βλέπουμε ότι διαφέρουν ελάχιστα, το οποίο σημαίνει ότι η εκτίμηση της γραμμικής παλινδρόμησης είναι αρκετά επιτυχής καθώς οι πιθανότητες οι τυχαίες μεταβλητές  $L_{estimated}$  και  $L_{measured}$  να πάρουν τιμές μικρότερες ή ίσες της τιμής  $L_{pathloss}$  είναι περίπου ίσες στις μεσαίες τιμές, με σχετικές αποκλίσεις μεταξύ των μεσαίων τιμών στα διαστήματα [120 dBm, 110 dBm] και [130 dBm, 140 dBm] καθώς και στις ακραίες τιμές (μικρές ή μεγάλες) όπου το εκτιμώμενο μοντέλο έχει παρουσιάζει το φαινόμενο της σύντμησης (truncated values) λόγω της τεχνικής των ελαχίστων τετραγώνων, όπως εξηγήσαμε παραπάνω

### 5.5.3 Μοντέλο Απωλειών Φυλλωμάτων

Στα πρότυπα της ITU-R [27], όπως προαναφέρθηκε στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο στην παράγραφο 4.5, παρουσιάζεται ένα μοντέλο υπολογισμού των απωλειών λόγω φυλλωμάτων σε συχνότητες λειτουργίας διαφορετικές των 3.6-3,8 GHz.

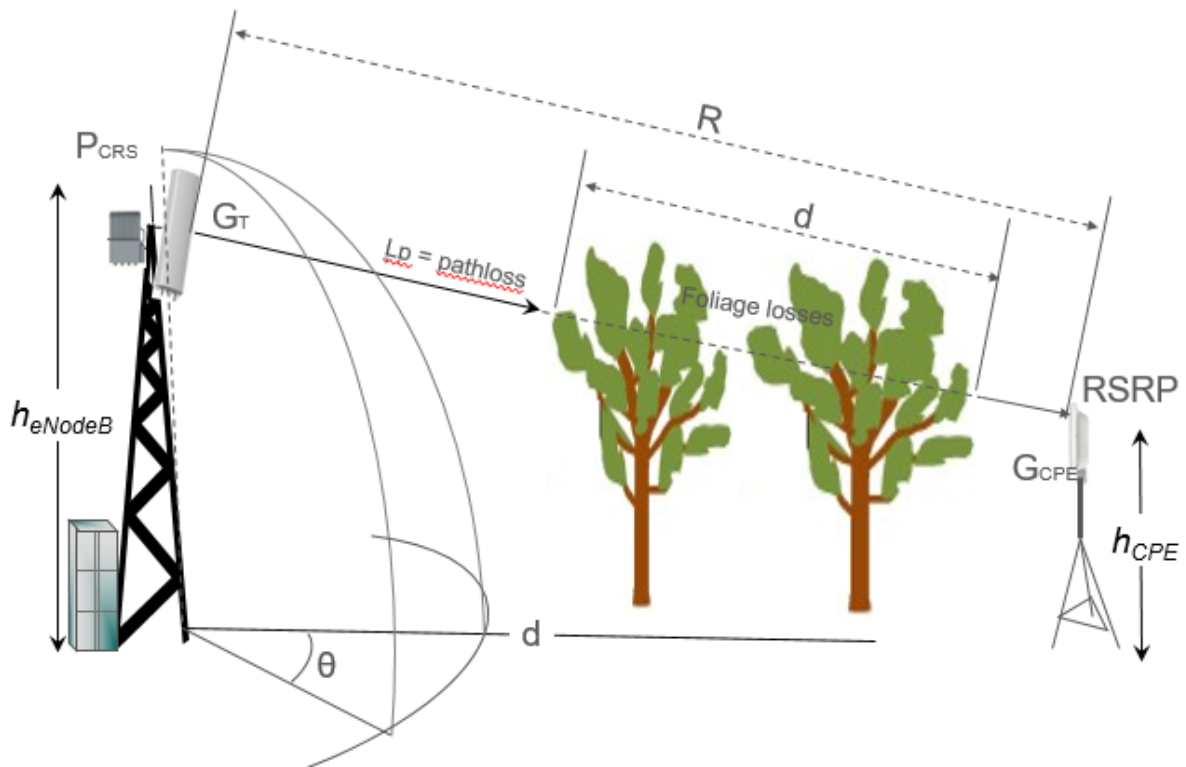
Το μοντέλο αναλυτικού υπολογισμού των επιπλέον απωλειών είναι το ακόλουθο:

$$L_{foll} = d \cdot \gamma$$

Όπου:

$d$  [m]: είναι η απόσταση του δέκτη από τον πομπό διαμέσου των φυλλωμάτων

$\gamma$  [dB/m]: ειδικός συντελεστής απωλειών (specific attenuation) για μικρής απόστασης δασώδους όπως φαίνεται στο σχήμα 5.25:



Σχήμα 5.25: Παρουσίαση υπολογισμού ειδικού συντελεστή απωλειών (specific attenuation)

Επίσης, στην εργασία [30] παρουσιάζεται ένα αντίστοιχο μοντέλο το οποίο περιλαμβάνει και την συχνότητα ως ακολούθως:

$$L_{foli} = x \cdot d^y \cdot f^z$$

(5.18)

Αξίζει να σημειωθεί ότι, εφόσον ο σχεδιαστής δικτύου αποφασίσει να συμπεριλάβει την απώλεια φυλλωμάτων  $L_{foli}$  ως επιπλέον περιθώριο (margin losses) απωλειών σε έναν **γενικό μοντέλο απωλειών**  $L_p$  τύπου Okomura-Hata, ο συνυπολογισμός των επιπλέον απωλειών (excessive attenuation) λόγω φυλλωμάτων **θα πρέπει ΠΑΝΤΑ να προστίθεται** (εάν χρησιμοποιούμε μονάδα [dB]) στις άλλες συνολικές απώλειες  $\sum_i L_i$ , δηλαδή:

$$L_{pathloss} = L_p + \sum_i L_i + L_{foll}$$

Εντούτοις, στην περίπτωση της παραγράφου 5.5.2 **ΔΕΝ θα πρέπει να προστεθεί** η απώλεια  $L_{foll}$  ως επιπλέον απώλεια στον γενικό τύπο  $L_{SPM}^{NLoS}$ , καθώς ο τύπος απωλειών στην περίπτωση του NLoS έχει ήδη ενδογενώς συμπεριλάβει την συνεισφορά των απωλειών φυλλωμάτων στην ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης. Το προτεινόμενο γενικό μοντέλο απωλειών NLoS πρέπει να χρησιμοποιείται αυτούσιο για την χλωρίδα της Ελλάδος στην περιοχή της Στερεάς και Δυτικής Ελλάδος, όπως παρουσιάζεται στην τεχνική μελέτη [31], αλλά και συγκεκριμένα για κατηγορίες δέντρων όπως παρουσιάζονται στην εργασία [32].

Στην παρούσα διατριβή και ειδικότερα στην περίπτωση μετρήσεων υπό συνθήκες NLoS λόγω απωλειών χλωρίδας (dense tree foliage), θα εξαχθεί ένα συνολικό μοντέλο το οποίο θα συμπεριλαμβάνει τις απώλειες φυλλωμάτων  $L_{foliage}$  με συγκεκριμένη τιμή του συντελεστή  $K_8$  η οποία θα εξαχθεί από την προσέγγιση της γραμμικής παλινδρόμησης. Οι απώλειες  $Diff_{loss}$  θα πρέπει να παραληφθούν εδώ καθώς δεν έχουμε στις μετρήσεις απώλειες από περίθλαση, δηλαδή θα πρέπει να θέσουμε την τιμή του συντελεστή  $K_4 = 0$

Ο συνολικός τύπος του μοντέλου απωλειών φυλλωμάτων SPM θα γίνει:

$$L_{SPM}^{foliage} - K_1 = K_2 \cdot \log(d) + K_3 \cdot \log(h_t) + K_5 \cdot \log(d) \cdot \log(h_t) + K_6 \cdot h_r + K_7 \cdot \log(h_r) + K_8 \cdot L_{foliage} \quad (5.19)$$

Ακολουθώντας τα προαναφερθέντα βήματα της παραγράφου 5.5, φτιάχνουμε από την επεξεργασία των μετρήσεων ένα αρχείο excel, σχήμα 5.26, με τις ακόλουθες στήλες:

Στήλη AD:  $\log(d)$  → λογαριθμική απόσταση κεραίας σταθμού βάσης από το σημείο μέτρησης

Στήλη AE:  $\log(h_t)$  → λογαριθμικό ύψος κεραίας σταθμού βάσης, συνυπολογίζοντας το γεωγραφικό ύψος καθώς και το ύψος του πυλώνα

Στήλη AF:  $\log(d) \cdot \log(h_t)$  → γινόμενο λογαριθμικού ύψους κεραίας σταθμού βάσης και λογαριθμικής απόστασης κεραίας σταθμού βάσης από το σημείο μέτρησης

Στήλη AG:  $h_r$  → ύψους κεραίας εξοπλισμού λήψης (μονάδα CPE), συνυπολογίζοντας το γεωγραφικό ύψος καθώς και το ύψος του τρίποδα τοποθέτησης της μονάδος CPE

Στήλη AH :  $\log(h_r)$  → λογαριθμικό ύψος κεραίας εξοπλισμού λήψης (μονάδα CPE), συνυπολογίζοντας το γεωγραφικό ύψος καθώς και το ύψος του τρίποδα τοποθέτησης της μονάδος CPE

Στήλη AI :  $L_{foliage}$  → απώλειες φυλλωμάτων σε [dB]

AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI
Εκτίμηση Εξαγόμενου Μοντέλου nLoS - Φύλλο "Folliage Pathloss Model"		Εξαγωγή Μοντέλου foliage						
Σφάλμα Εκτίμησης								
Regression pathloss estimation	Difference	L pathloss	log(d)	log(ht)	log(d) x log(ht)	hr	log(hr)	L <sub>fol</sub>
131,8050579	0,495721155	88,30933674	3,646403726	2,8488047	10,38789208	262	2,4183013	8
131,7325731	0,496421379	88,2361517	3,64738297	2,8488047	10,39068175	262	2,4183013	9
131,7884771	0,509286665	88,27919043	3,645422269	2,8488047	10,3850961	262	2,4183013	8
131,6828305	1,399729202	87,28310132	3,644438589	2,8488047	10,38229379	262	2,4183013	9
133,705158	0,681487494	90,02367046	3,525044807	2,63548375	9,290198296	9	0,9542425	10
133,7478226	0,666323936	90,0814987	3,522444234	2,63548375	9,283344526	9	0,9542425	9
133,6392078	0,713334799	89,92587302	3,526339277	2,63548375	9,293609851	9	0,9542425	11
133,6820109	0,629363017	90,05264787	3,523746467	2,63548375	9,286776541	9	0,9542425	10
105,8890945	2,787876719	60,10121776	3	2,29225607	6,876768214	90	1,9542425	32
106,6002366	4,175773313	59,4244633	3,041392685	2,29225607	6,971650848	90	1,9542425	33
107,9137	5,677547443	59,23615253	3,113943352	2,29225607	7,137955555	90	1,9542425	34
108,4468404	8,226060095	57,22078027	3,146128036	2,29225607	7,211731091	90	1,9542425	35
107,1651986	0,674547884	63,49065077	3,093421685	2,29225607	7,090914639	91	1,9590414	38
107,0081908	1,298617621	62,70957319	3,089905111	2,29225607	7,082853752	91	1,9590414	39
106,9595859	0,48006613	63,47951975	3,08278537	2,29225607	7,066533482	91	1,9590414	38

Σχήμα 5.26: Συνολική παρουσίαση των μεταβλητών εξαγωγής μοντέλου Foliage γραμμικής παλινδρόμησης στις στήλες του λογισμικού excel

Ακολουθώντας την τεχνική της γραμμικής παλινδρόμησης, προκύπτουν οι ακόλουθοι συντελεστές του μοντέλου απωλειών φυλλωμάτων SPM με τα αντίστοιχα σφάλματα της προσέγγισης της γραμμικής παλινδρόμησης, Πίνακας 5.7.

Πίνακας 5.7: Συντελεστές SPM μοντέλου Foliage

	Coefficients	Standard Error
Intercept - K1	<b>43</b>	N/A
log(d) - K2	<b>29.36903851</b>	1.649113689
log(h <sub>t</sub> ) - K3	<b>19.23706537</b>	3.711460162
log(d) x log(h <sub>t</sub> ) - K5	<b>-4.379020696</b>	0.981976136
h <sub>r</sub> - K6	<b>0.120137718</b>	0.017461819
log(h <sub>r</sub> ) - K7	<b>-24.13430369</b>	3.499486798
L <sub>fol</sub> - K8	<b>-0.089028219</b>	0.05767356

Επομένως, το μοντέλο απωλειών διαδρομής στην περίπτωση απωλειών φυλλωμάτων είναι το ακόλουθο:

$$L_{SPM}^{foliage} = 43 + 29.36903851 \cdot \log(d) + 19.23706537 \cdot \log(h_t) - 4.379020696 \cdot \log(d) \cdot \log(h_t) + 0.120137718 \cdot h_r - 24.13430369 \cdot \log(h_r) - 0.089028219 \cdot L_{foliage}$$

(5.20)

Η στήλη standard error παρουσιάζει την εκτιμώμενη τυπική απόκλιση (estimated standard deviation) της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων στην γραμμική παλινδρόμηση από τις μετρούμενες τιμές του πίνακα.

Από τις τιμές των σφαλμάτων του πίνακα 5.7, παρατηρούμε ότι έχουμε πολύ καλή σύγκλιση στην προσέγγιση καθώς τα σφάλματα είναι πολύ μικρά.

Ο πίνακας 5.8 παρουσιάζει την στατιστική ανάλυση της γραμμικής παλινδρόμησης:

**Πίνακας 5.8:** Στατιστική ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης μοντέλου Foliage

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.998407284
R Square	0.996817104
Observations	145

Η μετρική R square =  $R^2 = 0.996817104$  σημαίνει ότι το ποσοστό 99.6817104% της απόκλισης (variation) της εκτιμώμενης τιμής  $y_i$  από την μέση τιμή  $\bar{y}_i$  κάθε μέτρησης της απώλειας διαδρομής (pathloss) του μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης μπορεί να εξηγηθεί από τις μεταβλητές  $\log(d)$ ,  $L_{foliage}$ ,  $\log(h_t)$ ,  $\log(d) \cdot \log(h_t)$ ,  $h_r$  και  $\log(h_r)$ . Όσο μεγαλύτερο το ποσοστό τόσο καλύτερη είναι η εκτιμώμενη τιμή της γραμμικής παλινδρόμησης, επομένως στην περίπτωση μας η τιμή των 99.6817104% θεωρείται πάρα πολύ καλή.

Η μετρική Multiple R είναι η τετραγωνική ρίζα της  $R^2$  και η τιμή Observations υποδηλώνει τον αριθμό των δειγμάτων επί των οποίων έγινε η εκτίμηση της γραμμικής παλινδρόμησης.

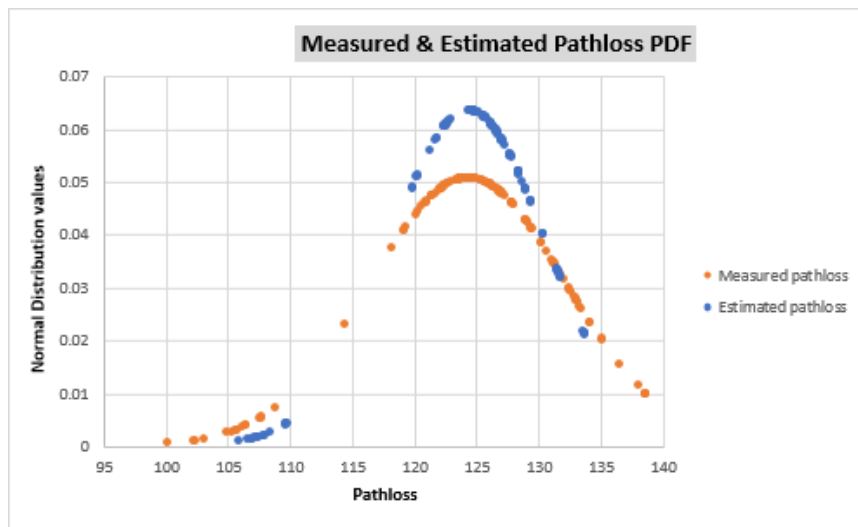
Ακολουθεί ο πίνακας 5.9 της στατιστικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων του εκτιμώμενου μοντέλου σε σχέση με τις μετρήσεις του πεδίου

**Πίνακας 5.9:** Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων εκτιμώμενου μοντέλου Foliage vs. πραγματικών μετρήσεων πεδίου

Statistical analysis		
Measurements	Mean $\mu$ [dB]	Standard Deviation $\sigma$ [dB]
Measured Pathloss Estimation LP [dB]	124.4058944	7.871584579
Regression pathloss estimation [dB]	124.4126093	6.29114619
Σφάλμα Εκτίμησης (Difference) [dB]	3.659651413	2.810153779

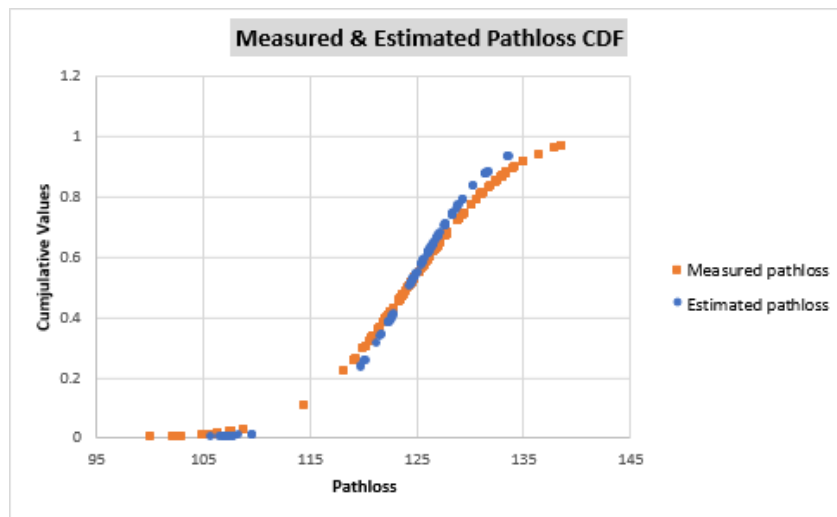
Παρατηρούμε ότι το εκτιμώμενο μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης παρουσιάζει ελάχιστη απόκλιση από τις πραγματικές μετρήσεις στην μέση τιμή. Αυτό υποδηλώνει ότι το εκτιμώμενο μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης έχει πολύ καλή απόκριση στις μέσες τιμές των μετρούμενων απωλειών.

Ακολουθεί η κατανομή PDF, σχήμα 5.27, της απώλειας διαδρομής των πραγματικών μετρήσεων πεδίου και των εκτιμωμένων τιμών.



**Σχήμα 5.27:** Κατανομή PDF των πραγματικών μετρήσεων πεδίου και των εκτιμωμένων τιμών γραμμικής παλινδρόμησης στην περίπτωση Foliage Losses

Και αντιστοίχως η κατανομή CDF σχήμα 5.28 του εκτιμώμενου μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης



**Σχήμα 5.28:** Κατανομή CDF των πραγματικών μετρήσεων πεδίου και των εκτιμωμένων τιμών γραμμικής παλινδρόμησης στην περίπτωση Foliage Losses

Παρατηρούμε από τα σχήματα 5.27 και 5.28 ότι το εκτιμώμενο μοντέλο ΔΕΝ δίνει τιμές μεγαλύτερες των απωλειών διαδρομής 135 [dB] σε σχέση με τις πραγματικές μετρήσεις πεδίου οι οποίες έχουν ελάχιστες (σε σχέση με τον αριθμό των 145 δειγμάτων) τιμές μεγαλύτερες του 135 [dB]. Πράγματι το σχήμα 5.28 έχει περικοπή τιμών σε μεγάλες τιμές pathloss (truncated Gaussian distribution). Αυτό οφείλεται στην μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων η οποία, εφόσον βάσει του συντελεστή  $R^2$  το 99% των τιμών εξηγείται ικανοποιητικά, προσεγγίζει των 99% των τιμών με πολύ καλή ακρίβεια και θεωρεί αμελητέες τις υπόλοιπες μεγαλύτερες τιμές.

Η καμπύλη PDF των εκτιμωμένων μετρήσεων έχει μικρότερη τυπική απόκλιση σε σχέση με αυτήν των πραγματικών μετρήσεων. Αυτό φαίνεται εξάλλου και από την τυπική απόκλιση από την αντίστοιχη μέση τιμή των πραγματικών μετρήσεων πεδίου η οποία είναι μεγαλύτερη από αυτήν του εκτιμωμένου μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης. Οι μεγάλες ακραίες τιμές δεν υπάρχουν στο εκτιμώμενο μοντέλο με συνέπεια την καλύτερη προσέγγιση σε τιμές κοντά στην μέση τιμή, πράγμα που σημαίνει ότι το εκτιμώμενο μοντέλο παρουσιάζει μεγαλύτερη συγκέντρωση γύρω από την μέση τιμή και λειτουργεί ικανοποιητικά σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Ορίζουμε κανονικές συνθήκες λειτουργίας την ραδιο-κάλυψη από μία κεραία σταθμού βάσεις στα πλαίσια εκπομπής του διαγράμματος ακτινοβολίας της, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4 παράγραφος 4.4.

Επιπλέον στο αρχείο excel έχουμε υπολογίσει και το σφάλμα εκτίμησης της τάξης των 3.659651413 με τυπική απόκλιση 2.810153779, πίνακας 5.9.

Τέλος από την στατιστική γνωρίζουμε ότι η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας (cumulative distribution function) μία πραγματικής τυχαίας μεταβλητής (Random Variable)  $X$  παρουσιάζει την πιθανότητα η τυχαία μεταβλητή  $X$  να πάρει τιμές μικρότερες ή ίσες της τιμής  $x$ , δηλαδή

$F_X(x) = P(X \leq x)$ . Στην προκειμένη περίπτωση οι κατανομές CDF του σχήματος 5.28 παρουσιάζουν την πιθανότητα η τυχαία μεταβλητή  $L$  να πάρει τιμές μικρότερες ή ίσες της τιμής  $L_{pathloss}$ , δηλαδή  $F_L(L_{pathloss}) = P(L \leq L_{pathloss})$ . Παρατηρώντας τις καμπύλες CDF των πραγματικών μετρήσεων πεδίου και των εκτιμωμένων τιμών γραμμικής παλινδρόμησης βλέπουμε ότι διαφέρουν ελάχιστα, το οποίο σημαίνει ότι η εκτίμηση της γραμμικής παλινδρόμησης είναι πολύ επιτυχής καθώς οι πιθανότητες οι τυχαίες μεταβλητές  $L_{estimated}$  και  $L_{measured}$  να πάρουν τιμές μικρότερες ή ίσες της τιμής  $L_{pathloss}$  είναι περίπου ίσες, με ελάχιστες αποκλίσεις στις ακραίες τιμές (μικρές ή μεγάλες) όπου το εκτιμώμενο μοντέλο έχει παρουσιάζει το φαινόμενο της σύντμησης (truncated values) λόγω της τεχνικής των ελαχίστων τετραγώνων, όπως εξηγήσαμε παραπάνω.



# Κεφάλαιο 6

## Επίλογος

### 6.1 Γενικές Παρατηρήσεις

Η παρούσα διατριβή παρουσίασε την διαδικασία μετρήσεων στην φασματική περιοχή των 3.6 GHz για αγροτικές περιοχές ράδιο-κάλυψης (Rural) σε συνθήκες οπτικής επαφής (Line of Site – LoS), μη-οπτικής επαφής (non Line of Site – nLoS) παρουσία απωλειών περίθλασης και Fresnel λόγω εμποδίων, λόφων, αγροτικών κτιρίων κτλπ., καθώς και συνθήκες σκέδασης/διασποράς (dispersion, scattering) της H/M ακτινοβολίας λόγω δασώδους περιβάλλοντος και εμποδίων φυλλωμάτων της τοπικής χλωρίδας της περιοχής.

Από τις μετρήσεις αυτές εξήχθη ένα ημι-εμπειρικό (semi-empirical) μοντέλο απωλειών (path loss model) το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μελλοντικά από σχεδιαστές δικτύου καθώς και μελετητές-ερευνητές των ασυρμάτων δικτύων στην ζώνη συχνοτήτων 43 της 3GPP, η οποία αντιστοιχεί στην φασματική περιοχή των 3600-3800 MHz. Το συγκεκριμένο εξαχθέν ημι-εμπειρικό μοντέλο βασίστηκε στον τύπο του διεθνούς φήμης και αποδοχής μοντέλου Standard Propagation Model (SPM) το οποίο και χρησιμοποιείται εδώ και καιρό στην φασματική περιοχή

των 2600 MHz έως 3000 MHz. Στην πραγματικότητα αυτή η διατριβή προεκτείνει το μοντέλο SPM και προτείνει τρία διαφορετικά ημι-εμπειρικά μοντέλα (LoS, nLoS & Foliage losses) για περιβάλλον ράδιο-διάδοσης αγροτικών περιοχών (Rural coverage), βασισμένα στις μετρήσεις ενός πραγματικού δικτύου χρησιμοποιώντας παραμέτρους μοντέλου όπως ύψος κεραίας σταθμού βάσης  $h_{BS}$ , κεραία λήψης του CPE  $h_{CPE}$ , συχνότητα και απόσταση  $d$ , απώλειες Fresnel και εμποδίων, απώλειες φυλλωμάτων foliage losses.

Η εξαγωγή των τριών προτεινόμενων μοντέλων προέκυψε από την χρήση μαθηματικών τεχνικών της στατιστικής επιστήμης και της επιστήμης της μηχανικής εκμάθησης, βασισμένων στην πολύ-παραμετρική ανάλυση της γραμμικής παλινδρόμησης. Στην ουσία προσδιορίστηκαν, βάσει του υφισταμένου μαθηματικού μοντέλου του SPM, οι συντελεστές-παράμετροι  $K_i$  του προτεινόμενου μοντέλου απωλειών διάδοσης (path-loss model), οι οποίες εξήχθησαν από την μαθηματική ανάλυση της πολύ-παραμετρικής μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων.

Τα αποτελέσματα μελετήθηκαν στατιστικά, ακολουθώντας τις βασικές αρχές της στατιστικής ανάλυσης με τις γνωστές μετρικές της μέσης τιμής (mean value  $\mu$ ) και της τυπικής απόκλισης (standard deviation  $\sigma$ ). Επιπλέον στην ανάλυση των αποτελεσμάτων εκτίμησης του προτεινόμενου μοντέλου ακολούθησε και η εξαγωγή των κατανομών PDF, CDF, σημαντικών για την εκτίμηση της εγκυρότητας και της ακρίβειας του προτεινόμενου μοντέλου.

## 6.2 Συμπεράσματα

Ακολουθώντας την στατιστική ανάλυση του 5ου κεφαλαίου προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Το προτεινόμενο μοντέλο απωλειών διαδρομής παρουσιάζει εκτιμήσεις τιμών γύρω από την μέση τιμή της στατιστικής ανάλυσης σε σχέση με τις πραγματικές μετρήσεις. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων η οποία, βάσει του συντελεστή  $R^2$  όπου το ποσοστό των 99% των τιμών εξηγείται ικανοποιητικά, προσεγγίζει των 99% των τιμών με πολύ καλή ακρίβεια και θεωρεί αμελητέες στις υπόλοιπες μεγαλύτερες τιμές.

Αυτό σημαίνει ότι το προτεινόμενο μοντέλο παρουσιάζεται περισσότερο συντηρητικό σε σχέση με τις πραγματικές μετρήσεις σε τιμές ράδιο-κάλυψης απομακρυσμένες από την μέση τιμή. Οι σχεδιαστές θα πρέπει να το έχουν υπόψιν τους όταν χρησιμοποιούν αυτό το μοντέλο ώστε εάν επιθυμούν, σε απομακρυσμένες περιοχές κάλυψης, να εκτιμούν περίπου 4-5 dB επιπλέον περιθώρια (margin) απωλειών όσο είναι και το σφάλμα της προσέγγισης όπως υποδεικνύεται στο κεφάλαιο 5.

Εντούτοις πολλές φορές ίσως είναι χρήσιμο να υπάρχει αυτή η απόκλιση της συντηρητικότερης προσέγγισης καθώς προσδίδει μία στάθμη ασφαλείας στους σχεδιαστές προς το χειρότερο σενάριο της ράδιο-κάλυψης.

Η καμπύλη PDF των εκτιμώμενων μετρήσεων έχει μικρότερη τυπική απόκλιση σε σχέση με αυτήν των πραγματικών μετρήσεων. Αυτό συμβαίνει διότι το προτεινόμενο μοντέλο είναι συντηρητικότερο από τις πραγματικές μετρήσεις και μαζεύει τις διεσπαρμένες και απομακρυσμένες εκτιμώμενες τιμές κοντά στην μέση τιμή. Ισχύουν επίσης τα συμπεράσματα ράδιο-κάλυψης του 1ου συμπεράσματος.

Το σφάλμα εκτίμησης και των τριών μοντέλων είναι μικρό με σχετική μικρή απόκλιση στην περίπτωση του μοντέλου nLoS, υποδηλώνοντας ότι τα μοντέλα εκτίμησης είναι σωστά και μπορεί να εφαρμοστεί με ασφάλεια από τους σχεδιαστές του δικτύου. Εν γένει, όπως προελέχθη, θα πρέπει να προσθέτουμε στις εκτιμώμενες μετρήσεις αυτό το σφάλμα  $\sim 4 - 5$  dB ως περιθώριο σφάλματος (margin) σε μεγάλες αποστάσεις και σε περιπτώσεις ράδιο-κάλυψης μεγάλης αζιμουθιακής και οριζόντιας απόκλισης.

Από την στατιστική ανάλυση καμπύλων CDF των πραγματικών μετρήσεων πεδίου και των εκτιμωμένων τιμών γραμμικής παλινδρόμησης βλέπουμε ότι διαφέρουν ελάχιστα, το οποίο σημαίνει ότι η εκτίμηση της γραμμικής παλινδρόμησης είναι πολύ επιτυχής, με μικρές αποκλίσεις κυρίως στο μοντέλο μετρήσεων nLoS.

## 6.3 Μελλοντική έρευνα

Η παρούσα διατριβή ασχολήθηκε κυρίως με τις μετρήσεις ράδιο-κάλυψης, και συγκεκριμένα με την αποτύπωση των τιμών RSRP σε ένα περιβάλλον Rural, καθώς και με την στατιστική τους ανάλυση. Εντούτοις υπάρχουν πολλά διαφορετικά αντικείμενα τα οποία θα μπορούσαν να ακολουθήσουν την παρούσα διατριβή, ως μελλοντικές ερευνητικές εργασίες.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή θα μπορούσε να επεκταθεί και σε μετρήσεις σε περιβάλλοντα ήμι-αστικά (sub-urban) καθώς και σε αστικά περιβάλλοντα (urban) ή πολύ πυκνά αστικά περιβάλλοντα (dense urban). Θα ήταν πολύ ενδιαφέρον να παρουσιάζονταν ερευνητικά τα μοντέλα ράδιο-κάλυψης σε διαφορετικές περιοχές στην φασματική περιοχή των 3600 MHz και να συγκρίνονταν με την περιοχή Rural, ώστε να εξαχθούν οι στατιστικές αποκλίσεις.

Περαιτέρω επέκταση της παρούσης μεταπτυχιακής διατριβής θα μπορούσε να ήταν η φυσική θεωρητική ανάλυση, βάσει εξισώσεων Maxwell και θεωρίας περίθλασης/διάθλασης, των διαφοροποιήσεων των μοντέλων ράδιο-κάλυψης σε διαφορετικά περιβάλλοντα εκτιμώντας

θεωρητικές τιμές περιθωρίων (margins) τα οποία οφείλονται σε περιθλάσεις, knife-edge απωλειών, Fresnel απωλειών καθώς και απώλειες απορρόφησης από τα υλικά των κτιρίων.

Μία άλλη μεταπτυχιακή διατριβή θα μπορούσε να ασχοληθεί με την αποτύπωση των τιμών RSRQ των μετρήσεων ράδιο-κάλυψης. Ο απώτερος σκοπός θα ήταν η συσχέτιση της ποσότητας RSRQ με την σχεδιαστική ποσότητα ράδιο-κάλυψης RSRP βάσει παραμέτρων μοντελοποίησης όπως ύψος κεραίας σταθμού βάσης  $h_{BS}$ , κεραία λήψης του CPE  $h_{CPE}$ , συχνότητα και απόσταση  $d$ , απώλειες Fresnel και εμποδίων, απώλειες φυλλωμάτων foliage losses . Αυτό θα ήταν χρήσιμο στους σχεδιαστές δικτύων ώστε να μπορέσουν να προκαθορίσουν την εκτιμώμενη ποιότητα της ζεύξης εάν έχουν μόνο την τιμή RSRP, καθώς αυτό βοηθάει στην εκτίμηση λειτουργίας κινητικότητας μίας συσκευής σε ανενεργή κατάσταση (idle mode cell selection/reselection).

Περαιτέρω επέκταση της παρούσης διατριβής θα ήταν η αποτύπωση της ποσότητας SINR σε σχέση με τις ποσότητες RSRP, RSRQ και τις παραμέτρους όπως ύψος κεραίας σταθμού βάσης  $h_{BS}$ , κεραία λήψης του CPE  $h_{CPE}$ , συχνότητα και απόσταση  $d$ , απώλειες Fresnel και εμποδίων, απώλειες φυλλωμάτων foliage losses. Αυτό θα βοηθούσε τους σχεδιαστές να μπορέσουν να βελτιστοποιήσουν τον σχεδιασμό της ποσότητας SINR των δικτύων τους εάν είχαν μόνο την σχεδιαστική τιμή ράδιο-κάλυψης της ποσότητας RSRP. Αυτό θα είχε άμεση επίπτωση στην αναμενόμενη ρυθμαπόδοση (throughput) καθώς η τιμή του SINR σχετίζεται με τις αποφάσεις απόδοσης ράδιο-πόρων (Physical Resource Blocks, PRB) του MAC scheduler.

Τέλος κάποιои ερευνητές θα μπορούσαν να προχωρήσουν στην αποτύπωση της παραμετρικής ρυθμαπόδοσης (Throughput) σε σχέση με την τιμή του SINR και του RSRP βάσει διαφορετικών αλγορίθμων scheduling όπως Round Robin, Proportional Fair, max C/I etc. Αυτή η συσχέτιση θα μπορούσε να δώσει μία εκτίμηση της ράδιο-κάλυψης των σχεδιαστών του δικτύου σε σχέση με την αναμενόμενη παρεμβολή αλληλοεπικάλυψης κυττάρων και τις αποφάσεις του MAC scheduler στην απόδοση των ράδιο-πόρων. Η εκτέλεση συγκριτικών αποτελεσμάτων βάσει των διαφορετικών αλγορίθμων scheduler θα έδινε ένα εργαλείο βελτιστοποίησης ποιότητας δικτύου (integrity check – throughput).

## Βιβλιογραφία

- [1] ITU-R, P.1411-2 Recommendation, "Propagation Data and Prediction methods for the planning of short range outdoor communication systems and local area radio networks in the frequency range of 300 MHz to 100 GHz," ITU, 2003.
- [2] Simin R. Saunders and Alejandro Araga Zavala, *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*, 2nd ed.: Wiley, 2007.
- [3] Chhaya Dalela, "Prediction Methods for Long Term Evolution (LTE) Advanced Network at 2.4 GHz, 2.6 GHz and 3.5 GHz," in *IJCA Journal*, 2012.
- [4] Sachin Kale and A.N. Jadhav, "An Empirically Based Path Loss Models for LTE Advanced Network and Modeling for 4G Wireless Systems at 2.4 GHz, 2.6 GHz and 3.5 GHz," *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAEM)*, vol. 2, no. 9, September 2013.
- [5] P. Ramanathan, "Propagation Path-Loss Prediction Model for 4G Mobile Communication Systems," (*IJCSIT*) *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, vol. 5, no. 1, pp. 410-413, 2014.
- [6] V.S. Abhayawardhana, I.J. Wassell, D. Crosby, M.P. Sellars, and M.G. Brown, "Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Fixed Wireless Access Systems," in *Vehicular Technology Conference*, Stockholm, Sweden, 2005.
- [7] George R. MacCartney and Theodore S. Rappaport, "Study on 3GPP Rural Macrocell Path Loss Models for Millimeter Wave Wireless Communications," in *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Paris, France, 2017.
- [8] Segun I. Popoola et al., "Standard Propagation Model Tuning for Path Loss Predictions in Built-Up Environments," in *International Conference on Computational Science and Its Applications ICCSA*, 2017, pp. 363-375.
- [9] Paulo Roberto de Freitas and Horácio Tertuliano, "Methodology for Fitting the Parameters of a Propagation Model for Private Mobile Radio Communication System," in *XXXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS – SBrT2017*, SÃO PEDRO, SP, 2017.
- [10] Segun I. Popoola, Aderemi Atayero, Nasir Faruk, and Victor Olugbemiga Matthews, "Calibrating the Standard Path Loss Model for Urban Environments using Field Measurements and Geospatial Data," in *The 2017 International Conference of Wireless Networks*, London, UK, 2017.
- [11] Chaudhuri Manoj Kumar Swain and Susmita Das, "Estimation of Path Loss Model for a 2.65 GHz Mobile WiMAX Network Deployed in a Sub-Urban Environment

- with Regression Techniques," *Wireless Personal Communications*, vol. 99, no. 1, pp. 283-297, March 2018.
- [12] Segun I. Popoola, Sanjay Misra, and Aderemi A. Atayero, "Outdoor Path Loss Predictions Based on Extreme Learning Machine," *Wireless Personal Communications*, vol. 99, no. 1, pp. 441-460, March 2018.
- [13] Telia Sonera. (2009, December) TeliaSonera launches world's first commercial LTE networks in Sweden and Norway. [Online].  
<https://www.telegeography.com/products/commsupdate/articles/2009/12/14/teliasonera-launches-worlds-first-commercial-lte-networks-in-sweden-and-norway/>
- [14] Σπυρίδων Λούβρος, *ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ LTE - ΑΠΟ ΤΙΣ ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ*, 1st ed. ΑΘΗΝΑ, ΕΛΛΑΔΑ: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΝΕΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ, 2014.
- [15] 3GPP, "TS 23.401, 'General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access," 2017.
- [16] 3GPP, "TS 36.300 V15.1.0, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 15)," 2018.
- [17] 3GPP, "TS 36.211 version 14.2.0 Release 14, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation," 2018.
- [18] 3GPP, "TS 36.101 version 14.3.0 Release 14, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception,".
- [19] 3GPP, "TS 36.104 version 13.5.0 Release 13, LTE Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Base Station (BS) radio transmission and reception," 2018.
- [20] 3GPP, "TS 36.214 version 15, Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer; Measurements (Release 13)," 2017.
- [21] Huawei, LTE CPE V100R001C00, user guide, 2017.
- [22] Huawei, DBS3900 V100R003C00 product description.
- [23] 3GPP, "TS36.141 version 10.1.0 Release 10, LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) conformance testing," 2012.
- [24] Huawei, eA380 Series LTE CPE, V100R001C00, User Guide.
- [25] 3GPP, "TS 36.213 version 12.3.0 Release 12, LTE, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures," 2017.

- [26] ITU, "ITU-R P.525-3, Calculation of Free-Space Attenuation, P Series in Radiowave propagation," 2016.
- [27] ITU, "ITU-R P.833-7, Attenuation in vegetation, P Series in Radiowave propagation," 2012.
- [28] Lars Schmidt-Thieme, Machine Learning - Linear Regression, Lars Schmidt-Thieme, Information Systems and Machine Learning Lab (ISMLL), 2013-2014, Course on Machine Learning, of Computer Science, University of Hildesheim.
- [29] Bartłomiej Blaszczyszyn and Mohamed Kadhem Karray, "Linear-Regression Estimation of the Propagation-Loss Parameters Using Mobiles' Measurements in Wireless Cellular Networks," in *IEEE 10th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt)*, Paderborn, Germany, 2012.
- [30] A.S. Adegoke, David Siddle, and S.O Salami, "Vegetation Attenuation and its Dependence on Foliage Density," *European Journal of Engineering and Technology*, vol. 4, no. 3, 2016.
- [31] Γεωργίου Κ. Δεληπέτρου, Π. Οικονομίδου, Ε Λεγάκις, and Α. Νικολαΐδου, "Ειδική Περιβαλλοντική Μελέτη, Κοιλάδα και εκβολές Δέλτα Σπερχειού – Μαλιακός κόλπος (GR2440002)," Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. / Γενική Διεύθυνση Περιβάλλοντος, Technical Report 1997.
- [32] Κοινοπραξίας κατασκευής «Αυτοκινητόδρομος Κεντρικής Ελλάδας (Ε65)». (2017, January) Έκθεση Περιβαλλοντικής Διαχείρισης. [Online].  
<http://www.kentrikiodos.gr/wp-content/uploads/2017/03/Ετήσια-Έκθεση-Περιβαλλοντικής-Διαχείρισης-2016-Κατασκευή.pdf>