

# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και  
Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας  
και Τεχνολογίας Υλικών

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΗΣ ΖΕΥΞΗΣ ΣΕ  
ΖΩΝΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΠΟΥ ΕΞΑΙΡΟΥΝΤΑΙ ΑΔΕΙΑΣ

(BROADBAND WIRELESS ACCESS)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βικτωρία Δ. Κέκα

Καθηγητής : Φίλιππος Κωνσταντίνου

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2008





# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και  
Μηχανικών Υπολογιστών  
Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας  
και Τεχνολογίας Υλικών

## ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΗΣ ΖΕΥΞΗΣ ΣΕ ΖΩΝΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΠΟΥ ΕΞΑΙΡΟΥΝΤΑΙ ΑΔΕΙΑΣ (BROADBAND WIRELESS ACCESS)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βικτωρία Δ. Κέκα

**Καθηγητής : Φίλιππος Κωνσταντίνου**

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 23<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου 2008:

Φίλιππος Κωνσταντίνου  
Καθηγητής

Χρήστος Καψάλης  
Καθηγητής

Νικόλαος Ουζούνογλου  
Καθηγητής

Κέκα Βικτωρία

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Κέκα Βικτωρία, 2008

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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





## Περίληψη

Σκοπό αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη συστημάτων ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης (Broadband Wireless Access) σε συχνότητες που εξαιρούνται άδειας.

Χρησιμοποιήθηκε το σύστημα Canopy™ της εταιρίας Motorola σε συχνότητα 5740 MHz.

Έγινε εκτενείς αναφορά στα χαρακτηριστικά του συστήματος και αναλύθηκαν η BFSK ως η μέθοδος διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται, η TDMA για την πρόσβαση πολλαπλών χρηστών στο δίκτυο, η ρύθμιση καναλιών, η διαχείριση εύρους ζώνης, η δομή του πλαισίου, η διαδικασία καταχώρησης και η κρυπτογράφηση. Εξετάστηκαν οι παράμετροι που επιρεάζουν την απόδοση του συστήματος και η ραδιοκάλυψη με τη μέθοδο OKUMURA HATA.

Για τον έλεγχο της απόδοσης του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες έγινε εγκατάσταση του συστήματος σε εξωτερικό χώρο και διαξαγωγή μετρήσεων, οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά. Πιο συγκεκριμένα μετρήθηκαν η ισχύς λήψης με το spectrum analyzer, το BER, η χωρητικότητα του διαύλου και η δομή του πλαισίου αλλάζοντας κάθε φορά τα χαρακτηριστικά του συστήματος ή της ζεύξης.

Στα συμπεράσματα αναλύθηκαν τα αποτελέσματα και έγινε σύγκριση με τα θεωρητικά αποτελέσματα.

## Λέξεις κλειδιά

Συστήματα ασύρματης ευρυζωνικής ζεύξης, συχνότητες που αξιούνται άδειας, BWA, FSK, TDMA, διαχείριση εύρους ζώνης, ρύθμιση καναλιών, δομή πλαισίου, παράμετροι, μετρήσεις, spectrum analyzer, έλεγχος χωρητικότητας ζεύξης, frame calculator.





## Abstract

The scope of this thesis was to study broadband wireless access (BWA) systems in license exempt frequency bands. For this purpose, it was used the Canopy™ system by Motorola in 5740 MHz.

There was long reference to the technical characteristics of the system and specific aspects were analyzed such as the FSK as the modulation method, the TDMA as the access method, the channel planning, the bandwidth management, the frame structure, the registration process and the cryptography method. They were also examined the parameters that affect the efficiency of the system and the link budget using the OKUMURA HATA method.

For the test of the efficiency of the system in real conditions, the system was established outdoor and measurements were taken. Specifically they were metered parameter such as the receivers signal strength with the spectrum analyzer, the bit error rate, the capacity of the channel and the structure of the frame changing the characteristic of the link or the system. In the conclusions the measurements were compared with the theoretical results.

## Key Words

BWA systems, license exempt frequencies, FSK, TDMA, bandwidth management, channel planning, parameters, frame structure, measurements, spectrum analyzer, link capacity test, frame calculator.





## Ευχαριστίες

Για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας ήταν απαραίτητη η βοήθεια και η καθοδήγηση του καθηγητή μου Φίλιππου Κωνταντίνου, τον οποίο ευχαριστώ για τον πολύτιμο χρόνο που μου διέθεσε. Ευχαριστώ, επίσης, τον πατέρα μου Δημήτρη για την αμέριστη στήριξη και την εμπειρία του, που χωρίς αυτόν δεν θα ήταν εφικτή η εκπόνηση αυτής της εργασίας. Ευχαριστώ την μητέρα μου Δέσποινα και την αδελφή μου Βασιλεία για την υπομονή και το ενδιαφέρον τους. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνάδελφό μου Γιάννη Χατζηδημητρίου για την πολύτιμη βοήθειά του στην εγκατάσταση του εξοπλισμού για την διαξαγωγή των μετρήσεων.

Βικτωρία Κέκα



## Περιεχόμενα

<b>Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή</b> .....	<b>15</b>
Broadband Wireless Access.....	15
Συχνότητες Λειτουργίας των Ασύρματων Ευρυζωνικών Συστημάτων .....	18
Σύγκριση Συχνοτήτων με άδεια και χωρίς .....	21
<b>Κεφάλαιο 2 - Τεχνικά Χαρακτηριστικά</b> .....	<b>25</b>
FSK .....	27
Γενικά .....	27
Μαθηματική Περιγραφή.....	28
Φασματικά Χαρακτηριστικά MFSK .....	29
Ο πομπός FSK .....	29
Ο δέκτης FSK.....	30
Απαιτούμενο εύρος ζώνης για την FSK .....	32
Συμπεριφορά της FSK στον θόρυβο.....	34
TDMA.....	38
Πως Λειτουργεί η TDMA .....	37
Ρύθμιση Καναλιών (Channel Planning).....	40
Διαχείριση Εύρους Ζώνης (Bandwidth Management).....	42
Δομή Πλαισίου .....	44
Hardware Scheduling .....	44
Software Scheduling.....	46
Διαδικασία Καταχώρησης .....	48
Κρυπτογράφηση .....	49
DES (Data Encryption Standard).....	49
AES (Advanced Encryption Standard).....	56
Παράμετροι .....	59
Ρυθμός Μετάδοσης Δεδομένων (Bit rate).....	59
Ρυθμός Μετάδοσης Διαμορφωμένου Σήματος (Modulated rate- Baud rate) .....	59
Χωρητικότητα Ζεύξης (Link Capacity) .....	60
BER (Bit error rate) .....	62
RSSI .....	64
Jitter.....	64
EIRP.....	65
Ραδιοκάλυψη- Link Budget .....	65

Περιβάλλον χωρίς εμπόδια.....	65
Μοντέλον OKUMURA HATA για αστικό και ημιαστικό πεβάλλον.....	68
<b>Κεφάλαιο 3 - Μετρήσεις .....</b>	<b>71</b>
Διάταξη μετρήσεων.....	71
Εργαλεία μετρήσεων.....	72
Spectrum Analyzer .....	72
Έλεγχος Χωρητικότητας Ζεύξης (Link Capacity Test) .....	73
Μέτρηση BER .....	74
Frame Calculator .....	75
Περιβάλλον .....	76
Διαδικασία Μετρήσεων .....	78
Διαδικασία Ευθυγράμμισης του SM με το AP .....	78
Διαδικασία Ρύθμισης του SM και του AP .....	79
Μετρήσεις .....	87
Spectrum Analyzer .....	88
Link Capacity Test.....	88
Μεταβάλλοντας την μέγιστη εμβέλεια .....	92
Μεταβάλλοντας το ποσοστό της κάτω ζεύξης (downlink rate).....	98
Frame Calculator .....	105
<b>Κεφάλαιο 4 - Συμπεράσματα .....</b>	<b>125</b>
Τεχνικά Χαρακτηριστικά.....	125
Παράμετροι .....	126
Μετρήσεις .....	128
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>133</b>
<b>Παράρτημα – Ευρωπαϊκά Πρότυπα .....</b>	<b>135</b>



## Κεφάλαιο 1

### Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια του 20<sup>ου</sup> και 21<sup>ου</sup> αιώνα η τεχνολογία που συγκεντρώνει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι η συλλογή, επεξεργασία και διανομή της πληροφορίας. Πλέον η τηλεφωνική σύνδεση δεν θεωρείται πολυτέλεια και η εξάπλωση του Internet, παρά τον βραχύ βίο του, είναι εντυπωσιακή. Συνέπεια αυτού, είναι η όλο και μεγαλύτερη ανάγκη για ευρυζωνικές ζεύξεις που θα μπορούν να υποστηρίξουν πολλές διαφορετικές εφαρμογές όπως μεταφορά δεδομένων, φωνής, video κ.α.

Οι ασύρματες ζεύξεις παίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο στη τηλεπικοινωνιακή ανάπτυξη καθώς τα πλεονεκτήματα που τις χαρακτηρίζουν είναι πολλά και πολλές φορές ανεκτίμητα. Οι φορείς που πρέπει να παρέχουν ευρυζωνική κάλυψη σε πελάτες τους, συνήθως δεν αντιμετωπίζουν πρόβλημα όταν αυτοί βρίσκονται σε μεγάλα αστικά κέντρα ή σχετικά μικρές αποστάσεις από το πυρήνα του δικτύου.

Σε πλήθος περιπτώσεων όμως οι συνθήκες δεν είναι τόσο απλές. Πολλές φορές οι φορείς αντιμετωπίζουν εμπόδια, όπως ακραία καιρικά φαινόμενα, μεγάλες αποστάσεις ή ορεινές περιοχές. Είναι πλέον κατανοητό ότι η ιδανική λύση για εκτεταμένη ευρυζωνική κάλυψη σε δυσπρόσιτες περιοχές είναι η ασύρματη ζεύξη.

#### **Broadband Wireless Accesss**

Ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα είναι μία τεχνολογία που σκοπό έχει την παροχή υψηλής ταχύτητας ασύρματης πρόσβασης σε μεγάλες περιοχές από τερματικά. Εφαρμόζεται ευρέως σε συστήματα που προσφέρουν τηλεπικοινωνιακή πρόσβαση σε ένα δίκτυο κορμού. Ουσιαστικά τα BWA συστήματα δεν αποτελούν από μόνα τους ολοκληρωμένα δίκτυα, αλλά χαρακτηρίζονται ως το τελευταίο μίλι ανάμεσα σε ένα δίκτυο κορμού και τον τελικό χρήστη (ονομάζεται και συνδρομητής), από κατοικίες μέχρι μεγάλες

επιχειρήσεις. Σε επιχειρήσεις όπως μικρά ή/και μεγάλα γραφεία, τα BWA συστήματα μπορούν να υποστηρίξουν τηλεπικοινωνιακά δίκτυα όπως το δημόσιο διαδίκτυο, δίκτυα ATM και PSTN. Οι οικιακοί καταναλωτές μπορεί να μην έχουν απαιτήσεις σε τόσο ευρεία γκάμα δικτύων, με αποτέλεσμα η κύρια λειτουργία σε αυτές τις περιπτώσεις να είναι η πρόσβαση στο Internet. Τα BWS συστήματα παρουσιάζονται ως μία αξιόπιστη, γρήγορη υπηρεσία μεταφοράς δεδομένων, εναλλακτική των ενσύρματων τεχνολογιών πρόσβασης.

### **Θεμελιώδεις αρχές των BWA**

Το απλούστερο BWA σύστημα αποτελείται από ένα απλό σταθμό βάσης και ένα σταθμό χρήστη. Ο σταθμός βάσης περιέχει μία διεπαφή σε ένα δίκτυο κορμού και την δυνατότητα για ασύρματη ζεύξη με τον συνδρομητή. Ο σταθμός χρήστη περιλαμβάνει μία διεπαφή με το δίκτυο του χρήστη και, βεβαίως, τον εξοπλισμό ασύρματης ζεύξης με τον σταθμό βάσης. Τέτοια βασικά συστήματα αποτελούν τα από σημείο σε σημείο (point to point, PTP) συστήματα ασύρματης μεταφοράς δεδομένων τα οποία είναι σε λειτουργία εδώ και πολλά χρόνια. Μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα συστήματα από σημείο σε πολλά σημεία (Point-to-multipoint, P-MP), όπου ένας σταθμός βάσης εξυπηρετεί πολλούς χρήστες χρησιμοποιώντας το ίδιο ασύρματο κανάλι. Η λειτουργία των P-MP συστημάτων απαιτεί ιστροπικές κεραιές ή κεραιές με συγκεκριμένο τομέα κάλυψης σταθερής γωνίας στον σταθμό βάσης, που να μπορεί να εξυπηρετήσει αποτελεσματικά τους πελάτες μία συγκεκριμένης περιοχής στο δοσμένο εύρος συχνοτήτων. Πολλοί συνδρομητές μπορούν να λάμβανουν την εκπομπή κάτω ζεύξης του σταθμού βάσης στο ίδιο ραδιοφωνικό κανάλι. Ανάλογα με το πλήθος και τις απαιτήσεις εύρους των χρηστών σε μία περιοχή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερα από ένα κανάλια, έτσι ώστε να εξυπηρετούνται περισσότεροι χρήστες. Το εύρος συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται στα BWA συστήματα επιτρέπουν χρήση συμβατικών κατευθυντικών κεραιών. Έτσι για την άνω ζεύξη η κεραία στο σταθμό του χρήστη συχνά είναι ιδιαίτερα κατευθυντική. Τέτοια διαμόρφωση σε σχηματισμένους τομείς κάλυψη επιτρέπουν την ευελιξία στην ανάπτυξη του συστήματος και βοηθούν στην διατήρηση του φάσματος καθώς επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων σε κοντινούς τομείς.

Με αυτή την οργάνωση σε τομείς και λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά των BWA συστημάτων διαπιστώνεται ότι υπάρχουν ομοιότητες με άλλα γνωστά συστήματα πρόσβασης. Η ανάπτυξη των BWA είναι από την φύση της κυψελωτή και όπως στην ανάπτυξη των κινητών τηλεφώνων, απαιτούνται περίπλοκοι κανόνες και οδηγίες που αφορούν τα όρια της ισχύος εκπομπής, την επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων, την ανάθεση των καναλιών, την διάταξη των κυψελών κ.α. Επίσης, καθώς οι συνδρομητές μοιράζονται το ίδιο φάσμα συχνοτήτων για την προς τα πάνω (uplink) και προς τα κάτω (downlink) σύνδεση, και παρόλα αυτά δεν επικοινωνούν άμεσα μεταξύ τους, τα BWA έχουν ιδιότητες παρόμοιες με αυτές των HFC (Hybrid Fibre-coaxial) δικτύων πρόσβασης,

συστήματα που συνδιάζουν τη χρήση οπτικών ινών και ομοαξονικού καλωδίου και συνυπάρχουν με την καλωδιακή τηλεόραση.

### **Πως τα συστήματα BWA συμπληρώνουν τεχνολογικά κενά**

Η τεχνολογία της ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης, φυσικά, ανταγωνίζεται άλλες ευρυζωνικές, υψηλής ταχύτητας τεχνολογίες, όπως είναι το υψηλής ταχύτητας κυψελωτό σύστημα (high data rate cellular service), ψηφιακή συνδρομητική γραμμή (DSL) σε απλά τηλεφωνικά καλώδια, τα cable modems on coaxial TV cables, τα δορυφορικά συστήματα πρόσβασης ακόμη και οι τεχνολογίες οπτικής ζεύξης, είτε μέσα από οπτική ίνα είτε στον ελεύθερο χώρο. Κάποιες από αυτές τις τεχνολογίες η BWA δείχνει να τις ξεπερνά ή/και να συμπληρώνει κενά που δεν καλύπτουν.

Το υψηλής ταχύτητας κυψελωτό σύστημα (high data rate cellular service) είναι μία εφαρμογή βασισμένη στο σύστημα των κινητών τηλεφώνων. Ο μέγιστος εφικτός ρυθμός μεταφοράς σε αυτά τα τρίτης γενιάς κυψελωτά συστήματα είναι περίπου 2,5 Mbps. Σε αυτή την ταχύτητα ανταγωνίζεται την BWA σε χαμηλές ταχύτητες. Αλλά αφού η BWA δεν είναι σχεδιασμένη για κινητές τηλεπικοινωνίες και χρησιμοποιούνται ευρύτερες μπάντες συχνοτήτων, μπορούν να επιτευχθούν υψηλότερες ταχύτητες. Επιπλέον τα BWA συστήματα δεν είναι πανταχού παρόντα. Αυτό σημαίνει ότι, ενώ για την ανάπτυξη των εφαρμογών των κινητών κυψελωτών συστημάτων, πρέπει εξ αρχής να είναι διαθέσιμο το δίκτυο για μεγάλες μητροπολιτικές περιοχές, στα BWA συστήματα αυτό μπορεί να γίνει σταδιακά. Δηλαδή να ξεκινήσει η εφαρμογή από λίγους χρήστες συγκεκριμένης περιοχής και να επεκταθεί σταδιακά σε ευρύτερες περιοχές, αν αυτό κριθεί απαραίτητο. Αυτό το γεγονός και η δυνατότητα μεγάλων ταχυτήτων μπορούν να μειώσουν σημαντικά το κόστος της αρχικής εγκαταστάσεις του συστήματος για λίγους συνδρομητές.

Οι υπάρχουσες DSL τεχνολογίες μπορούν να φτάσουν ως και 6 km από το κεντρικό τηλεφωνικό δίκτυο, αλλά ο εφικτός ρυθμός μετάδοσης μειώνεται σημαντικά καθώς πλησιάζουμε στην μέγιστη απόσταση. Το ασύμμετρο DSL, ADSL, παρέχει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης για downstream από ότι για upstream, γεγονός που το καθιστά ιδανικό για οικιακούς χρήστες, αλλά μπορεί να είναι περιοριστικό για κάποιες εμπορικές εφαρμογές. Η τεχνολογία της BWA μπορεί να καλύψει αυτά τα κενά, προσφέροντας υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Τα χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα και οι στρατηγικές ανάπτυξης παρέχουν ευελιξία καθώς μπορούν να λειτουργήσουν συμμετρικά και μη.

Η τεχνολογία HFC, η οποία είναι και αυτή εξ ορισμού ασύμμετρη, είναι ιδανική για οικιακούς χρήστες. Το πρόβλημα είναι ότι πολλοί συνδρομητές –πιθανόν χιλιάδες- συχνά μοιράζονται τα ίδια download κανάλια και μάχονται για πρόσβαση σε ένα περιορισμένο αριθμό upload καναλιών. Το βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογία HFC είναι τα σταθερά χαρακτηριστικά του καναλιού σε ολόκληρο το δίκτυο. Με πολύ λίγες εξαιρέσεις η οπτική ίνα και το ομοαξονικό καλώδιο φέρουν σταθερό σήμα σε συνδρομητές σε πολύ μακρινές αποστάσεις. Η τεχνολογία BWA συμπληρώνει τα κενά

δίνοντας τη ευελιξία σε παρόχους να εγκαταστήσουν σταθμούς βάσης σε πελάτες που απαιτούν σταθερή, υψηλή ταχύτητα αφιερωμένη σε αυτούς.

### **Συχνότητες Λειτουργίας των Ασύρματων Ευρυζωνικών Συστημάτων**

Μία μεγάλη ποικιλία από συχνότητες χρησιμοποιείται παγκοσμίως για τα BWA συστήματα. Σήμερα τα συστήματα αυτά χωρίζονται χονδρικά σε δύο κατηγορίες: αυτά που λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες (10 έως 60 GHz) και αυτά που λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες. Τα τελευταία χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες: αυτά που χρησιμοποιούν τις αδειοδοτημένες ζώνες και αυτά που λειτουργούν σε ζώνες όπου δεν απαιτείται η χορήγηση αδειας. Αυτές οι περιπτώσεις, συχνά εξετάζονται ξεχωριστά εξαιτίας των διαφορών της μέγιστης επιτρεπόμενης ισχύος εκπομπής από τους κανονισμούς αλλά και των αυξημένων πιθανοτήτων παρεμβολών από άλλες τεχνολογίες που δεν απαιτείται άδεια για την εφαρμογή τους. Σε σχέση με τις χαμηλές, στις υψηλές συχνότητες παρουσιάζονται διαφορές που αφορούν κυρίως στο κόστος του εξοπλισμού, στην τοποθέτηση των σταθμών βάσης, στην ακτίνα κάλυψης κ.α. Η κυριότερη όμως διαφορά είναι το είδος των συνδρομητών, αλλά και το είδος των υπηρεσιών που προσφέρονται, όπως θα δούμε παρακάτω.

Αν και το εύρος συχνοτήτων που είναι διαθέσιμο κάθε φορά διαφέρει, στις περισσότερες χώρες χρησιμοποιείται η περιοχή κοντά στα 30 GHz, με ευρείες ζώνες διαθέσιμες. Στις ΗΠΑ, για παράδειγμα, η FCC έχει θεσμοθετήσει τις Local Multipoint Distribution Service (LMDS) μπάντες για την BWA. Αυτό, σε συνδυασμό με την εμπειρία από τις στρατιωτικές εφαρμογές και τις δορυφορικές επικοινωνίες, έστρεψε τη βιομηχανία των BWA προς αυτήν την περιοχή. Η προτυποποίηση των συνεργαζόμενων BWA συστημάτων στην περιοχή των 30 GHz είναι παρόλα αυτά ένας από τους στόχους. Το διαθέσιμο φάσμα σε χαμηλότερες συχνότητες, 2 GHz έως 3 GHz, διαφέρει ανάλογα με την γεωγραφία και τους φορείς ελέγχου φάσματος σε κάθε κράτος. Στις ΗΠΑ, για παράδειγμα, η FCC έχει θεσμοθετήσει αρκετές ζώνες με την ονομασία Multipoint/Multichannel Distribution Services (MDS) και τις έχει παραχωρήσει για BWA συστήματα.

Όμως οι ασύρματες επικοινωνίες εμφανίζουν σοβαρές δυσκολίες κοντά στα 30 GHz. Κατά αρχήν ενώ οι κατευθυντικές κεραιές είναι πρακτικές για τους σταθμούς των συνδρομητών, για τους σταθμούς βάσης χρησιμοποιούμε κεραιές σταθερού τόξου. Αλλά, δύο σημαντικά προβλήματα περιορίζουν τον τρόπο με τον οποίο αναπτύσσονται τα BWA συστήματα: η γραμμή οπτικής επαφής (line-of-site) και η βροχή. Τα BWA συστήματα στα 30 GHz σχεδόν απόλυτα απαιτούν line-of-site μονοπάτι για να λειτουργήσουν αποτελεσματικά. Ακόμη και τα φυλλώματα των δέντρων μπορούν να επηρεάσουν δραματικά την ισχύ του σήματος. Σε κάποιες περιπτώσεις near line-of-site, όπως όταν η ακτίνα περνάει κοντά από ανακλαστικές επιφάνειες ή βρεγμένες οροφές, μπορεί να προκληθεί και πάλι διακοπή ζεύξης. Το πρόβλημα της βροχής μπορεί να ξεπεραστεί, ανάλογα με την απόσταση πομπού και δέκτη, το μέγεθος του φαινομένου Doppler και το μέγεθος των κατακρημνίσεων. Στην ανάπτυξη ενός συστήματος BWA

δίνεται μεγάλη βαρύτητα στην κλιματικές ζώνες και στα στατιστικά δεδομένα του κλίματος. Σε περιοχές με μεγάλη βροχόπτωση όταν οι συνδρομητές απαιτούν υψηλό ρυθμό μετάδοσης, μόνο μικρές κυψέλες ικανοποιούν τις ανάγκες τους. Επίσης, για να αντιμετωπιστούν οι εναλλαγές στην βροχόπτωση τα BWA συστήματα υιοθετούν ένα σύστημα προσαρμοζόμενης ισχύος. Όταν, για παράδειγμα, αυξάνεται η ένταση των κατακρημνίσεων αυξάνεται και η ισχύς εκπομπής.

Εκτός από τις παραπάνω δυσκολίες, ένα επιπλέον πρόβλημα είναι το κόστος του εξοπλισμού σε αυτές τις συχνότητες. Μέχρι σήμερα το μεγαλύτερο κόστος σε ένα σταθμό BWA είναι ο ενισχυτής. Επιπλέον, μιας και η κεραία του συνδρομητή πρέπει να είναι τοποθετημένη σε εξωτερικό χώρο, το κόστος τοποθέτησης αυξάνει το συνολικό κόστος. Ο εξοπλισμός του συνδρομητή αποτελείται από την μονάδα εσωτερικού χώρου (indoor unit, IDU), που συνήθως περιλαμβάνει ψηφιακό εξοπλισμό, modem, σύστημα ελέγχου και διεπαφή με το δίκτυο του χρήστη, και μία εξωτερική μονάδα (ODU), που συνήθως περιλαμβάνει την κεραία και τον ενισχυτή. Αυτοί οι παράγοντες, συνδυασμένοι με τις δυσκολίες στη σύνδεση που προαναφέρθηκαν, περιορίζουν την χρήση των 30 GHz μόνο σε επιχειρήσεις που απαιτούν πολύ υψηλές ταχύτητες μετάδοσης και μπορούν να αντιμετωπίσουν το κόστος. Η τεχνολογία BWA επιτυγχάνει ταχύτητες 2 ως 155 Mbps. Το κόστος στις χαμηλές ταχύτητες είναι συγκριτικά με τις αντίστοιχες ταχύτητες στις χαμηλές συχνότητες, πολύ μεγάλο με αποτέλεσμα να το καθιστούν μη πρακτικό. Παρόλα αυτά, πολύ υποστηρίζουν ότι το κόστος του εξοπλισμού θα μειωθεί με το πέρασμα των χρόνων με αποτέλεσμα η χρήση αυτών των συχνοτήτων να είναι συμφέρουσα και για παροχή υπηρεσιών σε κατοικίες.

Στις χαμηλότερες ζώνες συχνοτήτων, 2 ως 11 GHz οι περιορισμοί του line-of-site και της βροχής δεν αποτελούν σημαντικό πρόβλημα. Εδώ οι κυριότεροι προβληματισμοί αφορούν τις παρεμβολές εξαιτίας των ανακλάσεων, ή αλλιώς την πολυδιαδρομική διάδοση. Ένας δέκτης, είτε είναι σταθμός βάσης, είτε είναι συνδρομητής, θα πρέπει πιθανόν να ταιριάξει πολλά αντίγραφα του ίδιου σήματος που λαμβάνει με διαφορετική καθυστέρηση εξαιτίας των ανακλάσεων σε κτήρια ή άλλα μεγάλα αντικείμενα σε μία περιοχή. Έτσι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές τεχνολογίες διαμόρφωσης από αυτές που έχουμε στις υψηλές, προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της πολυδιαδρομικής διάδοσης. Επιπλέον, οι συνδρομητές ή/και οι σταθμοί βάσης μπορούν να υιοθετήσουν διαφορετική λήψη για να συνδυάσει το κυρίως σήμα με τις ανακλάσεις και να βρεθεί εκείνο που είναι δυνατότερο και έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα ακόμη και από το ίδιο το σήμα. Η διαφορετική λήψη αποτελείται από 2 τουλάχιστον κεραίες. Σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να είναι χρήσιμο για το σταθμό βάσης να χρησιμοποιήσει την πολυδιαδρομική διάδοση, χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραίες εκπομπής, πιθανόν και ανακλαστικές επιφάνειες, για να φτάσουν σε δέκτες που δεν έχουν οπτική επαφή, με καλύτερο σήμα από ένα απλό.

Σε αντίθεση με τα BWA συστήματα κοντά στα 30 GHz, ο εξοπλισμός είναι πολύ φθηνότερος στις χαμηλές συχνότητες. Ακόμη, σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί η κεραία

να τοποθετηθεί μέσα σε κτήρια. Όμως οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων είναι μικρότεροι από αυτούς στα 30 GHz, με μικρότερους διαύλους, και διαβάθμιση από 2 ως 15 Mbps. Παρόλο που οι προοπτικές να πέσουν οι τιμές στον εξοπλισμό των 30 GHz είναι μεγάλες, τα παραπάνω χαρακτηριστικά καθιστούν τις χαμηλές συχνότητες πιο ελκυστικές για μικρές επιχειρήσεις και οικιακούς καταναλωτές.

Εξαιτίας των διαφορετικών αναγκών των επιχειρήσεων σε σχέση με των κατοικιών και τις διαφορετικές δυνατότητες των υψηλών συχνοτήτων σε σχέση με τις χαμηλές, τα είδη των προσφερόμενων υπηρεσιών χωρίζονται και αυτά. Οι επιχειρήσεις τυπικά χρησιμοποιούν υψηλότερες συχνότητες, γύρω στα 30 GHz, για υπηρεσίες που προσφέρουν εγγυημένη μεταφορά δεδομένων και φωνής. Σε αυτή την κατηγορία συμπεριλαμβάνονται και κτήρια γραφείων και κατοικιών με πολλούς διαφορετικούς χρήστες, που απαιτούν διαφορετικές υπηρεσίες φωνής και δεδομένων ο καθένας. Για δεδομένα, το IP παίζει πολύ σημαντικό ρόλο, αλλά πολλές μεγάλες επιχειρήσεις βασίζονται σε τεχνολογίες δικτύων ευρύτερης περιοχής, όπως το asynchronous transfer mode (ATM) που τα BWA συστήματα πρέπει να υποστηρίζουν. Παλαιότερα, μόνο τα ATMs είχαν τη δυνατότητα να προσφέρουν πρακτικές μεθόδους για αφιερωμένη, αυτόνομη ή με προτεραιότητα ροή δεδομένων, γενικά αυτό που ονομάζουμε ποιότητα υπηρεσιών (QoS). Με το πέρασμα του χρόνου οι δυνατότητες της βασισμένης σε IP QoS υπερκαλύπτουν αυτή των ATM. Έτσι και για επιχειρήσεις οι IP υπηρεσίες είναι και θα είναι και στο μέλλον η κυριότερη τεχνολογία σε αυτό τον τομέα. Εκτός από τις εφαρμογές δεδομένων, οι επιχειρήσεις βασίζονται στις παραδοσιακές τηλεφωνικές γραμμές από τους τοπικούς παρόχους. Οι τηλεφωνικές υπηρεσίες για μεσαίες και μεγάλες επιχειρήσεις χρησιμοποιούν τηλεφωνικά δίκτυα με πολυπλεξία χρόνου (time division multiplexed) πάνω σε καλώδια χαλκού για να πολυπλέξουν τις τηλεφωνικές κλήσεις. Εξαιτίας των οικονομικών και πρακτικών διαφορών ανάμεσα στις χαμηλές και τις υψηλές συχνότητες για τα BWA συστήματα, οι οικιακοί χρήστες και οι μικρές επιχειρήσεις χρησιμοποιούν υπηρεσίες χαμηλών συχνοτήτων, ενώ οι μεγάλες επιχειρήσεις χρησιμοποιούν υπηρεσίες υψηλών συχνοτήτων.

Το χαμηλό κόστος των BWA συστημάτων σε χαμηλές συχνότητες και η μικρότερη ευαισθησία στην κατευθυντικότητα των κεραιών, τα καθιστά κατάλληλα να καλύψουν μεγάλες περιοχές όπως πόλεις, για την εξυπηρέτηση κινητών χρηστών (nomadic subscribers). Αυτό σημαίνει ότι ο εξοπλισμός μπορεί να κινηθεί εύκολα και γρήγορα αλλά όχι να χρησιμοποιηθεί σε κίνηση. Αντιθέτως, για τα BWA σε υψηλές συχνότητες, οι δυσκολίες μετακίνησης του εκτεταμένου εξοπλισμού του χρήστη και οι υψηλής κατευθυντικότητας κεραιές βάσης και συνδρομητή, περιορίζουν την χρήση των συχνοτήτων αυτών μόνο για σταθερές (fixed) ζεύξεις. Μετά την εγκατάσταση δεν μετακινούνται παρά μόνο αν ο συνδρομητής διακόψει τη ζεύξη και την ξαναεγκαταστήσει από την αρχή σε άλλο σημείο.

### **Σύγκριση ζωνών συχνοτήτων με άδεια και χωρίς**

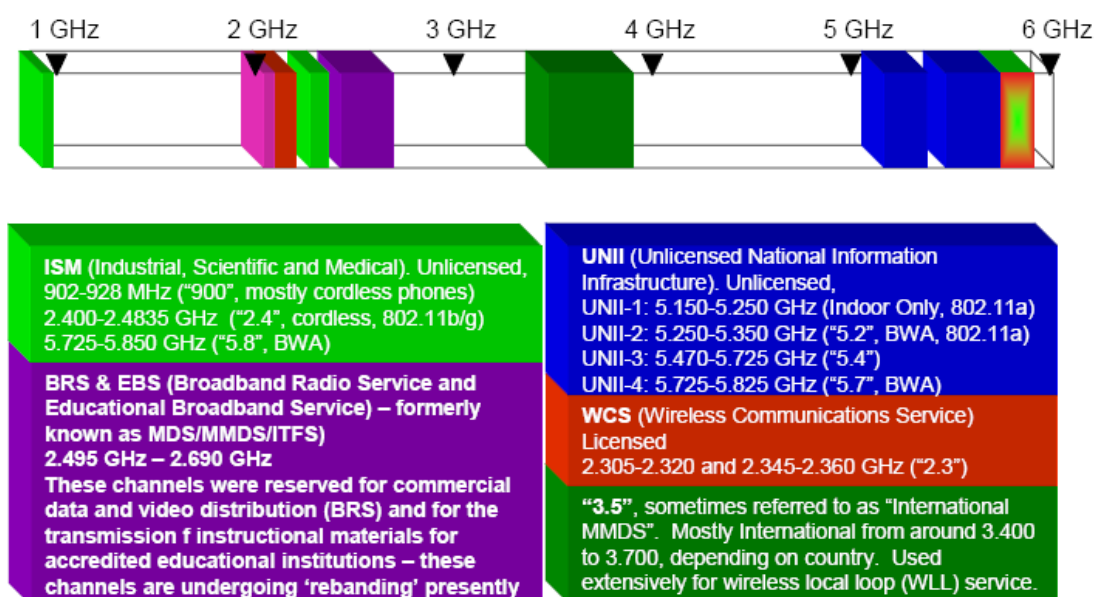


Πολλά από τα προβλήματα στην ανάπτυξη των BWA δικτύων επικεντρώθηκαν στο γεγονός ότι αρχικά χρησιμοποιήθηκε η υψηλή συχνότητα για την ανάπτυξη Point-to-point δικτύων. Point-to-Multipoint συστήματα σε αυτή την συχνότητα ήταν και είναι διαθέσιμα, αλλά το υψηλό κόστος και οι περιορισμοί στην κάλυψη περιόρισαν και την αποτελεσματικότητά τους.

Όλα αυτά τα δίκτυα αναπτύχθηκαν σε αδειοδοτημένες συχνότητες, υποχρεώνοντας έτσι τον πάροχο ή γενικά τον χρήστη του συστήματος να «αγοράζει» το απαιτούμενο φάσμα πριν από την εγκατάσταση του συστήματος.

Επί προσθέτως όταν σχεδιάζεται η κατανομή του φάσματος, μόνο 2 ή 3 αδειοδοτημένες ζώνες χορηγούνται ανά περιοχή. Αυτό σημαίνει ότι οι ασύρματες ευρυζωνικές ζεύξεις μπορούν να αναπτυχθούν μόνο σε περιοχές που το κόστος της αγοράς φάσματος δεν είναι απαγορευτικό και μόνο από λίγους παρόχους.

Τη λύση δίνει τα BWA δίκτυα σε περιοχές του φάσματος όπου δεν απαιτείται άδεια για τη χρήση του. Σε αυτές τις ζώνες όλοι μπορούν να εγκαταστήσουν και να λειτουργήσουν ένα δίκτυο αρκεί ο εξοπλισμός του να ικανοποιεί τους κανόνες σε αυτές τις συχνότητες. Οι κανόνες αυτοί έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να επιτρέπεται σε πολλά δίκτυα να συνυπάρχουν με την ελάχιστη παρεμβολή, δίνοντας την δυνατότητα σε πολλούς παρόχους να εξυπηρετούν την ίδια περιοχή. Το σχήμα 1.1 δείχνει χονδρικά τις αδειοδοτημένες ζώνες φάσματος και τις ελεύθερες.



Σχήμα 1.1. Ζώνες συχνοτήτων

Σημειώνεται ότι υπάρχουν διαφοροποιήσεις ανάλογα με διατάξεις κάθε κράτους. Πιο συγκεκριμένα για την Ευρώπη οι ζώνες που δεν απαιτείται άδεια για τη χρήση τους είναι οι εξής:

Ζώνη Συχνοτήτων	Ευρωπαϊκά πρότυπα
ISM 2,4-24835	EN 300.328
UNII 5,15-5,35	EN 301.893
UNII Worldwide 5,47-5,725	EN 301.893
UNII ISM 5,725-5,825	EN 301.893

Τα σχετικά ευρωπαϊκά πρότυπα παρατιθενται στο παράρτημα.

Σημειώνεται ότι η ζώνη των 900MHz είναι ελεύθερη μόνο για τις ΗΠΑ.

Στην περίπτωση των αδειοδοτημένων συχνοτήτων παρέχεται στο χρήστη αποκλειστική χρήση του, αφαιρώντας το δικαίωμα από οποιονδήποτε άλλο να εκπέμπει σε αυτή την συχνότητα. Στη σχεδίαση του συστήματος λαμβάνεται υπόψη μόνο η παρεμβολή από το ίδιο το σύστημα. Στις χωρίς άδεια ζώνες για δίκτυα Point-to-multipoint, το σημαντικότερο πρόβλημα που έχουμε να αντιμετωπίσουμε είναι οι παρεμβολές όχι μόνο από το ίδιο το σύστημα αλλά και από άλλα δίκτυα. Τέτοιες παρεμβολές μπορεί να μην είναι παρούσες κατά την αρχική εγκατάσταση του συστήματος αλλά να παρουσιαστούν σε βάθος χρόνου.

Για να εξασφαλιστεί η σωστή λειτουργία του BWA δικτύου για αξιόλογη χρονική περίοδο, οι πάροχοι αυτού του δικτύου πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους όλες τις πιθανές παρεμβολές. Εξίσου σημαντικό είναι να εξασφαλιστεί στους πελάτες και του τελικούς χρήστες αυτού του δικτύου, ότι η τεχνολογία που αφορά την διανομή ευρυζωνικής σύνδεσης είναι αξιόπιστη και σταθερή.

Για τις ζεύξεις Point-to-point σε ζώνες συχνοτήτων χωρίς άδεια οι παρεμβολές παραμένουν πρόβλημα χωρίς να έχει την ίδια διάσταση με τις PMP ζεύξεις. Παρόλα αυτά σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα των παρεμβολών μπορεί να είναι σημαντικότερα, καθώς κάθε φορά μεταφέρονται δεδομένα πολλών χρηστών.

Σε αυτή την εργασία θα μελετηθούν τα PMP συστήματα που λειτουργούν σε ζώνη συχνοτήτων που δεν απαιτείται άδεια. Στο επόμενο κεφάλαιο θα εξεταστούν με λεπτομέρειες τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος το οποίο επιλέχθηκε για το πειραματικό μέρος της άσκησης.



## Κεφάλαιο 2

### Τεχνικά χαρακτηριστικά

Για την μελέτη των BWA συστημάτων χρησιμοποιήθηκε το προϊόν CANOPY από την εταιρεία Motorola, το οποίο είναι διαθέσιμο σε 5 διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων. Για τις ανάγκες αυτής της εργασίας θα εξετάσουμε το σύστημα μόνο σε μία ζώνη από αυτές. Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης έκδοσης.

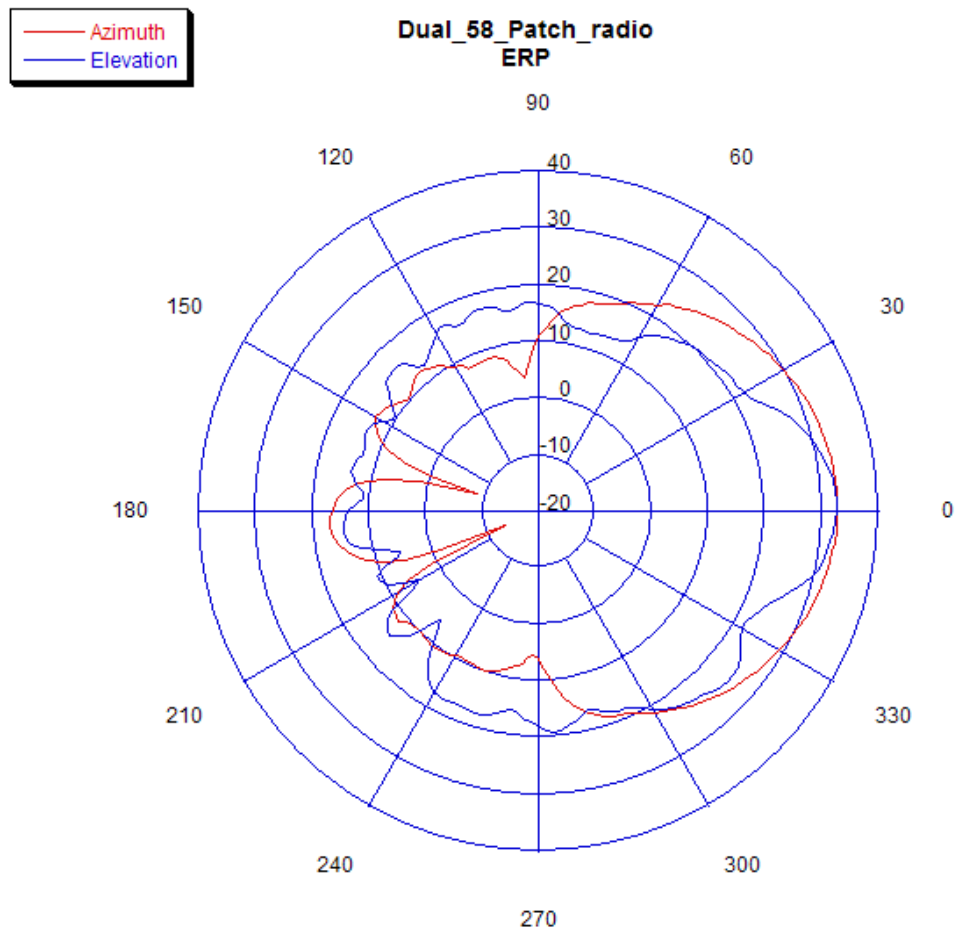
Ο εξοπλισμός έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

<b>Συχνότητες:</b>	<b>ISM 5725-5850 MHz</b>
<b>Ρυθμός μετάδοσης(Signaling Rate):</b>	10 Mbps
<b>Τυπική LOS ακτίνα κάλυψης:</b>	3.2 km
<b>Συνολικό χρησιμοποιούμενο Throughput:</b>	6.2 Mbps
<b>Τύπος διαμόρφωσης:</b>	2-level Frequency Shift Keying (FSK)
<b>Μη επικαλυπτόμενα κανάλια:</b>	6
<b>Εύρος καναλιού:</b>	20 MHz
<b>Ελάχιστη απόσταση μεταξύ καναλιών:</b>	5 MHz

<b>Κρυπτογράφηση:</b>	DES με δυνατότητα επέκτασης AES
<b>Καθυστέρηση:</b>	15 msec
<b>Λόγος Σήματος προς παρεμβολή Carrier to Interference (C/I):</b>	~3dB @ 10 Mbps, ~10dB @ 20 Mbps at -65dBm
<b>ευαισθησία του δέκτη:</b>	-86 dBm
<b>κέρδος κεραίας:</b>	7 dBi
<b>EIRP:</b>	30 dBm ή 1 W
<b>Ισχύς DC (τυπική):</b>	0.3 A @ 24 VDC = 7.2 W
<b>Εύρος ακτίνας κεραίας:</b>	Εύρος 3 dB 60 μοίρες, Azimuth and Elevation
<b>Μέσος χρόνος αστοχίας (Mean Time Between Failure )(MTBF):</b>	40 yr
<b>Θερμοκρασία λειτουργίας:</b>	-40° C ως +55° C (-40° F ως +131° F)
<b>Αντοχή στον αέρα:</b>	190 km/hr (118 miles/hr)
<b>Διαστάσεις:</b>	29.9 cm Y x 8.6 cm Π x 8.6 cm B
<b>Βάρος:</b>	.45 kg (1 lb)
<b>Μέθοδος Πολυπλεξίας:</b>	Time Division Duplexing/Time Division Multiple Access (TDD/TDMA)

Πίνακας 2.1

Το εύρος ημισείας ισχύος της κεραίας όπως φαίνεται είναι 60° ( κατακόρυφο και αζιμουθιακό) αλλά αν γίνει χρήση παραβολικού κατόπτρου το εύρος είναι μόλις 6°. Η χρήση του κατόπτρου μάς προσφέρει αύξηση ισχύος και μείωση των παρεμβολών. Στο σχήμα 2.1 φαίνεται το διάγραμμα της κεραίας.



**Σχήμα 2.1**

Τα χαρακτηριστικά του πίνακα 2.1 και του σχήματος 2.1 ισχύουν και για τις κεραίες που λειτουργούν σαν σταθμοί βάσης και θα τις ονομάζουμε Access Point ή πιο σύντομα AP, αλλά και για τις κεραίες που λειτουργούν σαν σταθμοί των χρηστών και θα τα ονομάζουμε subscriber module ή πιο σύντομα SM.

Πρέπει να σημειωθεί ότι στο σύστημα Canopy υπάρχουν και αναβαθμισμένες εκδόσεις (Advantage Modules) που έχουν μικρές διαφορές στα τεχνικά χαρακτηριστικά. Δηλαδή, παρατηρείται αλλαγή στη διαμόρφωση που είναι 4-FSK και το εύρος του καναλιού είναι 25 MHz. Στην εργασία αυτή θα εξεταστεί η απλή έκδοση.

## **FSK (Frequency Shift Keying)**

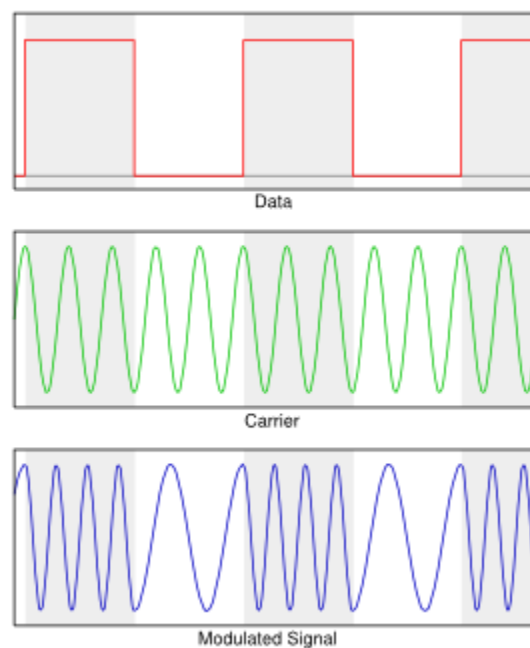
### *Γενικά*

Οι βασικές αρχές της ζωνοπερατής ψηφιακής μετάδοσης είναι ίδιες με αυτές της αναλογικής διαμόρφωσης: κάποια χαρακτηριστικά μίας φέρουσας ημιτονοειδούς

σήματος μεταβάλλονται σύμφωνα με τα προς μετάδοση δεδομένα, σε αυτή την περίπτωση μίας ψηφιακής ακολουθίας. Σε αντιστοιχία με την αναλογική μετάδοση και τα τρία είδη διαμόρφωσης, υπάρχουν και εδώ τρία είδη κωδικοποίησης: εύρους, συχνότητας και φάσης. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας θα εξετάσουμε την κωδικοποίηση συχνότητας ή αλλιώς FSK.

Η FSK είναι ένας απλός τρόπος διαμόρφωσης κατά τον οποίο η στιγμιαία συχνότητα φέροντος παίρνει διακριτές τιμές ανάλογα με την τιμή του ψηφιακού σήματος πληροφορίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2. Μία πολύ σημαντική ιδιότητα της FSK είναι ότι είναι μία constant envelope διαμόρφωση. Δηλαδή το πλάτος του φέροντος παραμένει σταθερό δεν μεταβάλλεται όταν μεταβαλλεται το σήμα με αποτέλεσμα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποδοτικότεροι ενισχυτές και οι απαιτήσεις σε ισχύ να είναι μικρότερες. Ακόμη, πρέπει να σημειωθεί ότι στην FSK το σήμα μπορεί να ανιχνευθεί βασισμένο σε σχετικές μεταβολές της συχνότητας και επομένως δεν απαιτείται ακριβής εκτίμηση συχνότητας.

Στη μετάδοση ψηφιακών σημάτων ο πομπός FSK εκπέμπει δύο συχνότητες, τη συχνότητα  $f_m$  για την στάθμη 1 και τη συχνότητα  $f_s$  για την στάθμη 0. Στην ψηφιακή μετάδοση ο ρυθμός άφιξης των δεδομένων στην είσοδο του διαμορφωτή ονομάζεται ταχύτητα μετάδοσης (bit rate) και μετράται σε bps (bit per second). Ο ρυθμός μεταβολών του αναλογικού φορέα στην έξοδο του διαμορφωτή ονομάζεται ταχύτητα διαμόρφωσης (baud rate) και μετράται σε baud. Το baud rate μάς δίνει τον αριθμό των μεταβολών (διαμορφώσεων) του αναλογικού σήματος σε κάθε δευτερόλεπτο. Στην διαμόρφωση FSK το bit rate είναι ίσο με το baud rate.



Σχήμα 2.2

### Μαθηματική Περιγραφή

Στην FSK τα ψηφιακά δεδομένα κωδικοποιούνται σε τμήματα ημιτονοειδών σημάτων χρονικού εύρους  $T$  και διαφορετικών συχνοτήτων.

Ορίζονται τα ορθοκανονικά σήματα βάσης της μορφής

$$\phi_i(t) = \begin{cases} \sqrt{2/T} \cos(2\pi f_i t), & 0 \leq t \leq T, \text{ με } i = 1, 2, \dots, N \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (1)$$

Για να είναι τα παραπάνω σήματα ορθογώνια θα πρέπει

$$\int_0^T \cos(2\pi f_i t) \cos(2\pi f_j t) dt = 0, \quad i \neq j \quad \text{σύμφωνη αποδιαμόρφωση}$$

που ισχύει για  $f_i = \frac{k+i}{2T}$ , όπου  $k$  ακέραιος

ή

$$\int_0^T \cos(2\pi f_i t) \cos(2\pi f_j t + \theta) dt = 0, \quad \forall \theta, \quad i \neq j \quad \text{ασύμφωνη αποδιαμόρφωση.}$$

που ισχύει για  $f_i = \frac{k+i}{T}$ , όπου  $k$  ακέραιος.

Δηλαδή, ορθογωνιότητα των σημάτων βάσης έχουμε όταν οι συχνότητες διαφέρουν κατ' ελάχιστο, για τη μεν σύμφωνη αποδιαμόρφωση κατά  $1/2T$ , για τη δε ασύμφωνη κατά  $1/T$ . Συνήθως, ο  $k$  είναι αρκετά μεγαλύτερος του  $N$  και ορίζει τη συχνότητα του φέροντος  $f_c = \frac{k}{2T} \text{ Hz}$ .

Με  $s_i = \sqrt{E} \phi_i(t)$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$  έχουμε σηματικό αστερισμό  $M=N$  σημείων και θα πρέπει το  $N$  να είναι ακέραια δύναμη του 2.

### Φασματικά χαρακτηριστικά MFSK

Για γενικότερη ανάλυση θα εξετάσουμε τα φασματικά χαρακτηριστικά της MFSK (multiple frequency shift keying) ή αλλιώς πολυσταθμική FSK, όπου  $M$  είναι το πλήθος των συχνοτήτων (στάθμες) που χρησιμοποιούνται στην κωδικοποίηση. Είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι το  $M$  είναι ακέραιη δύναμη του 2. Γενικά η MFSK μπορεί να εκπέμψει  $k = \log_2 M$  bps κυματομορφές.

Η φασματική συμπεριφορά της MFSK είναι σχετικά σύνθετη. Η ειδική περίπτωση με ομοιόμορφα κατανομημένες συχνότητες σε αποστάσεις  $1/2T$  (εξασφαλίζεται

ορθογωνιότητα μεταξύ των σημάτων βάσης με σύμφωνη αποδιαμόρφωση) χαρακτηρίζεται από το ισοδύναμο σήμα βασικής ζώνης  $\tilde{s}(t)$  με πυκνότητα φάσματος ισχύος ίση με

$$\Phi_{\tilde{s}\tilde{s}}(f) = 4E_b \left[ \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^M \left( \frac{\sin \gamma_i}{\gamma_i} \right)^2 + \frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \cos(\gamma_i + \gamma_j) \left( \frac{\sin \gamma_i}{\gamma_i} \right)^2 \left( \frac{\sin \gamma_j}{\gamma_j} \right)^2 \right] \quad (2)$$

με  $\gamma_i = \pi(fT_b - n_i/4)$ ,  $n_i = 2i - M - 1$ ,  $i = 1, 2, \dots, M$ . Οι ποσότητες  $E_b$  και  $T_b$  είναι ανηγμένες στο εκπεμπόμενο bit, δηλαδή προκύπτουν από τις σχέσεις

$$E_b = \frac{E}{\log_2(M)} \quad \text{και} \quad T_b = \frac{T}{\log_2(M)}.$$

### Ο πομπός FSK

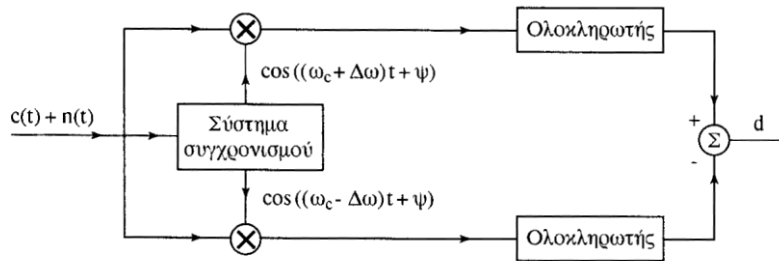
Ο πομπός FSK μπορεί να είναι αναλογικός ή ψηφιακός. Ο αναλογικός βασίζεται σε έναν ταλαντωτή, ελεγχόμενο από τάση VCO (voltage control oscillator), του οποίου η συχνότητα ελεύθερης ταλάντωσης είναι μεταξύ των συχνοτήτων  $f_m$  και  $f_s$  ( $f_m$  είναι όταν το bit εισόδου είναι 1 και  $f_s$  όταν είναι 0). Στους ψηφιακούς πομπούς ένα διακοπτικό κύκλωμα ελεγχόμενο από τα δεδομένα εισόδου μετράγει μεταξύ δύο ψηφιακών κυματομορφών με συχνότητες  $f_m$  και  $f_s$ . Στη συνέχεια το σήμα φιλτράρεται από κατωδιαβατά φίλτρα ώστε να αποκτήσει ημιτονική μορφή πριν οδηγηθεί στην έξοδο.

### Ο δέκτης FSK

#### Σύμφωνη και ασύμφωνη αποδιαμόρφωση

Τα επικοινωνιακά συστήματα που εξετάζονται βασίζονται στην υπόθεση ότι υπάρχει στον δέκτη η δυνατότητα της απόλυτης πιστής αναπαραγωγής των ορθοκανονικών σημάτων  $\phi_i$  που χρησιμοποιούνται στον πομπό σαν συναρτήσεις βάσης των κυματομορφών  $s_i$ . Η υπόθεση αυτή δικαιολογείται για όλες τις παραμέτρους εκτός αυτής της καθυστέρησης ή αντίστοιχα της φάσης των αρμονικών συναρτήσεων που είτε χρησιμοποιούνται αυτούσιες είτε συμβάλουν στη δημιουργία των  $\phi_i$ . Η καθυστέρηση, έστω μόνο της διάδοσης, μεταξύ πομπού και δέκτη είναι κατά κανόνα άγνωστη και μεταβλητή λόγω πολλαπλών ανακλάσεων, διακυμάνσεων των διηλεκτρικών και διαμαγνητικών σταθερών του μέσου κ.α..

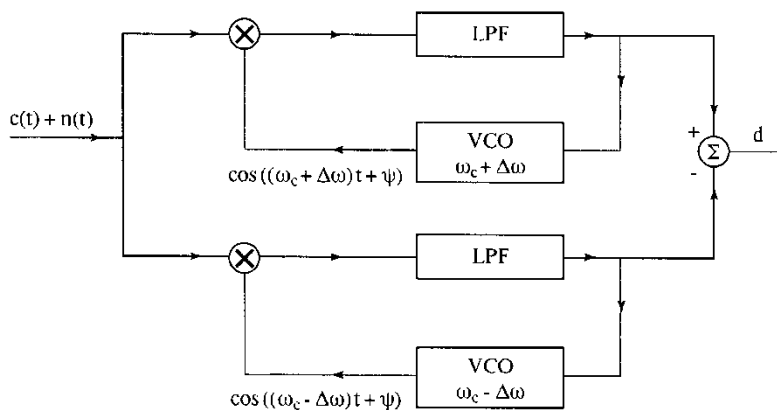
Σύμφωνο ονομάζουμε ένα σύστημα που αποδίδει μόνο με την προϋπόθεση της πιστής αναπαραγωγής φάσης των  $\phi_i$  στον δέκτη. Η αναπαραγωγή γίνεται με διάφορες τεχνικές, όμως η πλέον αξιόπιστη είναι το προσαρμοσμένο φίλτρο του σχήματος 2.3.



**Σχήμα 2.3:** Χρονικός συσχετιστής για σήματα FSK

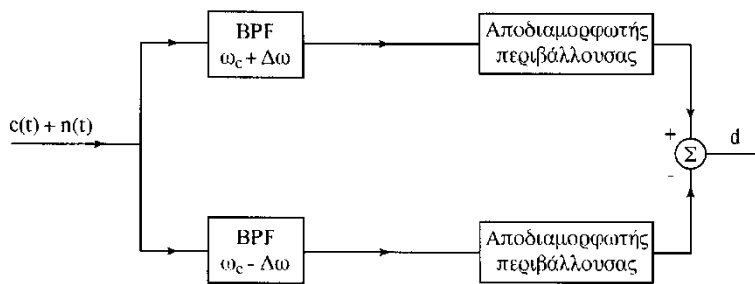
Αποτελείται από δύο χρονικούς σχετιστές που σχετίζουν το φέρον με τις δύο αναμενόμενες εκδοχές του φέροντος που αναπαράγονται στο δέκτη. Ο κλάδος με το ισχυρότερο αποτέλεσμα καθορίζει την απόφαση για το ποιο ψηφίο έχει αποσταλεί.

Ένας άλλος σύμφωνος αποκωδικοποιητής είναι αυτό του επόμενου σχήματος που αποτελείται από δύο σύμφωνους αποδιαμορφωτές συντονισμένους στις δύο αναμενόμενες συχνότητες. Η απόφαση για το ποιο ψηφίο έχει ληφθεί βασίζεται στη σύγκριση των εξόδων των δύο αποδιαμορφωτών, η ισχυρότερη των οποίων καθορίζει το αποτέλεσμα.



**Σχήμα 2.4:** Σύμφωνος αποκωδικοποιητής FSK

Τέλος, ο μη σύμφωνος αποκωδικοποιητής FSK είναι ο πλέον απλός αποκωδικοποιητής και αποτελείται από δύο κλάδους που περιλαμβάνουν ένα ζωνοπερατό φίλτρο και έναν αποδιαμορφωτή περιβάλλουσας. Ο κλάδος που φέρει το ισχυρότερο σήμα καθορίζει το ποιο ψηφίο εστάλη.



**Σχήμα 2.5:** Μη σύμφωνος αποκωδικοποιητής FSK

Εν γένει, το πρόβλημα της ασυμφωνίας φάσης στο δέκτη είναι δύσκολο και ακριβό στις τεχνικές επίλυσής του.

#### Απαιτούμενο εύρος ζώνης για την FSK

Στα επικοινωνιακά συστήματα το απαιτούμενο εύρος (bandwidth) και η ελαχιστοποίηση του είναι ένα από τα σοβαρότερα θέματα. Καθώς η FSK είναι παραλλαγή της FM, η ανάλυσή της βασίζεται στη μαθηματική ανάλυση της FM. Εδώ σαν απόκλιση συχνότητας θεωρούμε τη  $\Delta f = (f_m - f_s)/2$  και το διαμορφώνον σήμα έχει βασική συχνότητα τη  $f_{in} = f_{BR}/2$ , όπου  $f_{BR}$  είναι το bit rate των δεδομένων εισόδου.

Σαν παρατήρηση αναφέρουμε ότι στη χειρότερη περίπτωση που τα δεδομένα αποτελούνται από συνεχείς εναλλαγές bit 1 και 0, η βασική συχνότητα του σήματος των δεδομένων  $f_m$  είναι το  $\frac{1}{2}$  του bit rate αφού κάθε περίοδος περιλαμβάνει ένα mark και ένα space.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο δείκτης διαμόρφωσης MI είναι

$$MI = \Delta f / f_{in} = (f_m - f_s) / f_{BR}$$

Στην πράξη χρησιμοποιούνται συνήθως μικροί δείκτες διαμόρφωσης 0,5-1, ώστε να κρατηθεί το εύρος ζώνης όσο το δυνατόν μικρότερο. Ο ακριβής υπολογισμός του απαιτούμενου εύρους γίνεται με πολύπλοκη μαθηματική ανάλυση, όπως θα δούμε παρακάτω. Με το παράδειγμα που ακολουθεί θα δούμε ένα κατά προσέγγιση υπολογισμό του εύρους ζώνης.



Έστω η μετάδοση ενός σήματος 1200 bps με διαδοχικά mark-space και διαμόρφωση FSK με  $f_m=1200\text{Hz}$  και  $f_s=2400\text{Hz}$ . Από τα δεδομένα προκύπτει ότι ο δείκτης διαμόρφωσης:

$$MI=(2400-1200)/120=1$$

Από τη γενική μαθηματική ανάλυση προκύπτει ότι το αρμονικό περιεχόμενο ενός FSK σήματος αποτελείται από μια βασική συνιστώσα με πλάτος  $J_1, J_2, J_3, \dots$  που απέχουν από τη βασική συνιστώσα κατά συχνότητα ίση με  $f_{in}$ , όπου  $f_{in} = f_{BR} / 2$ . Το πλάτος των αρμονικών αυτών δίνεται από τον πίνακα 1 σαν δείκτης διαμόρφωσης MI.

Ο πίνακας αυτός έχει προκύψει από τη μαθηματική ανάλυση της διαμόρφωσης FSK, που γίνεται με τη βοήθεια των συναρτήσεων Bessel και μάς δίνει το πλάτος των αρμονικών συνιστωσών, όταν είναι γνωστός ο συντελεστής διαμόρφωσης. Οι τιμές του πίνακα αντιπροσωπεύουν το πλάτος της κάθε συνιστώσας, σαν ποσοστό του πλάτους του αδιαμόρφωτου φορέα. Από το σχήμα παραλείπονται ως αμελητέα τα πλάτη με στάθμη μικρότερη του 1% (0,01) του φορέα. Η βασική αρμονική  $J_0$  έχει συχνότητα ίση με τη μέση τιμή του διαμορφωμένου φορέα, δηλ.  $f_c = (f_m + f_s) / 2$ . Επανερχόμαστε τώρα στο παράδειγμα και παρατηρούμε ότι  $f_c = (1200 + 2400) / 2 = 1800 \text{ Hz}$ . Οι αρμονικές συνιστώσες απέχουν μεταξύ τους κατά  $f_{BR} / 2 = 600 \text{ Hz}$  και τα πλάτη τους είναι αυτά που προκύπτουν από τη στήλη του πίνακα με συντελεστή διαμόρφωσης  $MI=1$ .

Δείκτης Διαμόρφωσης MI	Στάθμη αρμονικών (Τιμές Bessel)						
	J0	J1	J2	J3	J4	J5	J6
0,00	1,00						
0,25	0,98	0,12					
0,50	0,94	0,24	0,03				
1,00	0,77	0,44	0,11	0,02			
1,50	0,51	0,56	0,23	0,06	0,01		
2,00	0,22	0,58	0,35	0,13	0,03		
2,50	-0,05	0,50	0,45	0,22	0,07	0,02	

3,00	-0,26	0,34	0,49	0,31	0,13	0,04	0,01
------	-------	------	------	------	------	------	------

Πίνακας 2.2

Από τον πίνακα παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής διαμόρφωσης, τόσο περισσότερες είναι οι αρμονικές συνιστώσες και συνεπώς η απαίτηση σε εύρος ζώνης. Το απαιτούμενο εύρος ζώνης εξαρτάται επίσης από το bit rate του σήματος επειδή η απόσταση μεταξύ των αρμονικών είναι  $f_{BR}/2$ . Από το σχήμα παρατηρούμε ότι απαιτείται ένα εύρος συχνοτήτων τουλάχιστον 2400Hz, για να περάσουν οι σημαντικότερες συνιστώσες J0, J1, J2, που απαρτίζουν το παραπάνω σήμα FSK. Όπως προκύπτει από τον πίνακα 1 σε σήματα FSK με δείκτες διαμόρφωσης 0,5 έως 1 υπάρχουν 2-3 σημαντικότερες αρμονικές συνιστώσες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το απαιτούμενο bandwidth να είναι 2-3 φορές μεγαλύτερο από το bit rate των δεδομένων.

### Συμπεριφορά της FSK στο θόρυβο

#### Ανάλυση σφάλματος

Κατά την ανίχνευση στον δέκτη σφάλμα συμβαίνει όταν το σημείο που αντιστοιχεί στο λαμβανόμενο σήμα, πέφτει έξω από την περιοχή απόφασης  $z_i$  που αντιστοιχεί στην πραγματικά εκπεμφθείσα κυματομορφή  $s_i$  (την περιοχή αυτή τη συμβολίζουμε με  $\bar{z}_i$  ως συμπληρωματική της  $z_i$ ) και η πιθανότητα αυτού του σφάλματος ευρίσκεται με ολοκλήρωση της N-διάστατης κανονικής κατανομής πάνω στην περιοχή  $\bar{z}_i$ . Αθροίζοντας για τα γεγονότα που αντιστοιχούν στην εκπομπή κάθε  $s_i$  ( $i=1,2,\dots,M$ ) και για τα ισοπίθανα  $m_i$  (δηλαδή  $p_i = 1/M$ ), παίρνουμε την ολική πιθανότητα σφάλματος ως

$$P_e = 1 - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \int_{z_i} f_r(r/m_i) dr = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \int_{\bar{z}_i} f_r(r/m_i) dr = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M p_e(m_i) \quad (3)$$

όπου  $p_e(m_i)$  η πιθανότητα λάθους ανίχνευσης στο δέκτη του συμβόλου  $m_i$ . Η μόνη δυσκολία στην παραπάνω εξίσωση είναι η διατύπωση κλειστού τύπου για τον υπολογισμό του ολοκληρώματος, αφού ακόμη και για 'βολικές' περιοχές  $z_i$  (π.χ. σε μονοδιάστατο χώρο παρατήρησης) η ολοκληρούμενη συνάρτηση είναι της μορφής  $e^{-x^2}$  και δεν οδηγεί σε κλειστό τύπο. Ωστόσο η σχέση αυτή ή κάποιο άνω φράγμα μπορεί συχνά να υπολογιστεί με τη βοήθεια της συμπληρωματικής συνάρτησης λάθους (complementary error function)

$$\operatorname{erfc}(x) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-x^2} dx \quad (4)$$

που δίνεται με πίνακες ή με προσεγγιστικούς τύπους.

Ένα άνω φράγμα μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση :

$$p_e(m_e) \leq \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^M p(s_i, s_k) \quad (5)$$

όπου  $p(s_i, s_k)$  η πιθανότητα το ληφθέν σήμα  $r$  να βρίσκεται πλησιέστερα στο σημείο  $s_k$ , που πραγματικά εστάλη. Η (5) είναι απόρροια της πιθανοτικής ανισότητας (γνωστής και ως φράγμα ένωσης-union bound)

$P(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n) \leq P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n)$  αν στην θέση των γεγονότων  $A_k$  θεωρήσουμε αντίστοιχα τα  $(s_i, s_k)$ ,  $k=1,2,\dots,M$ ,  $k \neq i$ .

Η  $p(s_i, s_k)$  είναι εύκολο να υπολογιστεί με χρήση της μονοδιάστατης κανονικής κατανομής πάνω στην ευθεία που συνδέει το  $s_i$  με  $0s_k$ . Αυτό φαίνεται σε προβολή στο πάνω δεξιά μέρος του σχήματος 3.5, όπου μας ενδιαφέρει το εμβαδόν της ουράς της κατανομής από  $d_{ik}/2$  και πέρα, δηλ.

$$p(s_i, s_k) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{d_{ik}}{2\sqrt{N_0}}\right) \text{ για } M=2 \quad (6).$$

Με την προηγούμενη υπόθεση ίσης πιθανότητας γένεσης κάθε  $m_i$ , έχουμε σύμφωνα και με τις (5) και (6)

$$P_e = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M p_e(m_i) \leq \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^M \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^M \operatorname{erfc}\left(\frac{d_{ik}}{2\sqrt{N_0}}\right) \text{ για } M>2 \quad (7).$$

Τέλος χάριν απλοποίησης του τύπου, μπορούμε με περαιτέρω υπερεκτίμηση του σφάλματος να θέσουμε στην (3.21) αντί της  $d_{ik}$ , την ελάχιστη απόσταση  $d_{\min}$  μεταξύ δύο οποιωνδήποτε σημείων του αστερισμού. Καθόσον η  $\operatorname{erfc}(x)$  είναι μονότονα φθίνουσα, παίρνουμε

$$P_e \leq \frac{M-1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{d_{\min}}{2\sqrt{N_0}}\right) \text{ σαν τελικό όριο για το σφάλμα.}$$

Είναι φανερό από την (8) ότι, για δεδομένη πυκνότητα ισχύος του θορύβου,  $N_0$ , έχουμε ελαχιστοποίηση της πιθανότητας λάθους (ή έστω του άνω φράγματος της) όταν μεγιστοποιείται η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των σημείων του σηματοδότη αστερισμού. Για δεδομένη μέγιστη ισχύ πομπού (δηλαδή μέγιστη απόσταση σημείων από την αρχή των αξόνων) αυτό συμβαίνει όταν τα σημεία κατανέμονται ομοιόμορφα στη υπερ-σφαίρα που αντιστοιχεί στην ισχύ αυτή.

#### Σύμφωνη αποδιαμόρφωση συχνότητας (coherent MFSK)

Η απόσταση μεταξύ δύο οποιωνδήποτε διανυσμάτων  $s_i$  και  $s_j$ ,  $i \neq j$ , είναι

$$\|s_i(t) - s_j(t)\| = \sqrt{2}\|s_i(t)\| = \sqrt{2}\|s_j(t)\| = \sqrt{2E}.$$

Έτσι η εξίσωση (8) γίνεται για το σύστημα σύμφωνης MFSK  $P_e \leq \frac{M-1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E}{2N_o}}\right)$

Για  $M=2$  στη σχέση αυτή ισχύει η ισότητα.

#### Ασύμφωνη αποδιαμόρφωση συχνότητας (coherent MFSK)

Ομοίως σε αυτή την περίπτωση έχουμε  $P_e \frac{M-1}{2} e^{-\frac{E}{2N_o}}$ .

Για  $M=2$  ισχύει και πάλι η ισότητα.

### TDMA-Time division multiple access

Είναι μία μέθοδος ψηφιακής μετάδοσης όπου επιτρέπει σε ένα πλήθος χρηστών να έχουν πρόσβαση σε ένα κανάλι συχνοτήτων χωρίς να παρεμβάλλει ο ένας τον άλλο, παραχωρώντας μοναδικές χρονοσχισμές σε κάθε χρήστη μέσα σε κάθε κανάλι.

Στη δεκαετία του 1980, η τεχνολογία των ασυρμάτων ζεύξεων στράφηκε στη διερεύνηση των ψηφιακών δικτύων με σκοπό την αύξηση της χωρητικότητας. Το 1989, η Cellular Telecommunication Industry Association (CTIA) αποφάσισε να χρησιμοποιήσει την TDMA και όχι την FDMA (γνωστή σήμερα σαν narrowband analog mobile phone service) για τα κυψελωτά συστήματα στα 800 MHz και στα 1900MHz. Αργότερα, με την ανάπτυξη της CDMA, η CTIA αποφάσισε να επιτρέπει στους παρόχους να κάνουν οι ίδιοι την επιλογή ανάμεσα σε TDMA και CDMA.

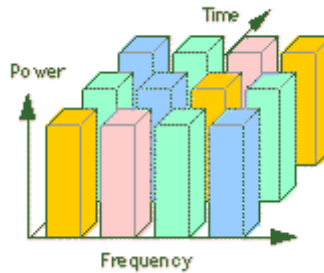
Έτσι οι δύο κυριότερες μέθοδοι για τον χωρισμό του RF είναι η TDMA και η CDMA. Η CDMA είναι μία τεχνολογία Spread-spectrum (απλωμένου φάσματος), που επιτρέπει πολλές συχνότητες να χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας ξεχωριστό κωδικό για κάθε διαφορετικό πακέτο που στέλνει με ένα μοναδικό κλειδί. Ο δέκτης CDMA απαντά μόνο σε αυτό το κλειδί και μπορεί να το επιλέξει από τον δίαυλο και να το αποδιαμορφώσει.

Εξαιτίας της χρήσης της TDMA από το Ευρωπαϊκό στάνταρ GSM, τη Japanese Digital Cellular και τη North American Digital Cellular, η τεχνολογία αυτή έχει επικρατήσει. Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια υπάρχουν συζητήσεις για τα πλεονεκτήματα των του και CDMA έναντι του TDMA.

Το TDMA είναι σχεδιασμένο για να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες καταστάσεις και συνθήκες, από ένα χρήστη που κινείται στο χώρο ενός γραφείου στο κέντρο της πόλης μέχρι ένα χρήστη που κινείται με υψηλή ταχύτητα στην εθνική. Το σύστημα, ακόμη, υποστηρίζει μεγάλη ποικιλία υπηρεσιών στους τελικούς χρήστες, όπως υπηρεσίες φωνής, δεδομένων, fax, sms κ.α..

## Πώς λειτουργεί η TDMA

Το διατιθέμενο φάσμα χωρίζεται σε χρονοσχισμές όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6 και σε κάθε χρονοσχισμή επιτρέπεται μόνο σε ένα χρήστη είτε να εκπέμψει είτε να λάβει.

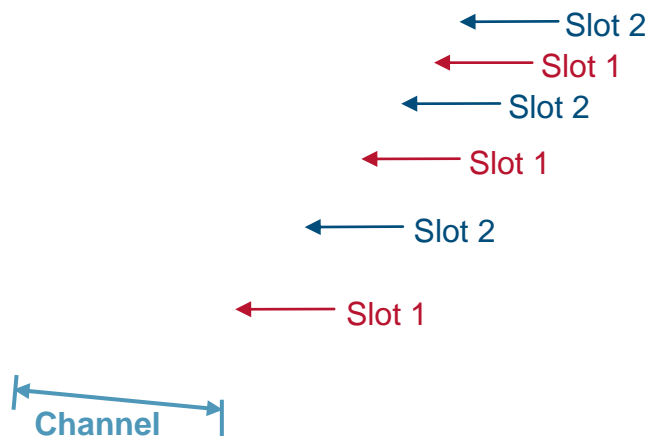


Σχήμα 2.6

Κάθε χρήστη καταλαμβάνει μία κυκλικά επαναλαμβανόμενη χρονοσχισμή, οπότε μια χρονοσχισμή που επαναλαμβάνεται σε κάθε πλαίσιο, μπορεί να θεωρηθεί ως δίαυλος, δεδομένου ότι  $N$  χρονοσχισμές αποτελούν ένα πλαίσιο. Στον χρήστη που θέλει να επικοινωνήσει, εκχωρείται μια μοναδική χρονοσχισμή στο πλαίσιο TDMA, μέσω του διαύλου ελέγχου. Αυτή τη σχισμή μπορεί να κρατηθεί από τον χρήστη μέχρι το τέλος της επικοινωνίας του.

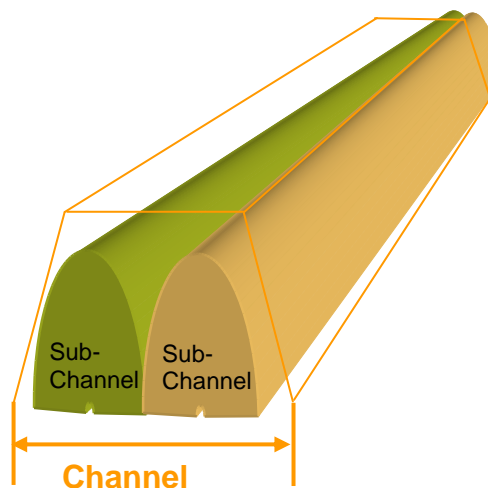
Σε αντίθεση με τα FDMA συστήματα, που χρησιμοποιείται αναλογική μετάδοση FM, στα συστήματα TDMA χρησιμοποιούνται ψηφιακά δεδομένα και ψηφιακή διαμόρφωση. Οι μεταδιδόμενες πληροφορίες από διάφορους χρήστες πολυπλέκονται σε ένα επαναλαμβανόμενο πλαίσιο TDMA. Κάθε πλαίσιο αποτελείται από το προοίμιο (preamble), το μήνυμα πληροφορίας και τον επίλογο (trail bits).

Στα συστήματα TDMA χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές διπλεξίας : διπλεξία χρόνου (TDD, time division duplex) και διπλεξία συχνότητας (FDD, frequency division duplex). Στην πρώτη περίπτωση τα uplink και downlink σήματα φαίνονται σαν να εκπέμποντε ταυτόχρονα αλλά στην ουσία το κανάλι χωρίζεται σε χρονοσχισμές ορισμένης διάρκειας και οι δύο σταθμοί εκπέμπουν εναλλάξ. Αυτή η μέθοδος διπλεξίας είναι πολύ αποδοτική στις περιπτώσεις ασύμετρης ή/και μεταβαλλόμενης κατανομής uplink και downlink. Στο σχήμα 2.7 φαίνεται σχηματικά ο χωρισμός του φάσματος σε χρονοσχισμές. Έτσι για παράδειγμα στο slot 1 έχουμε εκπομπή και στο Slot 2 λήψη.



**Σχήμα 2.7:** Διπλεξία χρόνου TDD

Στην περίπτωση της διπλεξίας συχνότητας, FDD, οι δύο σταθμοί εκπέμπουν σε διαφορετικές συχνότητες μέσα στο ίδιο κανάλι. Στα συστήματα TDMA/FDD, χρησιμοποιείται η ίδια ή παρόμοια δομή προς κάθε κατεύθυνση, αλλά η φέρουσα συχνότητες είναι διαφορετικές για τη ζεύξη κάθε κατεύθυνσης. Γενικά, τα συστήματα TDMA/FDD εισάγουν εσκεμμένα πολλές χρονοσχιστές καθυστέρησης μεταξύ των χρονοσχισμών των δύο κατευθύνσεων ενός χρήστη, ώστε να μην χρειάζονται αμφιδροητές στο κινητό τερματικό. Στο σχήμα 2.8 φαίνεται σχηματικά η δομή του FDD.



**Σχήμα 2.8:** Διπλεξία συχνότητας FDD

Σ' ένα πλαίσιο TDMA, το προοίμιο περιέχει τη διεύθυνση και την πληροφορία συγχρονισμού, την οποία χρησιμοποιούν τόσο ο σταθμός βάσης όσο και το κινητό τερματικό για να αναγνωρίζονται μεταξύ τους. Χρονικές περίοδοι ασφαλείας χρησιμοποιούνται μεταξύ των διαφόρων χρονοσχισμών και πλαισίων, για να επιτρέπουν τον συγχρονισμό των δεκτών.

Όσο αφορά τη μετάδοση, η TDMA μοιράζει το ίδιο φέρον σε αρκετούς χρήστες και κάθε χρήστης χρησιμοποιεί μη επικαλυπτόμενες χρονοσχισμές. Ο αριθμός των χρονοσχισμών ανά πλαίσιο εξαρτάται από πολλαπλούς παράγοντες, όπως π.χ. την τεχνική διαμόρφωσης, το διαθέσιμο εύρος ζώνης κλπ. Η μετάδοση δεδομένων δεν είναι συνεχείς αλλά εμφανίζεται κατά ριπές. Αυτό έχει σαν συνέπεια την μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, καθώς ο πομπός του τερματικού μπορεί να κλείνει, όταν δεν μεταδίδει. Η TDMA χρησιμοποιεί διαφορετικές χρονοσχισμές για εκπομπή και λήψη, οπότε δεν χρειάζονται αμφιδρομητές.

Στα συστήματα TDMA, η χρονική περίοδος ασφαλείας μεταξύ των διαφόρων χρονοσχισμών και πλαισίων πρέπει να ελαχιστοποιείται. Δεν πρέπει όμως το μεταδιδόμενο σήμα να κόβεται απότομα στις άκρες για να μειωθεί χρονική περίοδος ασφαλείας γιατί κάτι τέτοιο θα προκαλέσει την επέκταση του μεταδιδόμενου φάσματος. Για τον σκοπό αυτό, απαιτείται μεγάλη επιβάρυνση για μετάδοση πληροφορίας συγχρονισμού στα συστήματα TDMA. Οι μεταδόσεις γίνονται σε χρονοσχισμές και απαιτείται οι δέκτες να συγχρονίζονται για κάθε ριπή δεδομένων. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιούνται οι χρόνοι ασφαλείας για να διαχωρίζουν τους χρήστες, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα να έχουν τα συστήματα TDMA μεγαλύτερες επιβαρύνσεις για τη μετάδοση της πληροφορίας από ότι τα FDMA. Η TDMA έχει το πλεονέκτημα ότι είναι δυνατόν να ανατεθούν διαφορετικοί αριθμοί χρονοσχισμών ανά πλαίσιο στους διάφορους χρήστες. Έτσι, είναι δυνατόν να διατεθεί στους διάφορους χρήστες εύρος ζώνης σύμφωνα με την αίτησή τους.

Η απόδοση ενός συστήματα TDMA είναι ένα μέτρο του ποσοστού των δεδομένων που μεταδίδονται και αφορούν πληροφορίες χρήστη ως προς τον συνολικό αριθμό δεδομένων. Στο συνολικό αριθμό δεδομένων περιέχεται η επιβάρυνση για την πρόσβαση. Η απόδοση του πλαισίου,  $n_f$ , είναι το ποσοστό των ωφέλιμων bit ανά πλαίσιο. Αν ληφθεί υπόψη ότι σε αυτά τα bit περιέχονται και bit κωδικοποίησης είτε της πηγής είτε του διαύλου, η απόδοση, όσο αφορά τα καθαρά δεδομένα χρήστη είναι γενικά μικρότερη από  $n_f$ . Ο αριθμός των bit επιβάρυνσης  $b_{oh}$  ανά πλαίσιο είναι :

$$b_{oh} = n_r b_r + n_t b_p + n_t b_g + n_r b_g$$

όπου  $n_r$  είναι ο αριθμός των ριπών ελέγχου ανά πλαίσιο,  $n_t$  είναι ο αριθμός των ριπών κίνησης,  $b_r$  είναι ο αριθμός των bit επιβάρυνσης ανά ριπή ελέγχου,  $b_p$  είναι ο αριθμός των bit επιβάρυνσης ανά προοίμιο σε κάθε χρονοσχισμή και  $b_g$  είναι ο αριθμός των ισοδύναμων bits σε κάθε χρονικό διάστημα ασφαλείας. Αν  $T_f$  η διάρκεια του πλαισίου είναι η διάρκεια του πλαισίου και  $R$  ο ρυθμός μετάδοσης στον δίαυλο τότε ο συνολικός αριθμός bit ανά πλαίσιο  $b_f$  θα είναι

$$b_f = T_f R$$

οπότε και η απόδοση του πλαισίου θα είναι

$$n_f = (1 - b_{oh} / b_f)$$

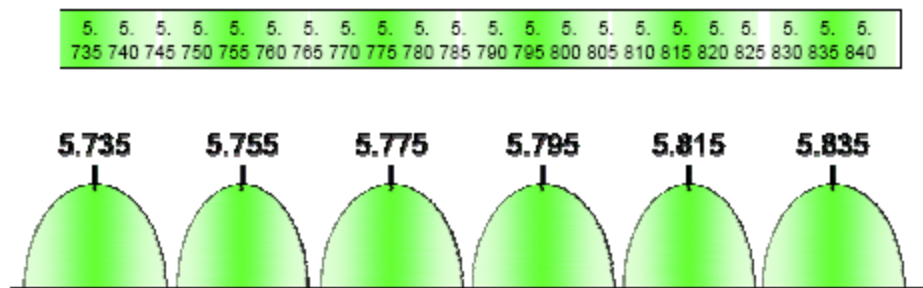
Ο αριθμός των διαύλων, που μπορεί να παρέχει ένα σύστημα TDMA, βρίσκεται πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό  $m$  των χρονοσχισμών ανά ραδιοδιάυλο με τον αριθμό των διαθέσιμων ραδιοδιαύλων.

$$C_{ολ} = m(B_s - 2B_G) / W$$

### Ρύθμιση καναλιών (Channel Planning)

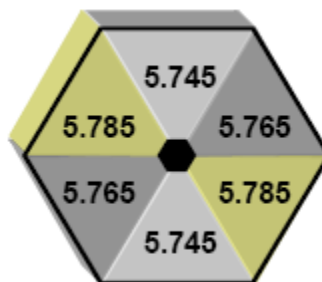
Για την ρύθμιση των καναλιών σε μία κυψέλη πρέπει πρώτα από όλα να λάβουμε υπόψη μας τον εξοπλισμό που διατίθεται. Στην παρούσα εργασία εξετάζουμε μόνο τις συχνότητες 5.7GHz και γι αυτό θα δώσουμε το διάγραμμα μόνο για αυτή την μπάντα συχνοτήτων.

Αρχικά, όπως βλέπουμε και από τα τεχνικά χαρακτηριστικά πρέπει να υπάρχει απόσταση μεταξύ των καναλιών που χρησιμοποιούνται δε μία κυψέλη 20MHz. Για τα advantage AP η απόσταση αυτή πρέπει να είναι 25MHz. Στα 5.7 GHz προσφέρονται 6 μη επικαλυπτόμενα κανάλια όπως φαίνεται στο σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9: Διάταξη καναλιών στα 5.7GHz.

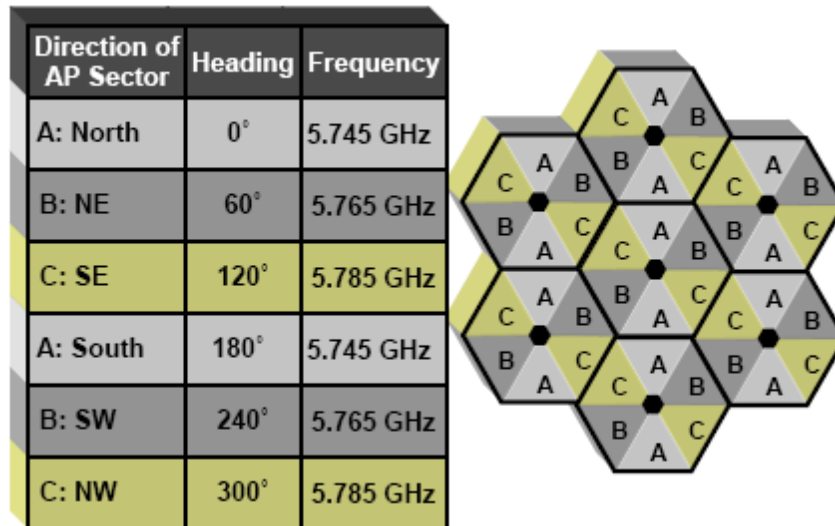
Για κάθε κυψέλη επιλέγονται 3 μη επικαλυπτόμενα κανάλια και τοποθετούνται στους έξι τομείς, έτσι ώστε τα ίδια κανάλια να βρίσκονται το ένα απέναντι από το άλλο όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10



Κάθε κυψέλη του συστήματος πρέπει να έχει ακριβώς την ίδια διάταξη καναλιών με τον ίδιο προσανατολισμό όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11.



Σχήμα2.11

Εύκολα παρατηρείται ότι από τα 6 μη επικαλυπτόμενα κανάλια που προσφέρονται χρησιμοποιούνται μόνο τα 3. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι σε μία θέση μπορούν να τοποθετηθούν 2 εξάδες AP και να έχουμε μεγαλύτερες ταχύτητες ή/και περισσότερους συνδρομητές σε αυτή την κυψέλη.

### Διαχείριση Εύρους Ζώνης (Bandwidth Management)

Το σύστημα Canopy για την διαχείριση του εύρους ζώνης και την ανάθεση του από ένα AP στα διάφορα SMs χρησιμοποιεί την θεωρία token bucket (εικονικός κάδος).

Χρησιμοποιούνται 2 θεωρικοί token bucket, ένας για κάθε πλευρά αποστολής του συστήματος. Δηλαδή υπάρχει ένας κάδος για την πλευρά που στέλνει δεδομένα το AP και ένας για την πλευρά που στέλνει το SM. Υπάρχουν 4 παράμετροι σχετικά με την διαχείριση του εύρους.

1. Διατηρούμενος ρυθμός δεδομένων uplink (Sustained Uplink Data Rate)(kbps)-είναι, στην ουσία, ο ελάχιστον ρυθμός μετάδοσης.
2. Κατανομή ξασπάσματος Uplink (Uplink Burst Allocation)(kb)
3. Διατηρούμενος ρυθμός δεδομένων Downlink (Sustained Downlink Data Rate) (kbps)-είναι, στην ουσία, ο ελάχιστον ρυθμός μετάδοσης.
4. Κατανομή ξασπάσματος Downlink (Downlink Burst Allocation) (kb)

Αυτοί οι παράμετροι μπορεί να οριστούν για μία ολόκληρη περιοχή που καλύπτει ένα AP ή μόνο για μεμονομένα SMs.

Ένα token είναι ίσο με 1 bit πληροφορίας.

Το Burst Allocation καθορίζει το μέγεθος του κάδου σε kilobits, ενώ το Sustained Data Rate ορίζει τον ρυθμό με τον οποίο γεμίζει ο κάδος. Ένα SM επιτρέπεται να χρησιμοποιεί το μέγιστο εύρος ζώνης (για αποστολή και λήψη) για να μεταφέρει όγκο δεδομένων τόσο, όσο ο όγκος του κάδου του τη δεδομένη στιγμή. Μόλις ο κάδος αδειάσει, το SM μπορεί να στείλει ή να λάβει δεδομένα με το ρυθμο του Sustained Uplink Data Rate. Αν για κάποιο χρονικό διάστημα δεν στέλνονται ή λαμβάνονται δεδομένα ο κάδος αρχίζει να γεμίζει πάλι και το SM έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης.

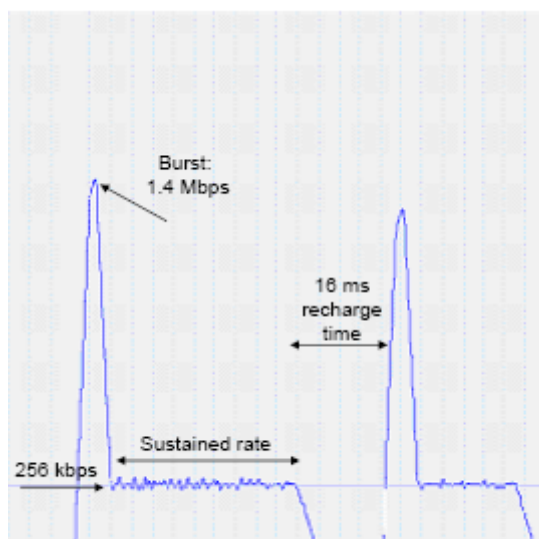
Αν το σύνολο των burst και sustained data που μεταδίδονται είναι παραπάνω από τα tokens στον κάδο, το SM θα αρχίσει να χάνει πακέτα και να ζητά επανάληψη της μετάδοσης μέχρι να μειωθεί ο ρυθμός μετάδοσης.

### Παράδειγμα

Έστω ότι ο Sustained Data Rate είναι 256 kbps. Αυτό όπως είναι λογικό σημαίνει ότι ο κάδος θα γεμίζει με ρυθμό 256 K tokens το δευτερόλεπτο και ότι κάδος έχει μέγεθος 16.000 kbits. Έτσι όπως τα δεδομένα φεύγουν από το AP ή το SM, ο κάδος αδειάζει με τον ρυθμό που μεταδίδονται τα δεδομένα.

Εξετάζουμε δύο σενάρια για δύο διαφορετικά μεγέθει κάδου:

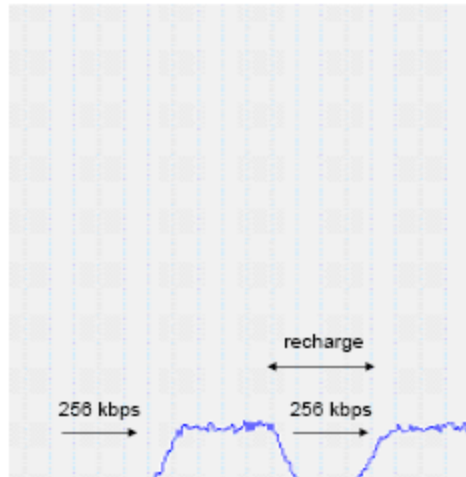
1. Στην πρώτη περίπτωση θεωρούμε ότι το Burst Allocation είναι 16.000 kbits, δηλαδή το μέγεθος του κάδου είναι 16.000 kbits. Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η λειτουργία της θεωρίας.



Σχήμα 2.12

Όπως φαίνεται στην χρονική εξέλιξη, ένα μεγάλο μέρος των δεδομένων προς μετάδοση περνούν γιατί η χωρητικότητα του κάδου είναι έτσι σχεδιασμένη ώστε να μπορεί το σύστημα να χειριστεί ένα τέτοιο ξέσπασμα. Μετά το ξέσπασμα ο κάδος πρέπει να ξαναγεμίσει.

2. Στην δεύτερη περίπτωση το μέγεθος του κάδου είναι 256 kbits.



**Σχήμα 2.13**

Κάποιες στιγμές ο ρυθμός μετάδοσης μπορεί να μειώνεται, αλλά δεν δύναται η δυνατότητα της μετάδοσης μεγαλύτερων πακέτων πληροφορίας με την μορφή του ξεσπάσματος όπως είδαμε στην προηγούμενη περίπτωση. Μία τέτοια ρύθμιση ακυρώνει τα πλεονεκτήματα που μας δίνει το ρυθμιζόμενο μέγεθος του κάδου.

Οι ρυθμίσεις αυτές μπορεί να γίνουν είτε από το AP είτε από το SM. Μέσω του SM μπορεί να χρησιμοποιηθεί το Bandwidth Authentication Management (BAM) server που είναι μέρος του λογισμικού Prizm. Το Prizm είναι το λειτουργικό που χρησιμοποιεί το σύστημα για την παρακολούθηση και την καλή λειτουργία σε μεσαίες ή μεγάλες εγκαταστάσεις .

Με την χρήση λοιπόν του BAM μπορεί ο χειριστής του συστήματος:

- να απαιτεί ασφαλή πιστοποίηση για κάθε SM σε κάθε AP,
- να κάνει διαφορετικές ρυθμίσεις για κάθε SM του συστήματος,
- να εφαρμόσει τις ρυθμίσεις για το εύρος ενός SM σε πολλά,
- να προοθεί τις αλλαγές του προφίλ σε όλα τα SM.

Σε αυτή την εργασία δεν θα κάνουμε λεπτομερή ανάλυση του BAM καθώς η μελέτη μας θα περιοριστεί σε μικρότερα δίκτυα.

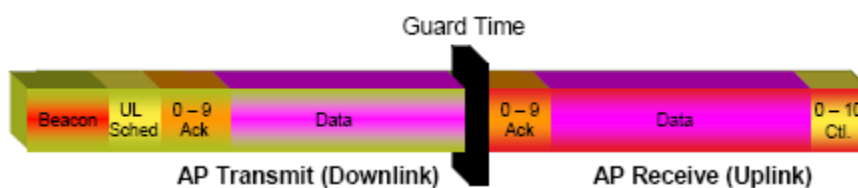
## Δομή Πλαισίου

Στο σύστημα Canopy δύνεται η δυνατότητα να επιλεγεί ο τρόπος scheduling ανάμεσα σε hardware και software. Θα αναλύσουμε εδώ και τις δύο περιπτώσεις.

Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι στην περίπτωση του hardware scheduling επιτυγχάνονται μεγαλύτερες ταχύτητες και μικρότερες καθυστερήσεις από τα AP.

### Hardware Scheduling

Η δομή του πλαισίου φαίνεται στο σχήμα 2.14



Σχήμα 2.14

Το ποσοστό του downlink και uplink ρυθμίζεται στο AP.

Παρατηρούμε ότι ανάμεσα στην εκπομπή και λήψη της μονάδας εισάγεται από το σύστημα χρόνος ασφαλείας (*Guard time*). Αυτός ο χρόνος επιτρέπει στις συσκευές να χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι για εκπομπή και λήψη και αποτρέπει την υπερκάλυψη ή σύγκρουση του uplink και downlink. Εξαρτάται από τη μέγιστη εμβέλεια (*max range*) που έχουμε ορίσει στο AP. Η μέγιστη αυτή εμβέλεια επιλέγεται κάθε φορά σύμφωνα με το πιο απομακρυσμένο SM που καλύπτεται από το AP.

Μέσα στο πλαίσιο εκπομπής υπάρχει ένα *beacon slot* και ένα *uplink schedule slot*. Αυτά τα *slot* είναι προκαθορισμένα και μεταδίδονται (*broadcast*) από το AP. Το *beacon slot* περιέχει στοιχεία που αφορούν τον συγχρονισμό και την διανομή του φάσματος στα διάφορα SM. Έτσι εκεί καθορίζεται

- ο λόγος uplink προς downlink,
- το Color code,
- η μορφή λειτουργίας (PtP ή PMP),
- το πλήθος των καταχωρημένων SM σε ένα AP,
- το νούμερο του πακέτου και
- πληροφορίες για το control slot.

Το *uplink schedule slot* είναι αυτό που ελέγχει την uplink κίνηση ανάλογα με τις αιτήσεις για τη μετάδοση. Έτσι σε κάθε πλαίσιο που στέλνει το AP, στέλνει και το

*schedule για το επόμενο uplink πλαίσιο. Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει και το downlink schedule υπολογίζεται αλλά δεν μεταδίδεται.*

*Ακόμη σε κάθε μετάδοση του AP υπάρχουν 0-9 ack slots (acknowledgment). Αυτά τα slots περιέχουν επιβεβαιώσεις για μέχρι και 9 πακέτα που λήφθηκαν από το AP στο προηγούμενο uplink πλαίσιο. Τα slot αναθέτονται δυναμικά και το πλήθος τους εξαρτάται από την κινητικότητα του συστήματος και τις αιτήσεις για μετάδοση. Έτσι στην περίπτωση που δεν υπάρχουν αιτήσεις για uplink, τα ack slots χρησιμοποιούνται για δεδομένα.*

*Τα data slots περιέχουν τα δεδομένα σε πακέτα των 64 byte. Το πλήθος των slots δεδομένων όπως είναι αναμενόμενο είναι μεταβλητό και εξαρτάται από το πλήθος των ack slots.*

*Στο πλαίσιο λήψης του AP, παρατηρούμε ότι υπάρχουν 0-9 ack slots που στέλνουν τα SMs που λαμβάνουν πακέτα. Όπως και στο πλαίσιο λήψης του AP έτσι και αυτά αναθέτονται δυναμικά και όταν δεν υπάρχουν οι θέσεις τους παραχορούνται στο slot δεδομένων.*

*Τα data slots του πλαισίου λήψης περιέχουν τα δεδομένα που στέλνει το SM προς το AP. Το πλήθος αυτών των slots όπως είναι αναμενόμενο και εδώ δεν είναι σταθερό και εξαρτάται από το πλήθος των ack slots και των control slots.*

*Τα control slots χρησιμοποιούνται για τον ανταγωνισμό μεταξύ των SMs που θέλουν να στείλουν πακέτα, δηλαδή περιέχουν τα αίτηματα των SMs για μετάδοση. Έχουν μεταβλητό πλήθος, 0-10, και ορίζεται από τον χειριστή του συστήματος με βάση το πλήθος των SMs που εξυπηρετούνται από το κάθε AP.*

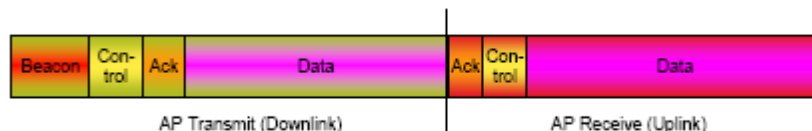
*Στο σχήμα 2.15 βλέπουμε ένα παράδειγμα ενός πλαισίου που ο λόγος του downlink είναι 75%.*

### Σχήμα 2.15

*Δηλαδή το 75% του πλαισίου αφιερώνεται στο downlink και το 25% στο uplink. Η ρύθμιση αυτή γίνεται στο AP. Το AP εκπέμπει την πληροφορία σχετικά με τον λόγο αυτό σε όλα τα SMs του και αυτά προσαρμόζονται ανάλογα με τις οδηγίες που λαμβάνουν. Διαφορετικές εφαρμογές μπορεί να απαιτούν διαφορετική αναλογία uplink και downlink χωρητικότητας.*

### Software Scheduling

Η δομή του πλαισίου φαίνεται στο σχήμα 2.16.



Σχήμα 2.16

Η αναλογία uplink και downlink μπορεί να καθοριστεί στο AP. Για τον λόγο αυτό, όπως φαίνεται και στην εικόνα ξεχωρίζονται τα δεδομένα για uplink και downlink.

Από τις default ρυθμίσεις τα **data slots** είναι 33, 1 **beacon slot**, 1 **control slot** και 3 **acknowledgment slots**. Το ίδιο ισχύει και για το uplink και για το downlink.

Πρέπει να σημειωθεί ότι το πλήθος των slots για έλεγχο (control) και ack μπορεί να αλλάξουν όπως θα δούμε στις μετρήσεις.

Το **beacon slot** περιέχει στοιχεία που αφορούν τον συγχρονισμό και την διανομή του φάσματος στα διάφορα SM. Έτσι εκεί καθορίζεται

- ο λόγος uplink προς downlink,
- το Color code,
- η μορφή λειτουργίας (PtP ή PMP),
- το πλήθος των καταχωρημένων SM σε ένα AP,
- το νούμερο του πακέτου και
- πληροφορίες για το control slot.

Τα **control slots** είναι τα μόνα slot ανταγωνισμού στο Canopy. Όταν ένα SM θέλει να εκπέμπει, στέλνει αίτημα στο AP λέγοντας του το πλήθος των Ethernet πακέτων που έχει να στείλει. Τα uplink control slots είναι 3 σε ένα AP. Έτσι 3 SM μπορούν να στείλουν κάθε φορά στον χρόνο ενός frame αίτημα για μετάδοση. Ο αριθμός αυτός μπορεί να αυξηθεί αν περισσότερα SM ανταγωνίζονται για τα 3 αυτά slot.

Τα **data slots** (δεδομένων) σε κάθε πλαίσιο εξαρτάται από το πλήθος των slots ελέγχου που επιλέγουμε κάθε φορά. Η ρύθμιση για μέγιστη εμβέλεια μειώνει τα slot από 1 έως 2 ενώ η εφαρμογή BER test κατά 1. Κάθε 2 control slots που εισάγονται μειώνουν τα διαθέσιμα data slots κατά 1.

Τα δεδομένα χωρίζονται σε πακέτα των 64-byte πριν μεταδοθούν στην ασύρματη ζεύξη. Έτσι κάθε data slot περιέχει 64 bytes δεδομένων.

Ως αποτέλεσμα στις default ρυθμίσεις μπορούμε να υπολογίσουμε το throughput ως εξής:

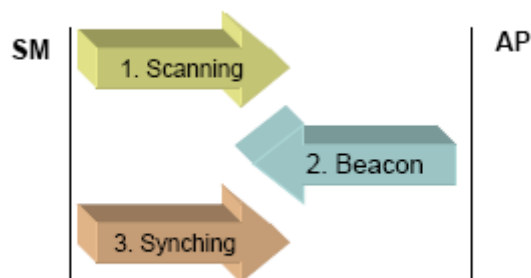
$$33 \text{ dataslots} * 64 \text{ bytes} = 16.896 \text{ bits}$$

Κάθε πλαίσιο έχει διάρκεια 2,5ms δηλαδή επαναλαμβάνεται 400 φορές το δευτερόλεπτο. Έτσι θεωρητικά το μέγιστο throughput είναι  $16.896 \text{ bits} * 400/\text{sec} = 6,758 \text{ Mbps}$

### Διαδικασία καταχώρησης

Όταν ένα SM μπει σε λειτουργία ή ψάχνει για κάποιο AP ακολουθεί μία διαδικασία για να μπορέσει να καταχωρηθεί στο AP. Τα βήματα που ακολουθεί είναι τα εξής:

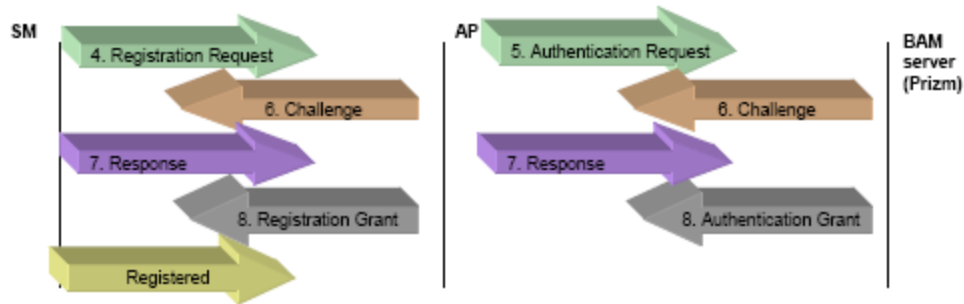
1. Το SM σαρώνει για ένα beacon από κάποιο AP.
2. Το SM εντοπίζει ένα beacon από κάποιο AP.



Σχήμα 2.17

3. Το SM επιχειρεί να συγχρονιστεί με το AP.
4. Το SM στέλνει αίτημα καταχώρησης στο AP.
5. Αν είναι ενεργοποιημένο το BAM (Bandwidth Authentication Management) είναι εναρτοποιημένο στο AP, τότε το αίτημα καταχώρησης περνάει στον BAM server για πιστοποίηση.
6. Ο BAM server στέλνει ένα τυχαίο αριθμό "Challenge" στο SM.
7. Το SM υπολογίζει την απάντηση χρησιμοποιώντας είτε ένα προκαθορισμένο από τον κατασκευστή κλειδί, είτε κάποιο που έχει ορίσει ο χειριστής του συστήματος. Αυτό επιλέγεται στην σελίδα configuration του SM.

8. Ο BAM server αποτιμά την απάντηση του SM. Αν η απάντηση είναι σωστή, τότε το BAM πιστοποιεί το SM και στέλνει επιβεβαίωση για την καταχώρηση στο SM μέσω του AP. Αν το BAM δεν είναι ενεργοποιημένο, το AP στέλνει την επιβεβαίωση της καταχώρησης κατευθείαν στο SM.



Σχήμα 2.18

Η επιβεβαίωση της καταχώρησης, registration grant, περιλαμβάνει στοιχεία σχετικά με την απόσταση του SM από το AP, έτσι ώστε το SM να γνωρίζει πότε θα στείλει δεδομένα και να μην μεταδίδει στην μέση ενός slot.

Τα ack slots των πλαισίων που είδαμε νωρίτερα δημιουργούν ένα ack bitmap στο SM ή στο AP. Αυτό το bitmap καταγράφει τα πακέτα. Τα πακέτα Ethernet, όπως προαναφέρθηκε σπάνε σε πακέτα των 64 bytes έτσι ώστε η επανάληψη αποστολής χαμένων πακέτων να είναι γρηγορότερη.

## Κρυπτογράφηση

### DES (Data Encryption Standard)

#### Εισαγωγή

Το 1974 η IBM σε συνεργασία με την αμερικανική κυβέρνηση ανέπτυξε το DES, ως ένα standard που ο καθένας θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει για να επικοινωνήσει με ασφάλεια. Λειτουργεί σε blocks των 64 bits. Η αρχική πρόταση ήταν σχεδιασμένο να χρησιμοποιηθεί κλειδί με 64 bits. Για άγνωστους λόγους όμως, προτιμήθηκε κλειδί των 56 bits. Ίσως, όπως πολύ πιστεύουν, αυτό να έγινε για να μπορεί η ίδια η αμερικανική να υποκλέπτει κρυπτογραφημένα μηνύματα.

Το DES θεωρείται πλέον ανασφαλές για πολλές εφαρμογές. Αυτό ισχύει κυρίως, λόγω του μικρού μήκους του κλειδιού. Υπάρχουν, επίσης, κάποια αναλυτικά αποτελέσματα που αποδεικνύουν και θεωρητική αδυναμία, παρόλο που αυτό δεν μπορεί πρακτικά να επιβεβαιωθεί.



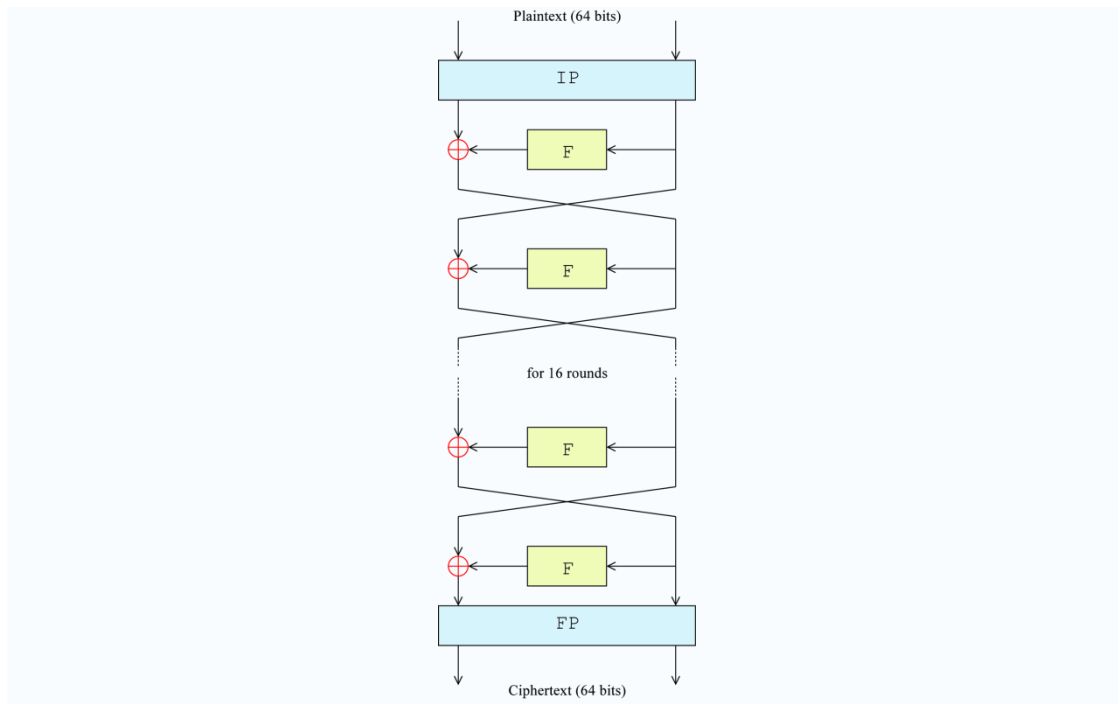
## Περιγραφή

Το DES είναι η αρχέτυπη μέθοδος κρυπτογράφησης- ένας αλγόριθμος που παίρνει μια προκαθορισμένου μεγέθους αλληλουχία bits και τη μετατρέπει με πολύπλοκους μετασχηματισμούς σε ένα κρυπτογράφημα ίδιου μεγέθους. Στην περίπτωση του DES το μέγεθος του block είναι 64 bits. Το DES χρησιμοποιεί επίσης ένα κλειδί για να προσαρμόσει τον μετασχηματισμό, έτσι ώστε η αποκρυπτογράφηση να είναι δυνατή μόνο από αυτούς που γνωρίζουν το συγκεκριμένο κλειδί που χρησιμοποιήθηκε κατά την κρυπτογράφηση. Το κλειδί αποτελείται από 64 bits αλλά μόνο τα 56 bits από αυτά χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο. Τα 8 bits χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο ισοτιμίας και μετά αποβάλλονται. Γι αυτό το λόγο το ενεργό μήκος του κλειδιού είναι 56 bits και συχνά αναφέρονται μόνο αυτά.

## Γενική δομή

Η γενική δομή του αλγόριθμου φαίνεται στο σχήμα 2.19. Η διαδικασία γίνεται σε 16 πανομοιότυπα στάδια, που ονομάζονται rounds (γύροι). Υπάρχει επίσης μια αρχική και μία τελική ανταλλαγή που ονομάζονται IP και FP και είναι η μία αντίστροφη της άλλης (η IP αναιρεί την πράξη της FP και αντίστροφα). Η IP και FP έχουν σχεδόν καμία κρυπτογραφική σημασία, αλλά συμπεριελήφθησαν για την διευκόλυνση της φόρτωσης των blocks στον εξοπλισμό που χρησιμοποιούνταν στα μέσα του 1970, αλλά και για να κάνει την DES να τρέχει αργότερα σε λογισμικό.

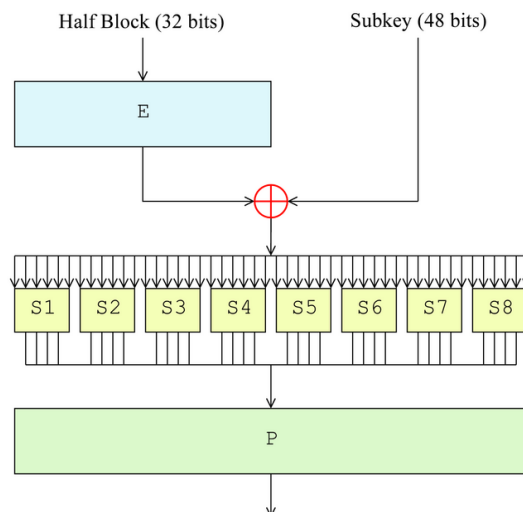
Πριν από τα κυρίως rounds, το block χωρίζεται σε 3 μισά των 32 bits και επεξεργάζονται εναλλασσόμενα. Αυτό το χιαστί σύστημα είναι γνωστό σαν σχήμα Feistel. Η δομή του Feistel εξασφαλίζει ότι η κρυπτογράφηση και η αποκρυπτογράφηση είναι διαδικασίες που παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ομοιότητα- η μόνη διαφορά είναι ότι τα subkeys εφαρμόζονται με αντίστροφο τρόπο κατά την αποκρυπτογράφηση. Ο υπόλοιπος αλγόριθμός είναι πανομοιότυπος. Αυτό απλοποιεί εξαιρετικά την υλοποίηση, και ιδιαίτερα στο hardware, καθώς δεν υπάρχει ανάγκη για διαφορετικούς αλγόριθμους κρυπτογράφησης και αποκρυπτογράφησης.



Σχήμα 2.19

### Η διαδικασία Feistel (F)

Η διαδικασία  $F$ , που απεικονίζεται στο σχήμα 2.20, ενεργεί στο μισό block κάθε φορά και αποτελείται από 4 στάδια.



Σχήμα 2.20

1. Επέκταση (Expansion)- τα 32 bits του μισού block γίνονται 48 bits χρησιμοποιώντας τον συνδυασμό επέκτασης (expansion permutation), που

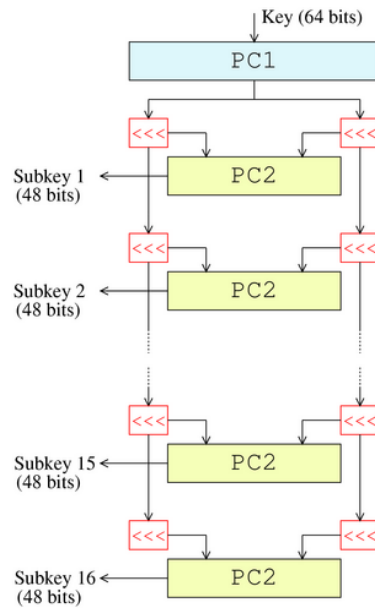
φαίνεται με το γράμμα E στο σχήμα. Η επέκταση αυτή γίνεται διπλασιάζοντας κάποια bits.

2. Ανακάτεμα κλειδιού (Key mixing)- το αποτέλεσμα συνδυάζεται με ένα subkey με χρήση της συνάρτησης XOR. Χρησιμοποιούνται 16 subkeys των 48 bits, ένα για κάθε γύρο. Αυτά απορρέουν από το κύριο κλειδί χρησιμοποιώντας το key schedule.
3. Αντικατάσταση (substitution)- μετά από ανάμειξη των bits στο subkey, το block χωρίζεται σε 8 κομμάτια από 6 bits το κάθε ένα, πριν γίνει η διαδικασία με τα S-boxes, ή boxes αντικατάστασης. Κάθε ένα από τα 8 S-boxes αντικαθιστά τα 6 bits του με 4 bits σύμφωνα με έναν μη γραμμικό μετασχηματισμό, που δίνεται στη μορφή ενός lookup πίνακα. Τα S-boxes δίνουν τον πυρήνα της ασφάλειας του DES, αφού χωρίς αυτά η κρυπτογράφηση θα ήταν γραμμική και κατά συνέπεια εύκολο να διασπαστεί.
4. Ανταλλαγή (permutation)-τέλος, τα 32 bits εξόδου από τα S-boxes ξανατακτοποιούνται με μία προκαθορισμένη μετάθεση, το P-box.

Η εναλλαγή και η αντικατάσταση από τα S-boxes, και η μετάθεση από το P-box είναι αυτά που προκαλούν «σύγχυση και διάχυση» (“confusion and diffusion”) αντίστοιχα, μία θεωρία που αναπτύχθηκε από το Claude Shannon τη δεκαετία του 1940, ως τις αναγκαίες συνθήκες για να είναι μία κρυπτογράφηση ασφαλείς και πρακτική.

### Key schedule

Στο σχήμα 2.21 παρουσιάζεται το key schedule για την κρυπτογράφηση- είναι ο αλγόριθμος που παράγει τα subkeys. Αρχικά, επιλέγονται 56 bits από τα αρχικά 64 του κλειδιού με χρήση του Permuted Choice 1 (PC-1)- τα υπόλοιπα 8 bits είτε απορρίπτονται, είτε θεωρούνται bits ισοτιμίας. Τα 56 bits χωρίζονται μετά σε δύο μισά 28 bits το κάθε ένα, και κάθε ένα από αυτά τα μισά επεξεργάζεται διαφορετικά. Σε διαδοχικούς κύκλους, κάθε ένα από τα δύο μισά περιστρέφεται κατά αριστερά κατά ένα ή δύο bits (ανάλογα με το γύρο), και επιλέγονται 48 subkeys από το Permuted Choice 2 (PC-2)- 24 bits από το αριστερό μισό και 24 από το δεξί μισό. Οι περιστροφές (που φαίνονται στο διάγραμμα με „<<<“) σημαίνουν ότι κάθε subkey χρησιμοποιεί διαφορετική ομάδα από bits. Κάθε bit χρησιμοποιείται σε περίπου 14 από τα 16 subkeys. Το key schedule για την αποκρυπτογράφηση είναι παρόμοιο- πρέπει να παράγει κλειδιά με την αντίστροφη σειρά. Έτσι οι περιστροφές γίνονται προς τα αριστερά και όχι προς τα δεξιά.



Σχήμα 2.21

### Ασφάλεια και κρυπτανάλυση

Παρόλο που έχουν εκδοθεί περισσότερες πληροφορίες για το DES από ότι για οποιαδήποτε άλλη μέθοδο κρυπτογράφησης, η πιο πρακτική και αποδοτική επίθεση παραμένει η brute force. Διάφορες κρυπτογραφικές ιδιότητες του DES είναι γνωστές και θεωρητικές μέθοδοι επίθεσης είναι γνωστές, αλλά παρόλα αυτά οι μέθοδοι αυτές δεν είναι εφικτές λόγω των μη ρεαλιστικών δεδομένων που χρειάζονται για να είναι πρακτικές.

Παρόλη την κριτική σχετικά με την ασφάλεια του DES, δεν έχουν αναφερθεί περιστατικά από υποκλοπή σε κρυπτογραφημένες πληροφορίες με DES.

### Brute Force Επίθεση

Για κάθε κρυπτογράφημα, η πιο βασική μέθοδος επίθεσης είναι η brute force (άμεση δύναμη)- δοκιμή κάθε δυνατού κλειδιού με τη σειρά. Το μήκος του κλειδιού καθορίζει το πλήθος των δυνατών συνδυασμών, και γι αυτό την αποδοτικότητα αυτής της προσέγγισης. Από την αρχή ήταν η επάρκεια του κλειδιού ένα ερώτημα για το DES, ακόμη και πριν αυτή υιοθετηθεί ως στάνταρ. Αυτό ήταν και το στοιχείο που επέβαλε την αντικατάσταση του αλγορίθμου, και όχι η θεωρητική κρυπτανάλυση. Είναι γνωστό ότι η NSA πρότεινε αν όχι έπεισε την IBM για την μείωση του μήκους του κλειδιού από 128 σε 64 bits και μετά σε 56 bits. Αυτό κινεί τις υποψίες ότι η NSA ήταν ικανή από τα μέσα της δεκαετίας του 1970 να αποκρυπτογραφήσει τέτοιου μήκους κωδικούς.

Πολλές προτάσεις για την μηχανή αποκρυπτογράφησης του DES ήταν αρκετά προηγμένες. Το 1977, οι Diffie και Hellman πρότειναν μία μηχανή που κόστιζε κατά προσέγγιση 20 εκατομμύρια δολάρια και θα μπορούσε να βρει ένα κλειδί DES σε μία μέρα. Μέχρι το 1993 ο Wiener είχε προτείνει μία μηχανή εύρεσης κλειδιού που κόστιζε περίπου 1 εκατομμύριο δολάρια και μπορούσε να βρει ένα κλειδί σε 7 ώρες. Παρόλα αυτά, καμία από αυτές τις προτάσεις δεν υλοποιήθηκε ποτέ. Η τρωτότητα του DES τεκμηριώθηκε πρακτικά στα τέλη της δεκαετίας του 1990. Το 1997, η RSA Security διοργάνωσε μία σειρά από διαγωνισμούς με έπαθλο 10.000 δολάρια στην ομάδα που πρώτη θα αποκρυπτογραφούσε ένα κρυπτογραφημένο μήνυμα με DES. Ο διαγωνισμός καταχωρήθηκε στο DESCHALL project, που οργανώθηκε από τους Roche Verser, Matt Curtin και Justin Dolske και χρησιμοποιούσε αδρανείς κύκλους από χιλιάδες υπολογιστές στο διαδίκτυο. Το 1998, η Electronic Frontier Foundation παρουσίασε μία μηχανή που κόστιζε 250.000 δολάρια και μπορούσε να διασπάσει ένα DES κλειδί.

Το κίνητρο για αυτό το project ήταν να αποδειχθεί ότι το DES ήταν και πρακτικά ευάλωτο, και όχι μόνο θεωρητικά. Η μηχανή αυτή μπορούσε να διασπάσει ένα κλειδί DES σε λίγο περισσότερο από 2 μέρες με χρήση brute force.

Η μόνη άλλη πιστοποιημένη μηχανή διάσπασης του DES είναι η μηχανή COPACOBANA που κατασκευάστηκε από τα πανεπιστήμια του Μπόχουμ και του Κίελο στην Γερμανία. Σε αντίθεση με τη μηχανή της Electronic Frontier Foundation η COPACOBANA αποτελούταν από ολοκληρωμένα προγραμματιζόμενα κυκλώματα του εμπορίου. Η χρήση των προγραμματιζόμενων κυκλωμάτων έκανε δυνατή τη εφαρμογή του και για την διάσπαση και άλλων κωδικών. Ένα από τα πιο ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά του COPACOBANA είναι το κόστος του. Μία τέτοια μηχανή μπορούσε να κατασκευαστεί με περίπου 10,000 δολάρια.

### Ταχύτερες επιθέσεις από τη brute force

Υπάρχουν 3 γνωστά είδη επιθέσεων που μπορούν να διασπάσουν και του 16 γύρους της DES με μικρότερη πολυπλοκότητα από ότι η αναζήτηση του σωστού κλειδιού με brute force. Αυτές είναι η διαφορική κρυπτανάλυση (differential cryptanalysis, DC), γραμμική κρυπτανάλυση (linear cryptanalysis, LC), και επίθεση Davie's. Παρόλα αυτά, οι μέθοδοι αυτοί είναι πρακτικά ανέφικτες.

- Η **διαφορική κρυπτανάλυση** ανακαλύφθηκε ξανά στα τέλη της δεκαετίας του 1980 από τους Eli Biham και Adi Shamir. Ήταν ήδη γνωστή στην IBM και την RSA αρά κρατήθηκε κρυφή. Για τη διάσπαση των 16 γύρων του DES, η διαφορική κρυπτανάλυση απαιτεί  $2^{47}$  μη κωδικοποιημένα κείμενα. Το DES σχεδιάστηκε έτσι ώστε να είναι ανθεκτικό στην διαφορική κρυπτανάλυση.

- Η **γραμμική κρυπτανάλυση** ανακαλύφθηκε από τον Mitsuru Matsui το 1993 και απαιτούνται  $2^{43}$  μη κωδικοποιημένα κείμενα. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1994 και είναι η πρώτη πειραματική μέθοδος κρυπτανάλυσης για το DES που έχει καταγραφεί. Δεν υπάρχουν στοιχεία αν το DES ήταν σχεδιασμένο έτσι ώστε να είναι ανθεκτικό σε αυτή τη μέθοδο. Μία γενίκευση της γραμμική κρυπτανάλυσης- η πολλαπλή γραμμική κρυπτανάλυση- είναι που μείωσε τα  $2^{43}$  μη κωδικοποιημένα κείμενα σε  $2^{41}$ .
- Η επίθεση Davie's είναι ειδικά σχεδιασμένη για το DES σε αντίθεση με την διαφορική και την γραμμική κρυπτανάλυση. Πρωτοπαρουσιάστηκε από τον Donald Davies τη δεκαετία του 1980, ενώ το 1997 βελτιώθηκε από τους Biham και Birjukov. Η πιο ισχυρή εκδοχή αυτής της μεθόδου απαιτεί  $2^{50}$  μη κωδικοποιημένα κείμενα, έχει πολυπλοκότητα υπολογισμών  $2^{50}$  και 51% ποσοστό επιτυχίας.

### Δευτερεύουσες ιδιότητες της κρυπτανάλυσης

Συμπληρωματική ιδιότητα. Η DES παρουσιάζει συμπληρωματική ιδιότητα, δηλαδή ισχύει

$$E_K(P) = C \Leftrightarrow E_{\bar{K}}(\bar{P}) = \bar{C}$$

όπου  $\bar{x}$  το συμπληρωματικό του  $x$ ,  $E_K$  η κρυπτογράφηση με κλειδί  $K$ ,  $P$  το μη κωδικοποιημένο κείμενο και  $C$  το κωδικοποιημένο κείμενο. Εξ' αιτίας αυτής της ιδιότητας, η δράση της brute force επίθεσης μπορεί να μειωθεί κατά 2 εάν επιλεγεί συγκεκριμένο μη κρυπτογραφημένο σύστημα.

Η DES έχει επίσης τέσσερα αποκαλούμενα αδύναμα κλειδιά. Η κρυπτογράφηση  $E$  και η αποκρυπτογράφηση  $D$  υπό τη δράση ενός κλειδιού έχουν την ίδια συμπεριφορά:

$$E_K(E_K(P)) = P \text{ ή ισοδύναμα } E_K = D_K$$

Υπάρχουν επίσης 6 ζεύγη από σχεδόν αδύναμα κλειδιά. Η κρυπτογράφηση με ένα από τα σχεδόν αδύναμα κλειδιά,  $K_1$ , λειτουργεί πανομοιότυπα με το ζευγάρι του  $K_2$ :

$$E_{K_1}(E_{K_2}(P)) = P \quad \text{ή} \quad E_{K_2} = D_{K_1}$$

Είναι αρκετά εύκολο να αποφευχθεί η χρήση αυτών των αδύναμων ή σχεδόν αδύναμων κλειδιών σε μία υλοποίηση είτε με ρητό έλεγχο του καθενός, είτε απλά με τυχαία επιλογή των κλειδιών. Κατά την τυχαία επιλογή των κλειδιών, οι πιθανότητες να επιλεγεί ένα αδύναμο ή σχεδόν αδύναμο κλειδί είναι αμελητέες.

## AES (Advanced Encryption Standard)

Καθώς το DES αποδείχθηκε ανεπαρκές και ευάλωτο η αμερικανική κυβέρνηση αναζήτησε νέο ισχυρότερο standard. Το 2001 και μετά από 5 χρόνια συζητήσεων αποφασίστηκε η χρήση του AES, γνωστό και ως Rijndael, το οποίο μπήκε σε εφαρμογή το Μάιο 2002.

Ο αλγόριθμος αναπτύχθηκε από τους Joan Daemen και Vincent Rijmen και υποβλήθηκε κατά την διαδικασία επιλογής του AES με το όνομα Rijndael (σύντμηση των δύο ονομάτων).

### Περιγραφή

Με αυστηρούς όρους, το AES δεν είναι ακριβώς ίδιο με τον αλγόριθμο Rijndael, καθώς ο Rijndael υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα από blocks και μεγέθη κλειδιών. Το AES έχει προκαθορισμένο μέγεθος block των 128 bits και μέγεθος κλειδιού 128, 192 ή 256 bits, ενώ ο Rijndael μπορεί να πάρει διάφορα μεγέθη πολλαπλάσια του 32, με ελάχιστο τα 128 bits και μέγιστο τα 256 bits.

Εξ' αιτίας του προκαθορισμένου μεγέθους των block (128 bits), το AES λειτουργεί σε 4x4 πίνακες bits που ονομάζονται state. Οι περισσότεροι υπολογισμοί του AES λαμβάνουν χώρα σε ένα ειδικό πεπερασμένο πεδίο.

### Ο αλγόριθμος

- Επέκταση κλειδιού με χρήση του Rijndael key schedule (expansion)
- Αρχικός γύρος (initial round)
  - Γύρος προσθεσης κλειδιού (AddRoundKey)
- Γύροι (Rounds) με βήματα
  1. SubBytes – μία μη γραμμική αντικατάσταση όπου κάθε byte αντικαθίσταται από ένα άλλο σύμφωνα με ένα πίνακα
  2. ShiftRows – ένα βήμα μετάθεσης όπου κάθε γραμμή του state μετατίθεται κυκλικά
  3. MixColumns – διαδικασία ανάμιξης των στηλών του πίνακα, συνδυάζοντας τα τέσσερα byte της κάθε γραμμής
  4. AddRoundKey – κάθε byte του state συνδυάζεται με ένα κλειδί του γύρου. Κάθε κλειδί γύρου προέρχεται από το αρχικό κλειδί με χρήση του key schedule.

- Τελικός γύρος
  1. SubBytes
  2. ShiftRows
  3. AddRoundKey

Παρακάτω εξηγούνται τα βήματα του κάθε γύρου

#### Βήμα SubBytes

Σε αυτό το βήμα κάθε byte του πίνακα αντικαθίσταται με χρήση ενός κουτιού 8 bits, που ονομάζεται Rijndael S-box. Αυτή η λειτουργία αποτελεί τη μη γραμμικότητα της κρυπτογράφησης. Το S-box προέρχεται από πολλαπλή αντιστροφή GF ( $2^8$ ), που είναι γνωστό ότι έχει πολύ καλές μη γραμμικές ιδιότητες. Για την αποφυγή επιθέσεων που βασίζονται σε απλές αλγεβρικές ιδιότητες, το S-box είναι κατασκευασμένο με συνδυασμό της αντίστροφης συνάρτησης με συνδυασμό ενός αντιστρέψιμου συνδυασμένου μετασχηματισμού. Επίσης τα S-boxes είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να αποφεύγονται όλα τα προκαθορισμένα σημεία και τα αντίστροφα προκαθορισμένα σημεία.

#### Βήμα ShiftRows

Το βήμα αυτό ενεργεί στις γραμμές του state: μεταθέτει κυκλικά τα byte σε κάθε γραμμή του πίνακα με ένα συγκεκριμένο αντιστάθμισμα. Για την AES η πρώτη γραμμή δεν αλλάζει. Κάθε byte της  $2^{\text{ης}}$  γραμμής μετατίθεται κατά ένα προς τα αριστερά. Παρόμοια, στην  $3^{\text{η}}$  και  $4^{\text{η}}$  γραμμή τα byte μετατίθενται κατά 2 και 3 αντίστοιχα προς τα αριστερά. Για τα block μεγέθους 128 bits και 192 bits η διαδικασία της μετάθεσης είναι ίδια. Με αυτό τον τρόπο, κάθε στήλη της εξόδου του βήματος αυτού αποτελείται από bytes που υπάρχουν στην είσοδο του βήματος σε κάθε στήλη.

#### Βήμα MixColumns

Σε αυτό το βήμα, τα 4 byte της κάθε στήλης του state συνδυάζονται με ένα αντιστρέψιμο μετασχηματισμό. Η διαδικασία του MixColumns έχει είσοδο 4 bytes και έξοδο 4 bytes, όπου και τα 4 bytes της εξόδου επηρεάζεται από κάθε byte της εισόδου. Τα δύο αυτά βήματα μαζί (ShiftRows και MixColumns) παρέχει διάχυση στο κρυπτογράφημα. Κάθε στήλη αντιμετωπίζεται σαν πολυώνυμο πάνω από GF ( $2^8$ ), και πολλαπλασιάζεται ακέραια το  $x^4 + 1$  με ένα προκαθορισμένο πολυώνυμο  $c(x) = 3x^3 + x^2 + x + 2$ .



### Βήμα AddRoundKey

Σε αυτό το βήμα το subkey συνδυάζεται με το state. Για κάθε γύρο, παράγεται ένα subkey από το κυρίως κλειδί με χρήση του Rijndael key schedule. Κάθε κλειδί έχει το ίδιο μέγεθος με το state. Το subkey προστίθεται συνδυάζοντας κάθε byte του state με το αντίστοιχο byte του subkey με χρήση της XOR.

## Παράμετροι

### Ρυθμός Μετάδοσης Δεδομένων (Bit rate)

Είναι ο ρυθμός μετάδοσης με τον οποίο μεταδίδονται τα bits δεδομένων και εκφράζεται σε bit per second (bps). Επισημαίνεται ότι ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων ή bit rate, δεν αναφέρεται στην ταχύτητα μεταφοράς των data από τα τηλεπικοινωνιακά κανάλια, αλλά εκφράζει τον ρυθμό αποστολής του από τον πομπό. Ο χρόνος που χρειάζονται τα δεδομένα για να διανύσουν από άκρη σε άκρη ένα κανάλι δεν έχει καμία απολύτως σχέση με την παράμετρο αυτή.

Ο ρυθμός μετάδοσης στην περίπτωση της σειριακής μετάδοσης ορίζεται ως

$$S = (1/T) \log_2 M$$

όπου

T η διάρκεια ενός bit του αποστελλόμενου σήματος σε sec

M ο αριθμός των διαφορετικών καταστάσεων του σήματος

S ο ρυθμός μετάδοσης που εκφράζεται σε bps.

Για απλές ψηφιακές μεταδόσεις που το σήμα έχει δύο δυνατές καταστάσεις (0 και 1), το  $M=2$  και ο τύπος απλοποιείται σε  $S=1/T$ .

Στην περίπτωση της παράλληλης μετάδοσης, ο ρυθμός μετάδοσης των data είναι:

$$S = (K/T) \log_2 M$$

όπου

K ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων καναλιών

T η διάρκεια της μονάδας του διαμορφωμένου σήματος σε δευτερόλεπτα

M ο αριθμός των διαφορετικών καταστάσεων του διαμορφωμένου σήματος.

## Ρυθμός μετάδοσης διαμορφωμένου σήματος (Modulated rate-Baud rate)

Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται κυρίως για μεταδόσεις μέσω modem και περιγράφει τον αριθμό των μεταβολών του διαμορφωμένου σήματος που έγιναν στη μονάδα του χρόνου. Η μονάδα που εκφράζει αυτό το ρυθμό είναι το baud.

Ο ρυθμός μετάδοσης διαμορφωμένου σήματος (baud rate) δεν εκφράζει κατ' ανάγκη το ρυθμό μετάδοσης bit rate. Αν η τεχνική διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται αντιστοιχεί ένα bit σε κάθε μεταβολή του διαμορφωμένου σήματος, τότε το bit rate είναι ίσο με το baud rate. Συχνά όμως το bit rate είναι μεγαλύτερο baud rate και τούτο επιτυγχάνεται με διαμορφώσεις που σε κάθε μεταβολή του διαμορφωμένου σήματος αντιστοιχούν περισσότερα από ένα bit.

## Χωρητικότητα Ζεύξης (Link Capacity)

Η ικανότητα μετάδοσης πληροφορίας ή αλλιώς χωρητικότητα μίας ζεύξης, είναι ο μέγιστος αριθμός των συμβόλων που μπορούν να μεταφερθούν μέσω μιας ζεύξης στη μονάδα του χρόνου και εκφράζεται σε bps.

Στην ιδανική περίπτωση που η ζεύξη δεν έχει θόρυβο, η χωρητικότητα της είναι άμεσα και αποκλειστικά εξαρτώμενη από το εύρος ζώνης συχνοτήτων της ζεύξης.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται δύο στάθμες σήματος, οι 0 και 1, ο Nyquist προσδιόρισε τη χωρητικότητα του καναλιού σε

$$C = 2B$$

όπου C η χωρητικότητα του διαύλου σε bps

B το εύρος ζώνης συχνοτήτων σε Hz.

Ο τύπος αυτός ισχύει για μετάδοση δυαδικών καταστάσεων, ενώ ο πλήρης τύπος του Nyquist είναι:

$$C = 2B \log_2 M$$

όπου M ο αριθμός των διαφορετικών καταστάσεων του σήματος.

Ας υποθέσουμε για παράδειγμα ένα κανάλι με εύρος ζώνης 3000Hz και 4 διαφορετικές καταστάσεις (στάθμες) σήματος, δηλ. M=4. Τότε:

$$C = 2 \times 3000 \times \log_2 4 = 12000 \text{ bps}$$

Από τον προηγούμενο τύπο εξαγάγουμε το συμπέρασμα ότι σε κανάλι με συγκεκριμένο εύρος ζώνης B, μπορούμε να αυξήσουμε την επιτεύξιμη ταχύτητα αυξάνοντας τον αριθμό των διαμορφωμένων καταστάσεων του διαμορφωμένου σήματος. Αυτός όμως δεν μπορεί να γίνει όσο μεγάλος εμείς επιθυμούμε, γιατί το πρόβλημα μετατίθεται στον δέκτη, που θα πρέπει να είναι ικανός να αναγνωρίζει M διαφορετικές καταστάσεις. Αν το M είναι πολύ μεγάλο, η διακριτικότητα της κάθε

κατάστασης ως προς τις άλλες θα είναι μικρή, συνεπώς ο δέκτης θα τις αναγνωρίσει δύσκολα. Επιπρόσθετα αν υπάρχει κάποιος θόρυβος κατά την ώρα της μετάδοσης, η αναγνώριση κάποιας κατάστασης μπορεί να γίνει λανθασμένα.

Επειδή στην πράξη ο θόρυβος είναι κάτι φυσιολογικό, ο τύπος που εκφράζει την χωρητικότητα ενός καναλιού πρέπει να περιέχει και το επίπεδο του θορύβου. Το επίπεδο του θορύβου από μόνο του δεν σημαίνει πολλά πράγματα, εκείνη όμως η παράμετρος που αντικατοπτρίζει την πραγματικότητα είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο  $S/N$  (Signal to Noise), όπου με το  $S$  αναπαριστούμε την ισχύ του μεταδιδόμενου σήματος και με το  $N$  την ισχύ του θορύβου που υπάρχει στη ζεύξη.

Ο λόγος αυτός έχει αξία όταν μετράται στη μεριά του δέκτη, αφού η επίδραση του θορύβου είναι ουσιώδης εκεί που πρέπει να διαχωριστεί το σήμα από τον θόρυβο. Συνήθως ο λόγος σήματος προς θόρυβο μετράται σε dB

$$\frac{S}{N} \text{ dB} = 10 \log_{10}(S/N)$$

Όσο μεγαλώνει ο λόγος  $S/N$  τόσο καλύτερη είναι η μετάδοση, καθώς ο δέκτης διαχωρίζει με πιο ευκολία το σήμα από το θόρυβο και με λιγότερες πιθανότητες λάθους. Σύμφωνα με τον κανόνα του Shannon-Hartley η χωρητικότητα  $C$  μίας ζεύξης εξαρτάται από τον  $S/N$  και το εύρος ζώνης  $B$  υπακούοντας στον ακόλουθο τύπο:

$$C = B \log_2(1 + S/N)$$

Ας θεωρήσουμε για παράδειγμα σαν κανάλι μια τηλεφωνική γραμμή με εύρος ζώνης 3000Hz και λόγο σήματος προς θόρυβο  $\frac{S}{N} \text{ dB} = 40 \text{ dB}$ . Τα 40 dB αντιστοιχούν σε λόγο σήματος προς θόρυβο 10000. Δεδομένης της τιμής του λόγου σήματος προς θόρυβο η χωρητικότητα του συγκεκριμένου καναλιού είναι:

$$C = 3000 \log_2(1 + 10000) = 39870 \text{ bps}$$

Σημειώστε ότι οι τιμές που μας δίνει ο τύπος αυτός είναι οι μέγιστες θεωρητικές. Στην πράξη είναι μικρότερες αφού δεν λαμβάνονται υπόψη οι ατέλειες των συσκευών και οι λοιπές παραμορφώσεις.

Η γνώση της χωρητικότητας της ζεύξης είναι σημαντική για τον σχεδιασμό, την διαχείριση και την λειτουργία ενός δικτύου. Με την αυξανόμενη δημοτικότητα της τεχνολογίας των ασύμμετρων ζεύξεων, είναι επιθυμητό να έχουμε μία μέθοδο εκτίμησης της χωρητικότητας που να μετρά ταυτόχρονα την up και downlink χωρητικότητα.

## BER (Bit error rate)

Για την μέτρηση της απόδοσης από άκρο σε άκρο, συνήθως χρησιμοποιούμε τον BER. Στην ουσία, ο λόγος αυτός ποσοτικοποιεί την αξιοπιστία ολόκληρου του συστήματος από τα εισερχόμενα έως τα εξερχόμενα bits συμπεριλαμβανομένων και των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, των κεραιών και του διαύλου. Ο ορισμό του BER δίνεται από τον τύπο :

$$\text{BER} = \text{Σφάλματα} / \text{Συνολικός αριθμός bits.}$$

Όταν το σήμα είναι ισχυρό και ο δίαυλος αδιατάραχος τότε ο λόγος αυτός είναι εξαιρετικά μικρός ώστε να θεωρείται αμελητέος. Στην περίπτωση όμως που επιθυμούμε να διατηρήσουμε ένα ικανοποιητικό σηματοθορυβικό λόγο σε μη ιδανικές συνθήκες για μετάδοση, τότε ο BER αποκτά ιδιαίτερη σημασία, είτε οι ατέλειες της μετάδοσης οφείλονται στα ηλεκτρονικά κυκλώματα είτε στο μέσο μετάδοσης.

Κύριος παράγοντας μείωσης του BER είναι ο θόρυβος. Ο θόρυβος είναι στοχαστική διαδικασία που περιγράφεται από τους όρους της στατιστικής. Αυτός που εισάγεται από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα περιγράφεται από την συνάρτηση Gauss, εφ' όσον ο δίαυλος περιγράφεται συνήθως από συνάρτηση Rayleigh.

Ένας άλλος παράγοντας μείωσης του BER είναι τα σφάλματα κβαντοποίησης, μέσω λανθασμένης ή αμφιλεγόμενης επανάκτησης από ψηφιακή κυματομορφή. Και αυτή η παράμετρος περιγράφεται από μια συνάρτηση πιθανότητας που προσδιορίζει την πιθανότητα μετάβασης του ψηφιακού σήματος ή του edge detection error. Αυτά τα σφάλματα είναι κυρίως μία συνάρτηση της ακρίβειας της διαδικασίας μετατροπής του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό και αντίστροφα, και σχετίζεται με το πλήθος των ψηφίων που χρησιμοποιούνται σε αυτό το σημείο του κυκλώματος. Ακόμα η ακρίβεια της αναλογικής διαδικασίας διαμόρφωσης/ αποδιαμόρφωσης και τα αποτελέσματα του φιλτραρίσματος (filtering on signal and noise bandwidth) επηρεάζουν τα σφάλματα κβαντοποίησης.

Ο BER μπορεί να περιγραφεί και από την πιθανότητα λάθους (Probability of error), POE

$$POE = \frac{1}{2}(1 - \text{erf})\sqrt{E_b/N_o}$$

όπου erf είναι η συνάρτηση πιθανότητας λάθους, που εξαρτάται από τη μέθοδο διαμόρφωσης. Είναι σημαντικό ότι η POE είναι συνάρτηση του  $E_b/N_o$  που είναι μία μορφή του σηματοθορυβικού λόγου.

Ένας τρόπος για να μειώσουμε την πυκνότητα θορύβου είναι να μειώσουμε το εύρος φάσματος, αλλά περιοριζόμαστε από το απαιτούμενο εύρος ζώνης για τη διατήρηση του bit rate από τα κριτήρια Nyquist. Μπορούμε επίσης να αυξήσουμε

την ενέργεια του κάθε bit αυξάνοντας την ισχύ εκπομπής, αλλά οι κανονισμοί και τα προβλήματα παρεμβολών με άλλα συστήματα μπορούν να περιορίσουν αυτή την επιλογή. Το χαμηλότερο bit rate αυξάνει επίσης την ενέργεια του bit αλλά μειώνει την ταχύτητα της ζεύξης. Τελικά, η βελτιστοποίηση του λόγου  $E_b/N_0$  είναι η σωστή επιλογή αυτών των παραγόντων.

Ένα η βασική ιδέα μέτρησης του BER είναι θεωρητικά απλή- αποστολή ενός data stream μέσω του συστήματος και σύγκριση εισόδου και εξόδου- αλλά η εφαρμογή της δεν είναι καθόλου τετριμμένη. Σε ένα απείρωσ μεγάλο χρονικό διάστημα, μπορούμε να θεωρήσουμε την μετάδοση δεδομένων σαν μία τυχαία διαδικασία. Παρόλα αυτά, επειδή πρακτικά είναι αδύνατη η μέτρηση αυτή, χρησιμοποιούμε μια ψευδο-τυχαία ακολουθία δεδομένων για το μέτρηση. Η ακολουθία αυτή ονομάζεται ψευδοτυχαία επειδή δεν μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα πραγματικά τυχαίο σήμα χρησιμοποιώντας ντετερμινιστικές μεθόδους.

Μία άλλη δυσκολία που παρουσιάζεται κατά τη διαδικασία μέτρησης του BER αφορά ένα πρακτικό ζήτημα. Είναι πολύ δαπανηρό και χρονοβόρο να στήσουμε ένα ολόκληρο σύστημα με κεραιές και ιστούς για να μετρήσουμε μόνο το BER ενός συστήματος φιλτραρίσματος ή ενός κυκλώματος αποδιαμόρφωσης.

### RSSI (Received signal strength indicator)

Η μέτρηση του RSSI γίνεται συνήθως στο στάδιο ενδιάμεσης συχνότητας (IF) πριν τον ενισχυτή IF. Σε συστήματα με μηδενική IF, η μέτρηση γίνεται στο σήμα βασικής ζώνης, πριν τον ενισχυτή βασικής ζώνης.

### Jitter

Το jitter είναι μία σύντομη χρονική απόκλιση ενός ψηφιακού σήματος, από αυτό που θεωρείται ιδανικό. Σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα η εμφάνιση του jitter θα προκαλέσει τελικά σφάλματα στη μετάδοση δεδομένων.

Η παράμετρος που είναι σημαντικότερη για το χρήστη του συστήματος είναι η συχνότητα εμφάνισης αυτών των σφαλμάτων, δηλαδή το BER.

Για να καταλάβει jitter, κάποιος πρέπει να θυμηθεί ότι το στοιχείο (είτε ήχος, βίντεο, εικόνες είτε κείμενο) στέλνεται σπάνια πλήρως. Τα δεδομένα είναι χωρισμένα σε εύχρηστα "πακέτα" με επικεφαλίδες που περιχουν τα στοιχεία για την αναπαραγωγή των δεδομένων όταν αυτά φτάσουν στον χρήστη. Όταν το jitter εμφανίζεται, μερικά πακέτα μπορούν να χαθούν κατά τη μεταφορά ή να φτάσουν με σφάλματα και να στοιχεία για την αναπαραγωγή του μηνύματος να χαθούν.

Κατά συνέπεια όταν εμφανίζεται jitter, τα όργανα ελέγχου υπολογιστών και οι επεξεργαστές υπολογιστών μπορούν να δυσλειτουργήσουν, τα αρχεία μπορούν να χαθούν, τα ακουστικά αρχεία μπορούν να αποκτήσουν το θόρυβο, τα τηλεφωνήματα Διαδικτύου μπορούν είναι διακεκομμένα, να υποστούν τις χρονικές καθυστερήσεις ή να αποσυνδεθούν. Λόγω των ανεπιθύμητων συνεπειών του, το jitter είναι μια σημαντική εκτίμηση στην μελέτη όλων των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

### **Προβλήματα και αιτίες**

Το κλειδί για την κατανόηση jitter βρίσκεται σε μια μεμονωμένη λέξη: ακρίβεια. Όπως έχει σημειωθεί ανωτέρω, οι ψηφιακές πληροφορίες στέλνονται στα πακέτα: ολόκληρο το σήμα χωρίζεται σε χοντρά κομμάτια του στοιχείου που διαβιβάζεται σε μια λαμβάνουσα μονάδα για αναπαραγωγή. Εάν εμφανίζεται jitter, ο συγχρονισμός γίνεται ένα πρόβλημα και η λαμβάνουσα μονάδα δυσκολεύεται να συγκεντρώσει σωστά τα εισερχόμενα πακέτα. Το Jitter μπορεί να εμφανιστεί κατά τη μεταφορά ή η ίδια στη λαμβάνουσα συσκευή.

Το ταξίδι των ψηφιακών πληροφοριών (είτε αποκλιστικά μέσω των καλωδίων είτε με ασύρματη μετάδοση) παρακωλύεται από την ποικιλία των ηλεκτρονικών ή μηχανικών ελαττωμάτων που μπορούν να έχουν επιπτώσεις στα σήματα που μεταδίδονται.

### **Πρόληψη και διόρθωση Jitter**

Για να ελαχιστοποιήσει τις δυσμενείς επιδράσεις του jitter χρησιμοποιείται συνήθως ένα jitter buffer (απομονωτής). Το buffer χρησιμεύει ως η περιοχή αποθήκευσης στο σύστημα όπου τα εισερχόμενα πακέτα τακτοποιούνται πριν την αναπαραγωγή τους στον υπολογιστή δίνεται ο χρόνος που απαιτείται για να εξασφαλίσει ότι τα εισερχόμενα πακέτα στοιχείων είναι πλήρη προτού να μπορέσουν να αναπαραχθούν.

### **EIRP (Equivalent isotropic radiated power)**

Το EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) [Ενεργή Ισοτροπική Ακτινοβολούμενη Ισχύς] είναι η φαινομενική ακτινοβολούμενη ισχύς προς το δέκτη, εάν υποτεθεί ότι το σήμα ακτινοβολείται ισομερώς προς σ' όλες τις κατευθύνσεις, έτσι όπως ένα σφαιρικό κύμα που εκπηγάζει από ένα σημείο (πηγή). Με άλλα λόγια, το αριθμητικό αποτέλεσμα παραγωγής της ισχύος που παρέχεται σε μια κεραία και την απολαβή της. Η τιμή του EIRP εκφράζεται σε dBW και υπολογίζεται από τον τύπο

$$\text{EIRP}_{[\text{dB}]} = 10 \cdot \log[P_T \cdot G_T] = 10 \cdot \log[P_T] + G_T_{[\text{dB}]} [\text{dBW}].$$

όπου  $P_T$  είναι η εκπεμπόμενη ισχύς και  $G_T$  το κέρδος της κεραίας. 0

Σε κατοικημένες περιοχές, οι κανονισμοί περιορίζουν την EIRP έτσι ώστε να προστατέψουν τους πολίτες και τους εργαζόμενους από την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο υψηλής ισχύος. Παρόλα αυτά η EIRP συνήθως περιορίζεται

για την αποφυγή παρεμβολών σε υπηρασίες που χρησιμοποιούν την ίδια ή παρόμοια συχνότητα.

## Ραδιοκάλυψη

### Link Budget

Περιβάλλον χωρίς εμπόδια

Αρχικά θα πρέπει να υπολογίσουμε τις απώλειες ελευθέρου χώρου (free space loss), δηλαδή τις απώλειες που θα είχε μία ζεύξη χωρίς κανένα εμπόδιο

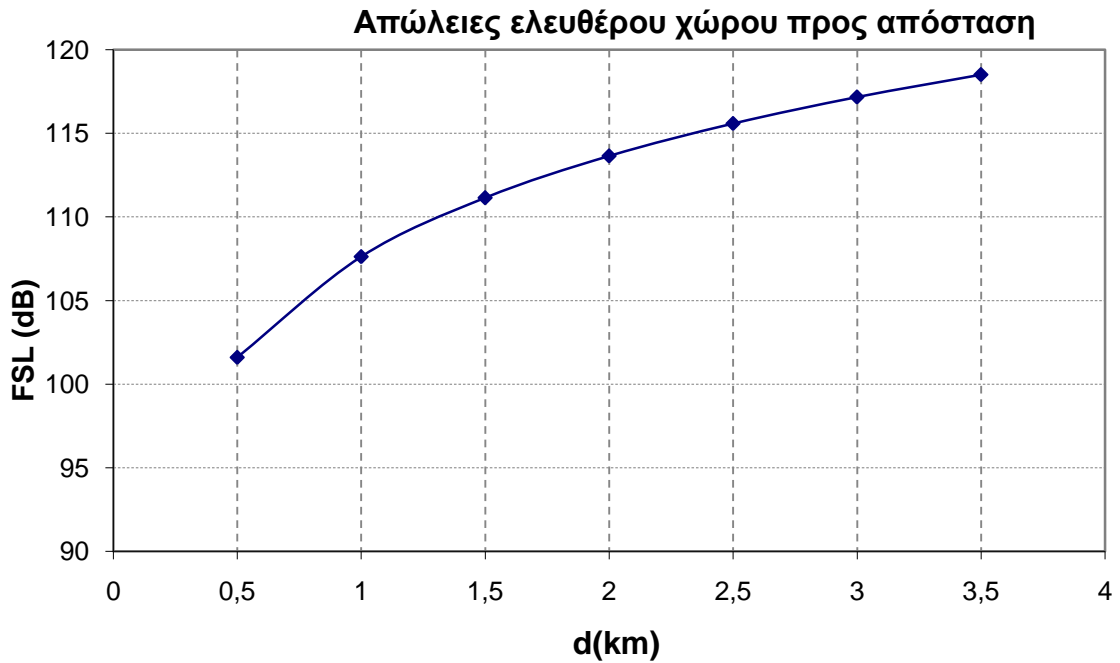
$$FSL = 32,45 + 20\log(f) + 20\log(d)$$

όπου η FSL δίνεται σε dB, η συχνότητα f δίνεται σε MHz και η απόσταση των δύο κεραιών σε km.

Στον πίνακα 2.3 φαίνεται ο υπολογισμός του FSL για διάφορες αποστάσεις στην συχνότητα των 5740 MHz.

d(km)	f(MHz)	FSL(dB)
0,5	5740	101,6076379
1	5740	107,6282378
1,5	5740	111,150063
2	5740	113,6488378
2,5	5740	115,587038
3	5740	117,1706629
3,5	5740	118,5095987

Πίνακας 2.3



Σχήμα 2.25

Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε ένα περιβάλλον χωρίς εμπόδια τότε η ισχύς του σήματος στον δέκτη θα είναι

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} + G_{ref} - FSL$$

όπου  $P_{RX}$  η ισχύς στον δέκτη,  $P_{TX}$  η εκπεμπόμενη ισχύς,  $G_{TX}$  το κέρδος της κεραίας του πομπού,  $G_{RX}$  το κέρδος της κεραίας του δέκτη,  $G_{ref}$  το κέρδος του ανακλαστήρα.

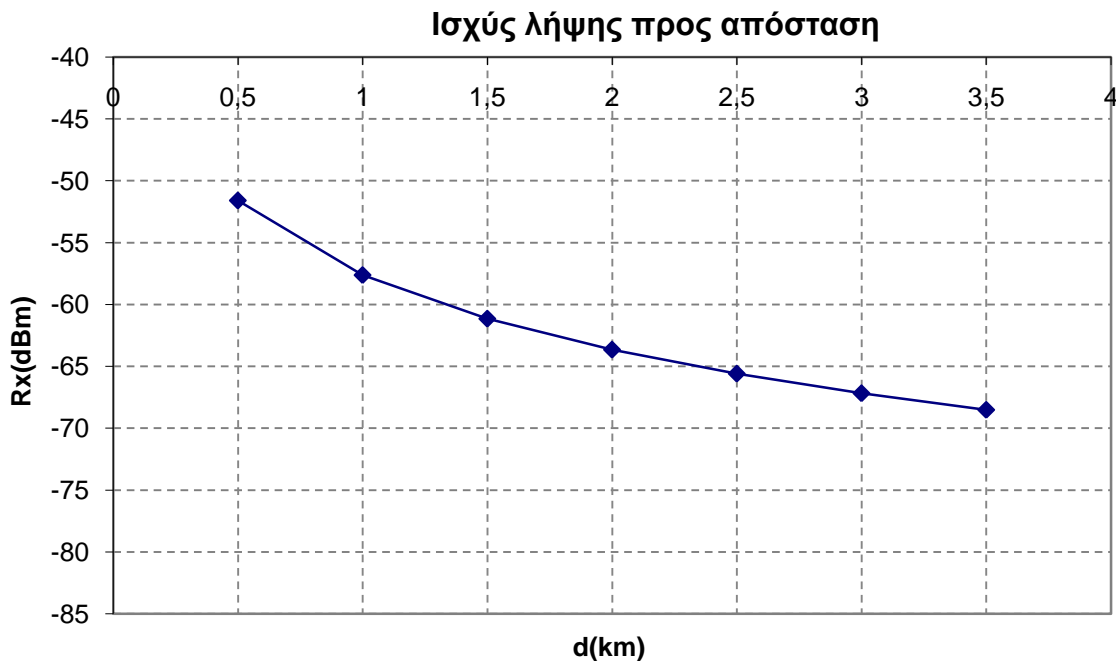
Στο σύστημα που εξετάζουμε έχουμε  $P_{TX} = 23\text{dBm}$ ,  $G_{TX} = 7\text{dBi}$ ,  $G_{RX} = 7\text{dBi}$ ,  $G_{ref} = 6\text{dBi}$

$$P_{RX} = 43 - FSL$$

d(km)	f(MHz)	FSL(dB)	Rx(dBm)
0,5	5740	101,607638	-51,60763793
1	5740	107,628238	-57,62823785
1,5	5740	111,150063	-61,15006303
2	5740	113,648838	-63,64883776
2,5	5740	115,587038	-65,58703802
3	5740	117,170663	-67,17066294
3,5	5740	118,509599	-68,50959873

Πίνακας 2.4





Σχήμα 2.26

Στο σχήμα 2.26 βλέπουμε την ισχύ λήψης όταν οι δύο κεραίες έχουν οπτική επαφή και η πρώτη ζώνη Fresnel είναι ελεύθερη. Συνήθως όμως κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό. Για τις ανάγκες αυτής της εργασίας, όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο, έγιναν μετρήσεις σε ημιαστικό περιβάλλον. Δηλαδή, σε μια περιοχή με κτήρια κάποια από τα οποία μπορεί να είναι και ψηλά αλλά όχι πυκνή οικοδόμηση όπως θα ήταν σε μια μεγάλη πόλη.

Έτσι, κατά την διαδικασία των μετρήσεων δεν είχαμε στην διάθεσή μας 2 σημεία για τις κεραίες που να έχουν ανεμπόδιστη επαφή μεταξύ τους. Οι δύο κεραίες στήθηκαν ανάμεσα σε δύο σημεία από τα οποία παρεμβάλεται ένα μεγάλο κτήριο που εμποδίζει την οπτική επαφή και πολλά μικρά που παρεμβάλλονται στην 1<sup>η</sup> ζώνη Fresnel. Για την περίπτωση αυτή η σωστότερη μέθοδος μελέτης της ραδιοκάλυψης θα ήταν το μοντέλο knife edge diffraction. Το μοντέλο όμως αυτό απαιτεί την γνώση των αποστάσεων και του ύψους του κάθε κτηρίου πράγμα αδύνατο στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

### **Μοντέλο OKUMURA HATA σε αστικό και ημιαστικό περιβάλλον**

Για την μελέτη της ραδιοκάλυψης θα χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο OKUMURA HATA που ανάλογα με τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται, δίνει την ραδιοκάλυψη για αγροτική, ημιαστική και περιοχή. Στην παρούσα εργασία θα εξετάσουμε την περίπτωση της αστικής και ημιαστικής περιοχής που παρουσιάζουν και μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι το μοντέλο OKUMURA HATA ισχύει για συχνότητες μέχρι 1500 MHz. Παρόλα αυτά εφαρμόζουμε το μοντέλο για να

έχουμε μία εικόνα της συμπεριφοράς του συστήματος σε αστική περιοχή. Ο τύπος του OKUMURA HATA για τις απώλειες είναι :

$$L_{OH} = A + B \log(d) + a(h_m)$$

Όπου  $A = 69,55 + 26,16 \log f - 13,82 \log h_b$

$$B = 44,9 - 6,55 \log h_b$$

Ημιαστική περιοχή:  $a(h_m) = (1,11 \log f - 0,7)h_m - (1,56 \log f - 0,8)$

Αστική περιοχή:  $a(h_m) = 3,2(\log(11,75h_m))^2 - 4,97$

Όπου το d είναι σε km, τα  $h_m$ ,  $h_b$  σε μέτρα και το f σε MHz.

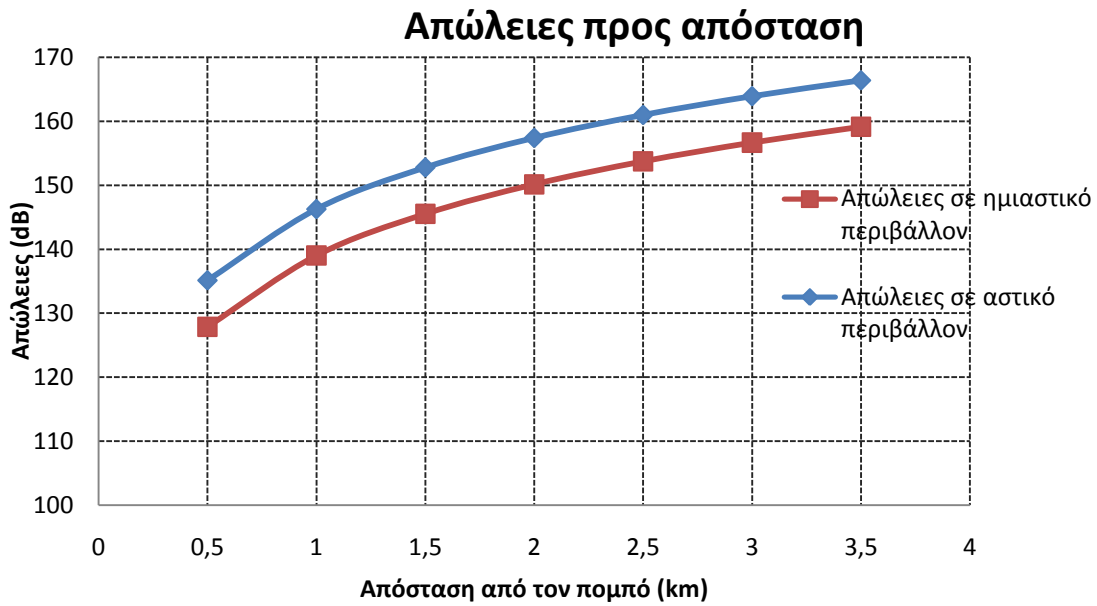
Με ύψος πομπού  $h_b=16m$  και δέκτη  $h_m=5m$  τα αποτελέσματα είναι  $A=151,3$ ,  $B=37,01$  και  $\alpha=12,3$  για ημιαστική περιοχή ενώ για αστική η τιμή του είναι  $\alpha=5,04$ . Τα αποτελέσματα για διάφορες αποστάσεις σε ημιαστική περιοχή φάνονται στον πίνακα 2.5 ενώ τα αντίστοιχα για αστική περιοχή στον πίνακα 2.6. Στα σχήματα 2.27 και 2.28 φάνονται τα διαγράμματα των απωλειών προς αποσταση και της ισχύος λήψης αντίστοιχα.

d(km)	f(MHz)	Απώλειες σε ημιαστική περιοχή(dB)	Rx (dBm)
0,5	5740	127,8588799	-84,85887986
1	5740	139	-96
1,5	5740	145,5171375	-102,5171375
2	5740	150,1411201	-107,1411201
2,5	5740	153,7277597	-110,7277597
3	5740	156,6582576	-113,6582576
3,5	5740	159,1359583	-116,1359583

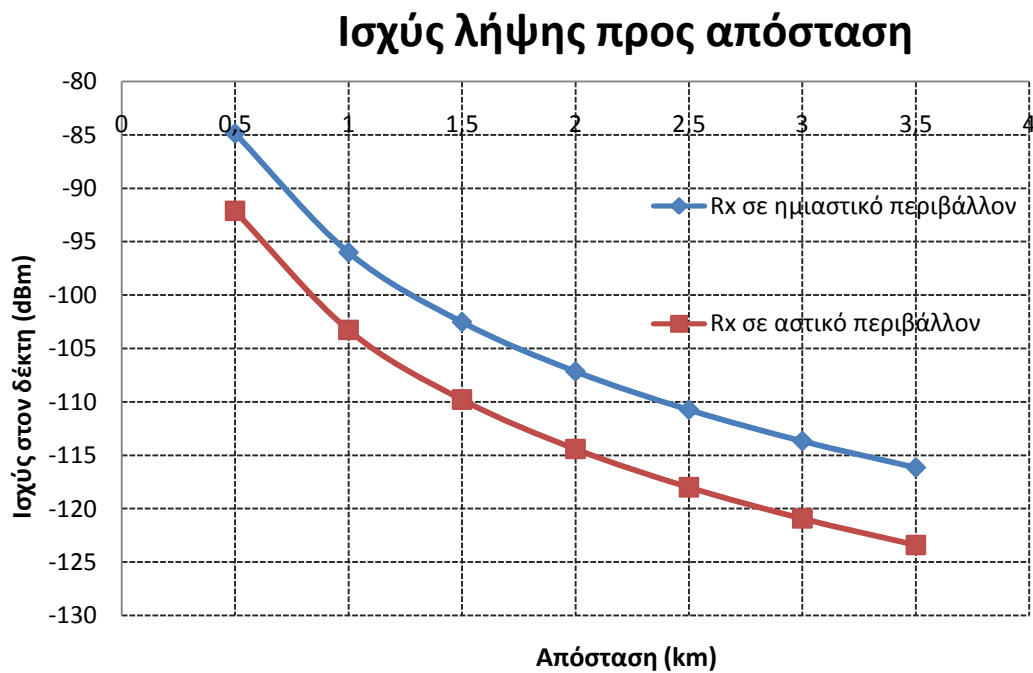
Πίνακας 2.5

d(km)	f(MHz)	Απώλειες σε αστική περιοχή(dB)	Rx (dBm)
0,5	5740	135,1188799	-92,11887986
1	5740	146,26	-103,26
1,5	5740	152,7771375	-109,7771375
2	5740	157,4011201	-114,4011201
2,5	5740	160,9877597	-117,9877597
3	5740	163,9182576	-120,9182576
3,5	5740	166,3959583	-123,3959583

Πίνακας 2.6



Σχήμα 2.27



Σχήμα 2.28

Από τα δύο παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανείς η διαφορά που παρουσιάζεται ανάμεσα στις δύο περιοχές. Σε ένα αστικό περιβάλλον οι δύο κεραιές δεν θα έκαναν επαφή ούτε σε απόσταση 500 μέτρα, εφόσον η ευαισθησία του δέκτη είναι  $-86\text{dBm}$  όπως φαίνεται από τα χαρακτηριστικά του συστήματος στον πίνακα 2.1. Για να έχουμε οριακή επαφή των δύο κεραιών θα έπρεπε η απόσταση μεταξύ τους να

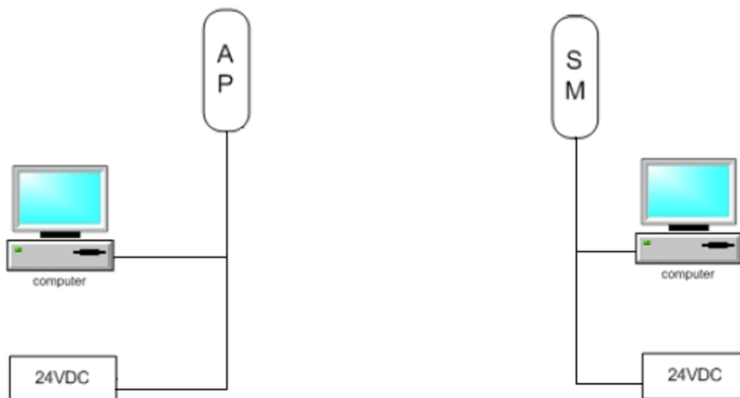
είναι μικρότερη από 350 μέτρα. Η εφαρμογή όμως του συστήματος για μία τόσο μικρή απόσταση και με οριακές τιμές είναι πρακτικά άχρηστη γιατί το σύστημα δεν προορίζεται για την κάλυψη τόσο μικρών περιοχών. Σε ημιαστικό περιβάλλον, παρατηρούμε ότι το μοντέλο δίνει σε απόσταση 500 μέτρα ισχύ λήψης  $-84,86\text{dBm}$ , που σημαίνει ότι οι δύο κεραιές κάνουν επαφή. Όμως, η τιμή αυτή δεν είναι ασφαλείς καθώς είναι πολύ κοντά στην ευαισθησία του δέκτη. Θεωρητικά η ραδιοκάλυψη σε ένα ημιαστικό περιβάλλον έχει ακτίνα 530 μέτρα, όπου η ισχύς λήψης στον δέκτη φτάνει τα  $-86\text{dBm}$ . Πρακτικά όμως πρέπει πάντα να διατηρείται μια απόσταση ασφαλείας έτσι ώστε να έχουμε καλή ποιότητα υπηρεσιών στους χρήστες.

## Κεφάλαιο 3

### Μετρήσεις

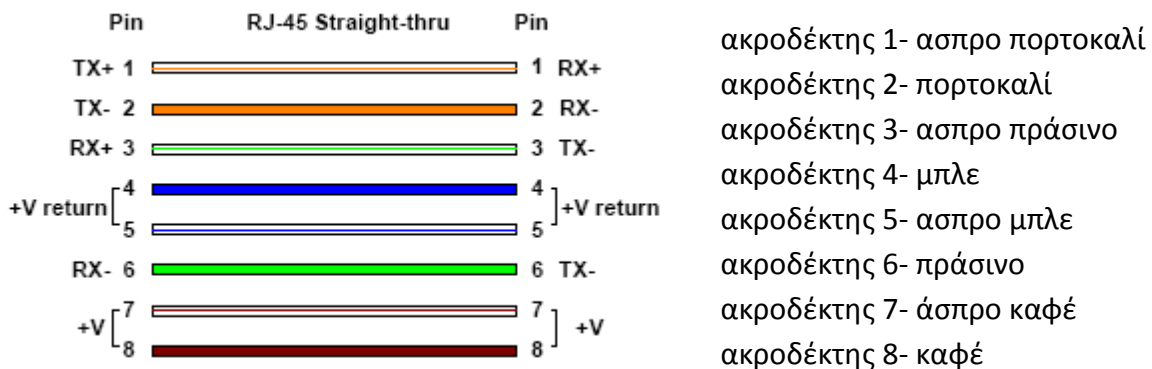
#### Διάταξη μετρήσεων

Για τη μέτρηση των παραμέτρων του συστήματος CANOPY απαιτείται η χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή καθώς το λογισμικό του συστήματος επιτρέπει την παρακολούθηση όλων των απαραίτητων τιμών.



Σχήμα 3.1

Το καλώδιο που χρησιμοποιείται είναι προστατευμένο καλώδιο εξωτερικών χώρων κατηγορίας 5 (shielded outdoor cable Cat5). Οι ακροδέκτες και από τις δύο πλευρές του καλωδίου είναι RJ45 (Ethernet) με 8 pin που εκτός από τα δεδομένα μεταφέρουν και τάση 24VDC για την λειτουργία της κεραίας. Η συνδεσμολογία του καλωδίου φαίνεται στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2

Παρατηρούμε ότι η τάση περνά από τους ακροδέκτες 7,8 και από τους 4,5 είναι η επιστροφή.

Η τροφοδοσία γίνεται από έναν μετασχηματιστή που συνδέεται στην πρίζα και δίνει στην έξοδο του 24 VDC. Για την σύνδεση του υπολογιστή απαιτείται να υπάρχει θύρα Ethernet και κάρτα δικτύου. Ο υπολογιστής αναγνωρίζει του δίκτυο που δημιουργείται σαν LAN.

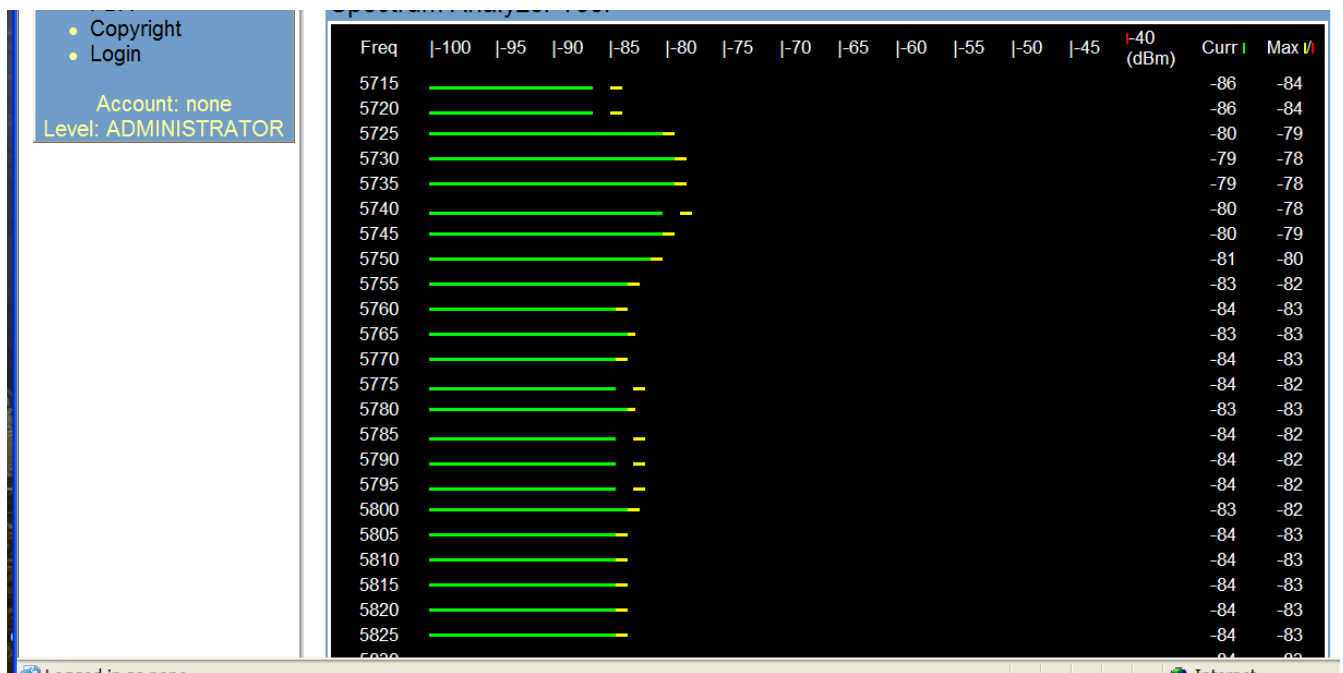
Για τις διεξαγωγή των μετρήσεων αρκεί ένας υπολογιστής στο SM ή στο AP. Εφόσον υπάρχει επαφή των δύο μονάδων υπάρχει και πρόσβαση από τη μία στην άλλη.

## Εργαλεία Μετρήσεων

### Spectrum Analyzer

Μέσω του λογισμικού του SM που χρησιμοποιείται δίνεται η δυνατότητα ενός είδους Spectrum analyzer που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Πρόσβαση σε αυτό έχουμε και από το AP εφόσον το SM έχει συνδεθεί με το AP.

Με τη χρήση αυτού του εργαλείου γίνεται σωστότερη ευθυγράμμιση του SM με το AP για βελτιστοποίηση της ζεύξης.



Σχήμα 3.3

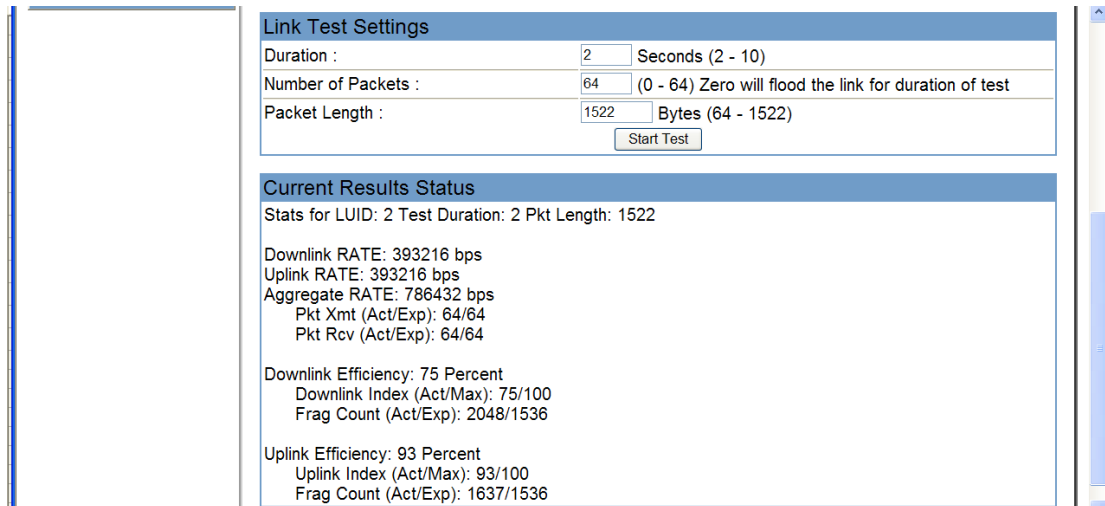
Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι οι κίτρινες γραμμές αναπαριστούν την μέγιστη τιμή που έχει επιτεφχθεί κατά την ζεύξη ενώ οι πράσινες είναι η τιμή εκείνη τη στιγμή της μέτρησης. Έτσι για παράδειγμα στην παραπάνω εικόνα φαίνεται στα 5740 MHz να έχουμε μέγιστη τιμή -78 dBm ενώ η τιμή εκείνη τη στιγμή ήταν -80 dBm.

### Έλεγχος χωρητικότητας Ζεύξης (Link Capacity Test)

Ο έλεγχος αυτό γίνεται για να εξακριβωθεί κάθε φορά η πραγματική χωρητικότητα του διαύλου και να συγκριθεί με την ονομαστική. Κατά τον έλεγχο αυτό ορίζεται η διάρκεια του ελέγχου από 2 ως 10 sec το πλήθος των πακέτων που στέλνονται από 2 ως 64 καθώς και το μήκος των πακέτων από 64 ως 1522. Το λογισμικό του συστήματος ως δεδομένα εξόδου μας δίνει τον ρυθμό για Downlink και Uplink καθώς και τον συνολικό ρυθμό μετάδοση σε bps. Επίσης μετρώνται τα πακέτα που

στέλνονται τα πακέτα που λαμβάνονται και η αποτελεσματικότητα της ζεύξης για downlink και uplink.

Ενδεικτικά στην οθόνη εμφανίζεται η παρακάτω εικόνα όπου κάθε φορά φαίνονται οι παράμετροι που έχουν καθοριστεί και τα αποτελέσματα κάθε φορά.



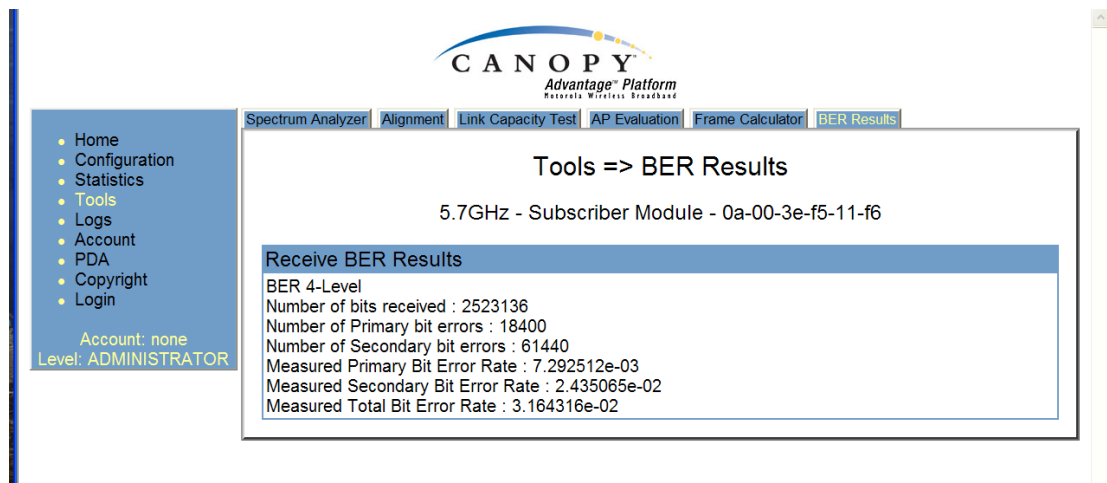
Σχήμα 3.4

Για παράδειγμα στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε ότι η διάρκεια του test έχει οριστεί στα 2 δευτερόλεπτα ότι θα σταλούν 64 πακέτα και ότι το μέγεθος του κάθε πακέτου θα είναι 1522 Bytes. Τα αποτελέσματα για αυτή τη μέτρηση είναι: ρυθμός μετάδοσης για την κάθοδο (downlink rate) 393216 bps και για την άνοδο (uplink rate) 393216 bps. Ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης (aggregate rate) είναι 786432 bps που είναι το άθροισμα της ανόδου και της καθόδου. Αμέσως μετά βλέπουμε τον αριθμό των πακέτων που στάλθηκαν και αυτών που αναμέναμε να σταλούν καθώς και των αντίστοιχων ληφθέντων. Στη συγκεκριμένη μέτρηση στάλθηκαν 64 πακέτα, που ήταν αναμενόμενο να σταλούν, και λάβαμε 64 πακέτα που ήταν παλι αναμενόμενο.

Οι παρακάτω μετρήσεις αφορούν την αποδοτικότητα της ζεύξης. Δηλαδή, στην μέτρηση που κάναμε φαίνεται ότι το downlink είχε απόδοση 75% ενώ η άνω ζεύξη είχε απόδοση 93%.

## Μέτρηση του BER

Το λογισμικό του συστήματος μας δίνει τη δυνατότητα μέτρησης του BER για τις συνολικές μεταδόσεις που γίνονται. Όπως φαίνεται στην παρακάτω οθόνη μετρώνται τα συνολικά bits που έχουν σταλεί, καθώς και τα bits που έχουν γίνει primary ή secondary σφάλματα. Τέλος υπολογίζεται το bit error rate για κάθε περίπτωση αλλά και συνολικά.



Σχήμα 3.5

Για παράδειγμα στο σχήμα 3.5 φαίνεται η μέτρηση που κάναμε κατά την διαδικασία των μετρήσεων. Έτσι βλέπουμε ότι ο δέκτης έχει λάβει 2523136 bits και έχουν εμφανιστεί 18400 πρωτεύοντα λάθη (primary bit errors) και 61440 δευτερεύοντα (secondary bit errors). Το BER που μετράται για τα πρωτεύοντα είναι  $7,292512e^{-3}$  και για τα δευτερεύοντα είναι  $2,435065e^{-2}$ . Το συνολικό είναι  $3,164316e^{-2}$ .

## Frame Calculator

Το λογισμικό του συστήματος παρέχει τη δυνατότητα μέτρησης των παραμέτρων του πλαισίου. Από τον χρήστη καθορίζεται το ποσοστό για το downlink καθώς και το πλήθος των χρονοσχημάτων που αφιερώνονται στα uplink acknowledgement, στα downlink acknowledgement και για τον έλεγχο (control slots). Τα control slots του συστήματος Canopy είναι τα μόνα slots ανταγωνισμού στο στρώμα μεταφοράς. Ακόμη υπάρχει η δυνατότητα να ρυθμιστούν το πλήθος των χρονοσχημάτων για high priority σε κάθε περίπτωση. Δίνονται τα συνολικά bits του πλαισίου και στη συνέχεια δύνονται στοιχεία που αφορούν την αποστολή και τη λήψη ξεχωριστά. Συγκεκριμένα δίνονται τα συνολικά overhead bits, τα slot των δεδομένων, η καθυστέρηση (πραγματική και μέγιστη) και η απόσταση (πραγματική και μέγιστη).



- Configuration
  - Statistics
  - Tools
  - Logs
  - Account
  - PDA
  - Copyright
  - Login
- Account: none  
Level: ADMINISTRATOR

## Tools =&gt; Frame Calculator

5.7GHz - Subscriber Module - 0a-00-3e-f5-11-f6

Frame Calculator Parameters	
Software Version Transmitter :	CANOPY7.2--Current
Software Version Receiver :	CANOPY7.2--Current
Transmit Sync Input :	Generate Sync Signal
Link Mode :	<input type="radio"/> Point-To-Point Link <input checked="" type="radio"/> Multipoint Link
AES, 2X Rate, Encryption Enabled :	<input type="radio"/> True <input checked="" type="radio"/> False
Max Range :	2 Miles (Range: 1- 30 miles)
Air Delay :	0 bits
Scheduling :	<input type="radio"/> Hardware <input checked="" type="radio"/> Software
Mobility :	<input type="radio"/> On <input checked="" type="radio"/> Off
Wireless/Wired :	<input checked="" type="radio"/> Wireless Link <input type="radio"/> Wired Link
Platform Type Transmitter :	P10
Platform Type Receiver :	P10
Frequency Band :	5.7GHz
External Bus Frequency Transmitter :	40
External Bus Frequency Receiver :	40
Downlink Data :	75 %
High Priority Uplink Percentage :	0 %
Total Number UACK Slots :	3 (Range: 1--7)
Number High :	0
Number DACK Slots :	3 (Range: 1--7)
Number High :	0
Number Control Slots :	3 (Range: 1-- 16 )
Number High :	0
<input type="button" value="Apply Settings"/> <input type="button" value="Calculate"/>	

Calculated Frame Results
Total Frame Bits : 25000
<b>Transmit Details :</b>
Total Frame Overhead Bits : 4530
Data Slots (Down/UpLow/UpHigh) : 25/8/0
AirDelay (Actual/MaxRange) : 0/216
Approximate distance (Actual/MaxRange) : 0.00 miles (0 feet) / 2.00 miles (10584 feet)
<b>Receive Details :</b>
Total Frame Overhead Bits : 4530
Data Slots (Down/UpLow/UpHigh) : 25/8/0
AirDelay (Actual/MaxRange) : 0/216
Approximate distance (Actual/MaxRange) : 0.00 miles (0 feet) / 2.00 miles (10584 feet)

Σχήμα 3.6

Στην εικόνα 3.6 φαίνονται οι ρυθμίσεις και τα αποτελέσματα για μία μέτρηση. Αρχικά επιλέγονται ρυθμίσεις που αφορούν το σύστημα γενικότερα, όπως για παράδειγμα η έκδοση του λογισμικού του συστήματος, το είδος της ζεύξης (Point-to-point ή multipoint link), η ενεργοποίηση της κρυπτογράφησης, η μέγιστη εμβέλεια, το scheduling, η φορητότητα και η επιλογή για ενσύρματη ή ασύρματη ζεύξη. Έμεις, όπως φαίνεται στην εικόνα έχουμε επιλέξει την έκδοση Canopy 7.2 αφού αυτή είχαν οι πομποδέκτες που χρησιμοποιήθηκαν, ζεύξη multipoint, χωρίς κρυπτογράφηση, μέγιστη εμβέλεια τα 2 μίλια, scheduling software, απενεργοποιημένη φορητότητα και ασύρματη ζεύξη. Επίσης έχουμε επιλέξει την μπάντα συχνοτήτων στα 5,7 GHz .Ακόμη, επιλέχθηκε το ποσοστό Downlink προς uplink 75%. Τα συνολικά UACK slots, DACK slots, control slots είναι 3 κάθε φορά.

Τέλος έχει γίνει η επιλογή σε αυτή την περίπτωση να μην υπάρχουν καθόλου high priority slots.

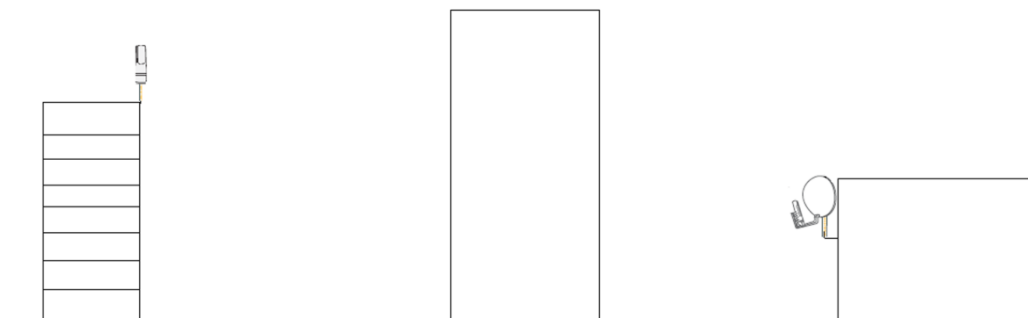
Στα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι τα συνολικά bits του πλαισίου είναι 25000, ενώ σχετικά με τις λεπτομέρειες της εκπομπής παρατηρούμε ότι τα συνολικά bits επικεφαλίδας (overhead bits) είναι 2530, ενώ για τα δεδομένα αφιερώνονται 25 slots για downlink, 8 slots για uplink low priority και 0 slots για uplink high priority. Επίσης σχετικά με τα στοιχεία που δύνονται για το air delay βλέπουμε ότι η πραγματική είναι μηδενική ενώ η μέγιστη είναι 216 και η απόσταση είναι 0 μίλια ενώ η μέγιστη είναι 2 μίλια. Το air delay το εισάγει το σύστημα για να αποφευχουν οι συγκρούσεις ανάμεσα στα πακέτα που στέλνονται και αυτά που λαμβάνονται και είναι ανάλογη της μέγιστης απόστασης (max range).

## Περιβάλλον

Για την διεξαγωγή των μετρήσεων τοποθετήθηκε ένα AP στην ταράτσα οικοδομής. Το SM τοποθετήθηκε στο παράθυρο κτηρίου σε απόσταση 511 μέτρα. Η οπτική επαφή δεν ήταν δυνατή καθώς υπήρχε κτήριο που εμπόδιζε την LOS ζεύξη. Επίσης το περιβάλλον των μετρήσεων είναι αστικό με υψηλά κτήρια και μεταβλητό καθώς ανάμεσα στις δύο μονάδες υπάρχει μεγάλη λεωφόρος με συνεχή κίνηση, ενώ στην περιοχή υπάρχουν αρκετά κτήρια με γυάλινες επιφάνειες.

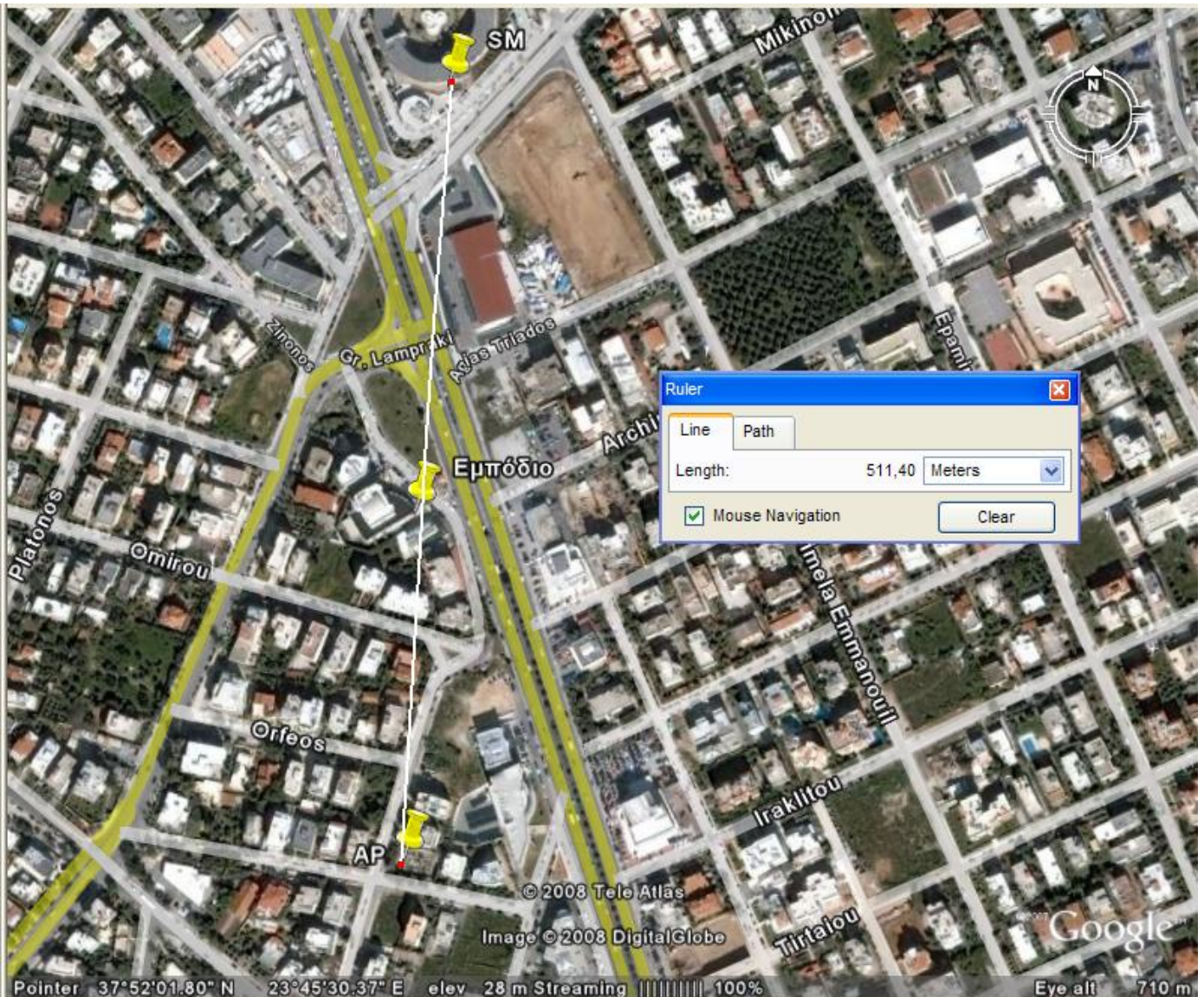
Λόγω του μεγάλου κτηρίου που εμπόδιζε την οπτική επαφή αλλά και του περιβάλλοντος η εξασθένιση ήταν ιδιαίτερα υψηλή με αποτέλεσμα παρά την εγγύτητα να μην γίνει επαφή. Έτσι χρησιμοποιήθηκε παθητικό παραβολικό κάτοπτρο στο SM για την αύξηση της ισχύος. Η επαφή πλέον ήταν εφικτή αφού η ισχύς του σήματος ήταν μεγαλύτερη από την ευαισθησία του δέκτη των δύο κεραιών.

Η διάταξη φαίνεται στο σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7

Στην εικόνα που πήραμε από το google earth φαίνεται η διάταξη των κτηρίων καθώς και η ακριβείς απόσταση των δύο μονάδων. Οστόσο δεν είναι εφικτό να διαπιστωθεί το ύψος των κτηρίων το οποίο ορίζουμε εμπειρικά.



Σχήμα 3.8

## Διαδικασία Μετρήσεων

### Διαδικασία Ευθυγράμμισης του SM με το AP

Υπάρχουν δύο μέθοδοι για την ευθυγράμμιση του SM με το AP. Ο ένας τρόπος είναι παρατηρώντας το επίπεδο ισχύος (dBm) και το Jitter στο SM καθώς το μετακινούμε ελαφρά μέχρι να πετύχουμε τις καλύτερες τιμές. Ο δεύτερος τρόπος είναι με τη χρήση του Positioning tone. Απαιτείται η χρήση ενός ειδικού καλωδίου και



ακουστικών ή μεγαφώνου και ανάλογα με τον ήχο που αλλάζει κατά την μετακίνηση επιλέγεται η καλύτερη θέση.

Για την εγκατάσταση που κάναμε για τις ανάγκες της εργασίας εφαρμόσαμε την πρώτη μέθοδο:

1. Αρχικά τοποθετήσαμε το SM έτσι ώστε είναι προς την κατεύθυνση του AP. Πρέπει να σημειωθεί ότι το εύρος της κεραίας είναι 60° οριζόντιο και αζυμουθιακό χωρίς την χρήση παραβολικού κατόπτρου. Με την χρήση ενός παθητικού παραβολικού κατόπτρου το εύρος της κεραίας είναι 6°.
2. Το SM όταν ενεργοποιείται ξεκινά και την διαδικασία για να καταχωρηθεί στο AP. Τα βήματα αυτής της διαδικασίας είναι: σάρωση του χώρου για το σήμα (scanning), συγχρονισμός με το AP (syncing), καταχώρηση (registering), καταχωρημένο (registered).
3. Δεν είναι εφικτή η γνώση του επιπέδου ισχύος και του Jitter αν δεν γίνει καταχώρηση.

Παρατηρούμε το Jitter και το επίπεδο ισχύος στη σελίδα που δείχνει την κατάσταση του SM (Status page). Από τις προδιαγραφές, για το Jitter θεωρείται κατάλληλη μία τιμή κάτω από 4, με το 1 να είναι το καλύτερο. Η τιμή αυτή αντιπροσωπεύει την ποιότητα της ζεύξης.

Το επίπεδο ισχύος εξαρτάται από την ευαισθησία του δέκτη. Δηλαδή στη περίπτωση του εξοπλισμού που χρησιμοποιήσαμε, η ευαισθησία είναι στα -86dBm και άρα το επίπεδο πρέπει να είναι οπωσδήποτε μεγαλύτερο του για την επίτευξη της ζεύξης. Βέβαια η τιμή του δεν πρέπει να περνά οριακά αυτή της ευαισθησίας αλλά να υπάρχει μία απόσταση ασφαλείας.

4. Αφού συνδεθεί και καταχωρηθεί το SM με το AP, αλλάζουμε αργά την θέση του SM, οριζόντια και κάθετα μέχρι να βρούμε το μέγιστο για το επίπεδο ισχύος και το ελάχιστο για το Jitter.
5. Μετά το τέλος της διαδικασίας είναι χρήσιμο να εφαρμόσουμε ένα link test για να ελεγχθεί η απόδοση της ζεύξης.

## Διαδικασία ρύθμισης του SM και του AP.

Η διαδικασία ρύθμισης του SM και του AP γίνεται με την χρήση ενός υπολογιστή μέσω του λογισμικού του συστήματος. Το πρόγραμμα ανοίγει με έναν απλό web browser όπως είναι ο Internet Explorer. Για όλες τις συσκευές είναι εργοστασιακά ρυθμισμένη η διεύθυνση IP 169.254.1.1. Κατά την διαδικασία ρύθμισης των μονάδων είναι απαραίτητο να αλλαχθεί η διεύθυνση αυτή καθώς μια συνωνυμία συσκευών προκαλεί σύγχυση. Η διαδικασία της ρύθμισης των συσκευών μπορεί να γίνει κατά την εγκατάσταση του συστήματος, αλλά για πρακτικούς λόγους είναι σωστότερο να γίνει στο εργαστήριο όταν οι δύο μονάδες βρίσκονται σίγορα σε

επαφή. Θα περιγράψουμε ξεχωριστά την ρύθμιση του AP και την ρύθμιση του SM καθώς παρουσιάζουν διαφορές.

Για την ρύθμιση του AP:

Η πρώτη σελίδα που εμφανίζεται όταν ανοίγουμε το Internet Explorer και βάζουμε την default IP διεύθυνση 169.254.1.1 είναι η κεντρική σελίδα και είναι αυτή που μας δείχνει τη γενική κατάσταση της συσκευής όπως φαίνεται στην εικόνα 3.9 και 3.10. Σε αυτή τη σελίδα δεν αλλάζουν οι ρυθμίσεις της συσκευής αλλά μπορεί ο χειριστής να δει τις ήδη υπάρχουσες ρυθμίσεις.

The screenshot shows a web interface for an Access Point. On the left is a navigation menu with options: Home, Configuration, Statistics, Tools, Account, Quick Start, Copyright, and Login. Below the menu, it says 'Account: none' and 'Level: ADMINISTRATOR'. The main content area has tabs for 'General Status', 'Session Status', 'Remote Subscribers', 'Event Log', and 'Network Interface'. The title is 'Home => General Status' and the device is identified as '5.2GHz - Access Point - 0a-00-3e-01-09-a3'.

Device Information	
Device Type :	5.2GHz - Access Point - 0a-00-3e-01-09-a3
Software Version :	CANOPY 8.1 (Build 35) AP-DES
Software BOOT Version :	CANOPYBOOT 3.0
Board Type :	P9
FPGA Version :	041006
Uptime :	00:08:11
System Time :	00:44:31 01/01/2001
Last NTP Time Update :	00:00:00 00/00/0000
Ethernet Interface :	10Base-T Full Duplex

Access Point Stats	
Registered SM Count :	4
GPS Sync Pulse Status :	Generating Sync

Site Information	
Site Name :	5.2 DES-AP Test Location 1
Site Contact :	John W.
Site Location :	Test Lab

Key Features Information	
Scheduling Type :	Hardware
MP Double Rate :	Enable

Σχήμα 3.9

Στον πρώτο πίνακα εμφανίζονται τα γενικά στοιχεία της συσκευής όπως ο τύπος, η έκδοση του λογισμικού, η ώρα, η τελευταία αναβάθμιση κ.α. Στόν δεύτερο πίνακα φαίνονται τα γενικά στατιστικά στοιχεία που αφορούν το πλήθος των συνδεδεμένων SM και την κατάσταση του συγχρονισμού του GPS. Στον τρίτο πίνακα εμφανίζονται στοιχεία που αφορούν τη θέση της συσκευής όπως την έχει ονομάσει ο χειριστής και στον τέταρτο πίνακα φαίνονται στοιχεία που αφορούν τις ρυθμίσεις που έχουν γίνει σχετικά με το scheduling και την ενεργοποίηση του διπλού ρυθμού μετάδοσης.

Έαν επιλέξουμε να δούμε το session status εμφανίζεται η σελίδα που φαίνεται στην εικόνα 4.

**CANOPY**  
Advantage Platform  
Access Point Web Interface

General Status | **Session Status** | Remote Subscribers | Event Log

Home => Session Status

5.7GHz - Access Point - 0a-00-3e-f1-36-82

**Session Status List**

**LUID: 002** - MAC: 0a-00-3e-f1-36-84 State: IN SESSION (Encrypt Active)  
 Site Name : Acme Insurance Co., 3130 Main Street  
 Software Version : CANOPY 6.0 (Build 11) Jan 27 2006 14:51:43  
 Software Boot Version : CANOPYBOOT 3.0  
 FPGA Version : 092105 (DES Sched) P9  
 Session Timeout: 0, AirDelay 4 (approximately 0.04 miles (196 feet))  
 Session Count: 1, Reg Count 1, Re-Reg Count 0  
 RSSI (AvgLast): 814/812 Jitter (AvgLast): 2/3 Power Level (AvgLast): -73/-73  
 Sustained Uplink Data Rate (SM): 20000 (kbit)  
 Uplink Burst Allocation (SM): 500000 (kbit)  
 Sustained Downlink Data Rate (SM): 20000 (kbit)  
 Downlink Burst Allocation (SM): 500000 (kbit)  
 Low Priority Uplink CIR (SM): 0 (kbps) Low Priority Downlink CIR (SM): 0 (kbps)  
 Rate : VC 18 Rate 2X/2X

**LUID: 003** - MAC: 0a-00-3e-f1-ba-43 State: IN SESSION (Encrypt Active)  
 Site Name : Garcia, 5210 Ginkgo Court  
 Software Version : CANOPY 6.0 (Build 11) Jan 27 2006 14:51:43  
 Software Boot Version : CANOPYBOOT 3.0  
 FPGA Version : 092105 (DES Sched) P9  
 Session Timeout: 0, AirDelay 4 (approximately 0.04 miles (196 feet))  
 Session Count: 1, Reg Count 1, Re-Reg Count 0  
 RSSI (AvgLast): 1289/1285 Jitter (AvgLast): 2/1 Power Level (AvgLast): -56/-56  
 Sustained Uplink Data Rate (SM): 3500 (kbit)  
 Uplink Burst Allocation (SM): 500000 (kbit)  
 Sustained Downlink Data Rate (SM): 3500 (kbit)  
 Downlink Burst Allocation (SM): 500000 (kbit)  
 Low Priority Uplink CIR (SM): 0 (kbps) Low Priority Downlink CIR (SM): 0 (kbps)  
 Rate : VC 19 Rate 2X/2X

**LUID: 004** - MAC: 0a-00-3e-f0-25-08 State: IN SESSION (Encrypt Active)  
 Site Name : Smith, 2210 Banyan Tree Terrace  
 Software Version : CANOPY 6.0 (Build 11) Jan 27 2006 14:51:43  
 Software Boot Version : CANOPYBOOT 3.0

Account: admin  
Level: ADMINISTRATOR

Εικόνα 3.10

Σε αυτή τη σελίδα εμφανίζονται τα SM που είναι συνδεδεμένα στο AP με στοιχεία σχετικά με την τοποθεσία και τη έκδοση του λογισμικού που χρησιμοποιούν αλλά και πληροφορίες για την ζεύξη όπως το RSSI, το Jitter, το επίπεδο έντασης και ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων uplink και downlink. Από αυτή τη σελίδα μπορούμε να επιλέξουμε ένα SM και να μπούμε στη σελίδα όπως θα περιγραφεί αργότερα.

Για την αλλαγή των ρυθμίσεων επιλέγεται η σελίδα Configuration. Αρχικά εμφανίζεται η σελίδα των γενικών ρυθμίσεων όπως φαίνεται στην εικόνα 3.11.

Configuration => General

5.2GHz - Access Point - 0a-00-3e-01-09-a3

1 **Device Type**  
Device Setting :  AP  
 SM

2 **Link Speeds**  
Link Speeds :  10 Base T Half Duplex  
 10 Base T Full Duplex  
 100 Base T Half Duplex  
 100 Base T Full Duplex  
*Multiple selections enable Auto Negotiation*

**Bandwidth Configuration Source**  
Configuration Source : SM

3 **Sync Setting**  
Sync Input : Generate Sync Signal

4 **Web Page Configuration**  
Webpage Auto Update : 15 Seconds (0 = Disable Auto Update)

**Bridge Configuration**  
Bridge Entry Timeout : 25 Minutes (Range : 25 -- 1440 Minutes)  
Translation Bridging :  Enabled  
 Disabled  
Send Untranslated ARP :  Enabled  
 Disabled  
SM Isolation : Disable SM Isolation

**Update Application Information**  
Update Application Address : 10.40.0.14

5 **MAC Control Parameters**  
2X Rate :  Enabled  
 Disabled

**TCP Settings**  
Prioritize TCP ACK :  Enabled  
 Disabled

6 Save Changes  
Reboot

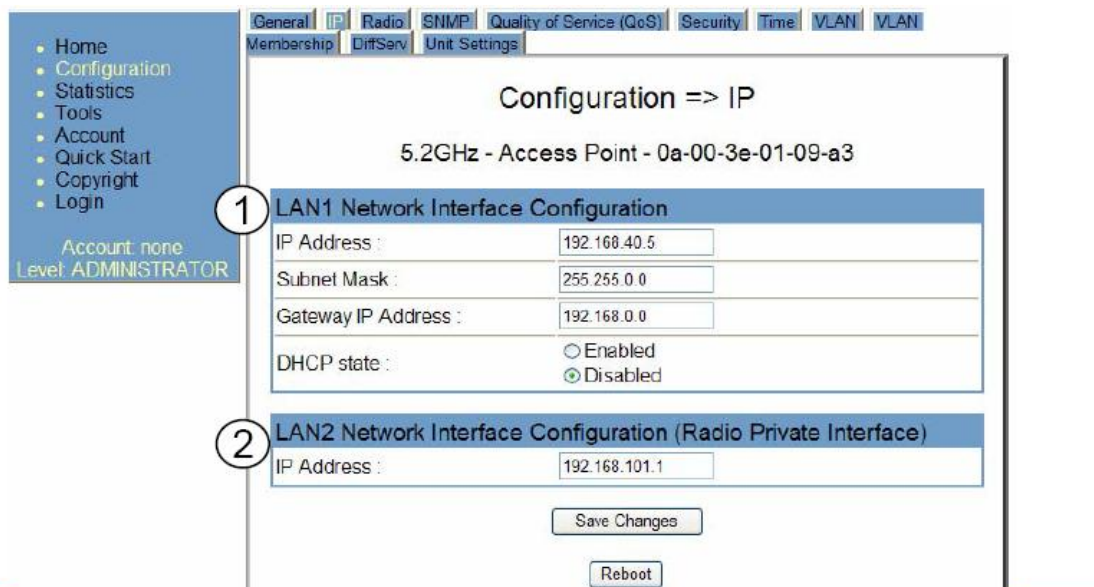
Σχήμα 3.11

1. Κάθε AP μπορεί να μετατραπεί σε SM με αυτή την επιλογή στο λογισμικό.
2. Επιλέγεται η ταχύτητα της ζεύξης. Είναι απαραίτητο να γίνει η ίδια ρύθμιση και στα δύο άκρα της ζεύξης αλλιώς δεν θα λειτουργήσει.
3. Για το συγχρονισμό μπορούν να επιλεγθούν 3 τρόποι. Από το power port της συσκευής όταν συνδέεται με CMMmicro, μονάδα που χρησιμοποιείται όταν έχουμε πολλά AP, από το timing port όταν συνδέεται με το CMM ή με

κάποιο άλλο AP ή SM, ή παράγοντας το ίδιο το AP ένα παλμό συγχρονισμού. Η τρίτη επιλογή γίνεται όταν έχουμε μόνο ένα AP στο σύστημα. Αυτό στέλνει τον παλμό συγχρονισμού σε όλα τα SM που είναι συνδεδεμένα σε αυτό έτσι ώστε να μην δημιουργούνται συγκρούσεις.

4. Επιλέγεται η συχνότητα ανανέωσης της σελίδας έτσι ώστε να ανανεώνονται τα δεδομένα της ζεύξης σε τακτά χρονικά διαστήματα.
5. Ο χειριστής μπορεί να ενεργοποιήσει την 2X λειτουργία. Αυτό σημαίνει ότι η μεταφορά δεδομένων θα γίνεται με διπλάσια ταχύτητα όταν αυτό επιτρέπεται από την συσκευή.
6. Κάθε φορά που αλλάζουν οι παράμετροι ο χρήστης πρέπει να σώζει τις αλλαγές και μετά να κάνει επανεκκίνηση της συσκευής.

Η επόμενη σελίδα που εμφανίζεται είναι αυτή που αφορά τις IP ρυθμίσεις και φαίνεται στην εικόνα 6.

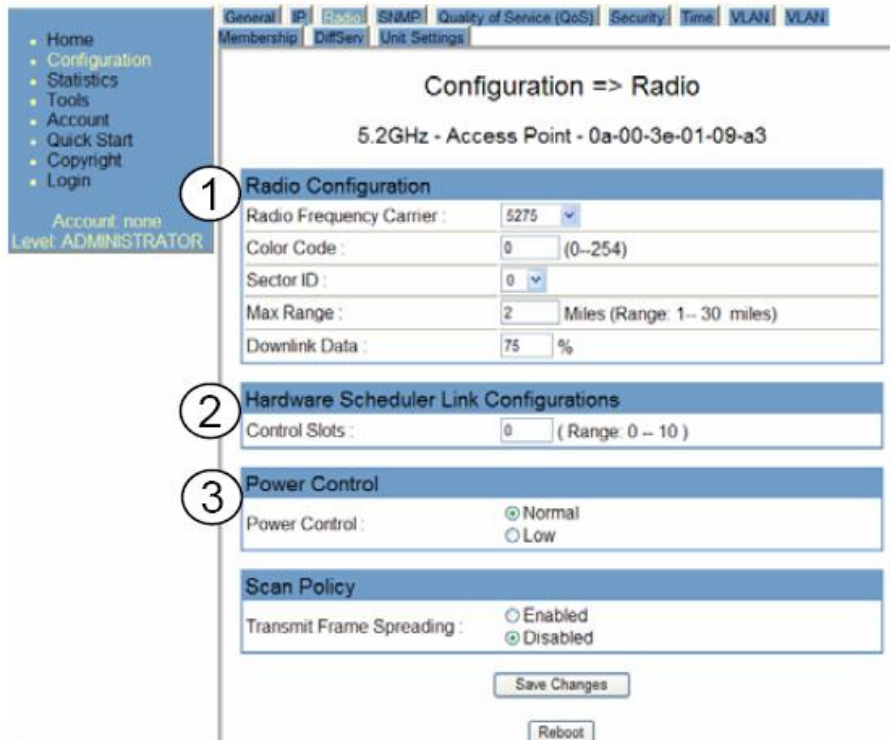


Σχήμα 3.12

1. Στο LAN 1 επιλέγουμε διευθύνσεις τοπικού δικτύου όπως σε κάθε LAN. Πρέπει να επιλέχθει και το κατάλληλο Subnet Mask και Gateway IP Address όπως φαίνεται στην εικόνα.
2. Στο LAN 2 εισάγεται η διεύθυνση που χρησιμοποιεί το AP για την επικοινωνία του με το SM και μόνο. Από το κατασκευαστεί συνιστάται να μην αλλάζεται.

Η επόμενη σελίδα που εμφανίζεται είναι αυτή που αφορά τις ρυθμίσεις της ασύρματης εκπομπής και λήψης (radio configuration).





Σχήμα 3.13

1. Επιλέγεται το κανάλι στο οποίο θα γίνει η επικοινωνία, το color code που είναι μια ρύθμιση που πρέπει να είναι ίδια για όλες τις συσκευές που επικοινωνούν και είναι ένα είδος ασφάλειας. Ακόμη μπορεί να εισαχθεί ένα ID για τον τομέα, κάτι που αφορά τον χειριστή και δεν επηρεάζει τα συνδεδεμένα SM. Επιλέγεται επίσης η μέγιστη ακτίνα που ορίζει στην ουσία την καθυστέρηση του συστήματος και πρέπει να επιλέγεται η απόσταση του πιο απομακρυσμένου SM, αλλά ποτέ μεγαλύτερη καθώς κατ'έτσι θα εισάγει καθυστέρηση πέραν της απαραίτητης. Τέλος επιλέγεται και το ποσοστό του downlink ως προς το uplink που εργοστασιακά είναι ρυθμισμένο στο 75%.
2. Ο δεύτερος πίνακας αυτής της σελίδας αφορά το πλήθος των control slots στην περίπτωση που έχουμε Hardware scheduling και εξαρτάται από το πλήθος των συνδεδεμένων SM. Εμείς χρησιμοποιήσαμε όμως Software Scheduling οπότε το κομμάτι αυτό δεν μας αφορά.
3. Στον τρίτο πίνακα επιλέγουμε την ένταση του σήματος που εκπέμπεται. Έχουμε δύο επιλογές για κανονικό ή χαμηλό επίπεδο. Εμείς επιλέγουμε υψηλό για να έχουμε μεγαλύτερες πιθανότητες να έχουμε ζεύξη. Μία επιλογή για χαμηλή ισχύ μπορεί να γίνει αν το απαιτούν οι τοπικοί κανονισμοί της περιοχής ή αν το AP μας παρεμβάλεται σε κάποιο γειτονικό.

Για την ρύθμιση του SM:

Η πρώτη σελίδα που εμφανίζεται όταν ανοίγουμε το Internet Explorer και βάζουμε την default IP διεύθυνση 169.254.1.1 είναι η κεντρική σελίδα και είναι αυτή που μας δείχνει τη γενική κατάσταση της συσκευής όπως φαίνεται στην εικόνα 8 και 9. Σε αυτή τη σελίδα δεν αλλάζουν οι ρυθμίσεις της συσκευής αλλά μπορεί ο χειριστής να δει τις ήδη υπάρχουσες ρυθμίσεις.

Home => General Status	
5.2GHz - Subscriber Module - 0a-00-3e-01-a5-48	
<b>1 Device Information</b>	
Device Type :	5.2GHz - Subscriber Module - 0a-00-3e-01-a5-48
Software Version :	CANOPY 8.1 (Build 35) SM-DES
Software BOOT Version :	CANOPYBOOT 3.0
Board Type :	P9
FPGA Version :	041006
Uptime :	00:02:14
System Time :	00:02:12 01/01/2001
Ethernet Interface :	10Base-T Full Duplex
<b>2 Subscriber Module Stats</b>	
Session Status :	REGISTERED VC 20 Rate 2X/2X
Registered AP :	0a-00-3e-01-09-a3
RSSI :	2190
Power Level :	-65 dBm
Jitter :	5
Air Delay :	4 approximately 0.5 miles (2600 feet)
<b>3 Site Information</b>	
Site Name :	5.2 DES SM - Test Location 1
Site Contact :	John W.
Site Location :	Test Lab 1
<b>4 Key Features Information</b>	
Maximum Throughput :	7 Mbps Aggregate
MP Double Rate :	Enable

Σχήμα 3.14

1. Στον πρώτο πίνακα εμφανίζονται τα γενικά στοιχεία της συσκευής όπως ο τύπος, η έκδοση του λογισμικού, η ώρα, η τελευταία αναβάθμιση κ.α.
2. Στόν δεύτερο πίνακα φαίνονται τα γενικά στοιχεία που αφορούν την κατάσταση του SM το AP στο οποίο έχει συνδεθεί το RSSI, το Jitter, το επίπεδο της ισχύος αλλά και την καθυστέρηση.
3. Στον τρίτο πίνακα εμφανίζονται στοιχεία που αφορούν τη θέση της συσκευής όπως αυτή έχει οριστεί από τον χειριστή του συστήματος.
4. Στον τέταρτο πίνακα φαίνονται στοιχεία που αφορούν τον μέγιστο throughput και το αν έχει ενεργοποιηθεί ο διπλάσιος ρυθμός μετάδοσης που είναι διαθέσιμος μόνο στην advantage έκδοση του συστήματος.

Όπως και στο AP η σελίδα αυτή δεν επιτρέπει στο χειριστή να αλλάξει τις ρυθμίσεις αλλά μόνο να δει τις ήδη υπάρχουσες.

Η επόμενη σελίδα που επιλέγουμε είναι αυτή των ρυθμίσεων (configuration). Αρχικά βλέπουμε την σελίδα των γενικών ρυθμίσεων όπως και στο AP.

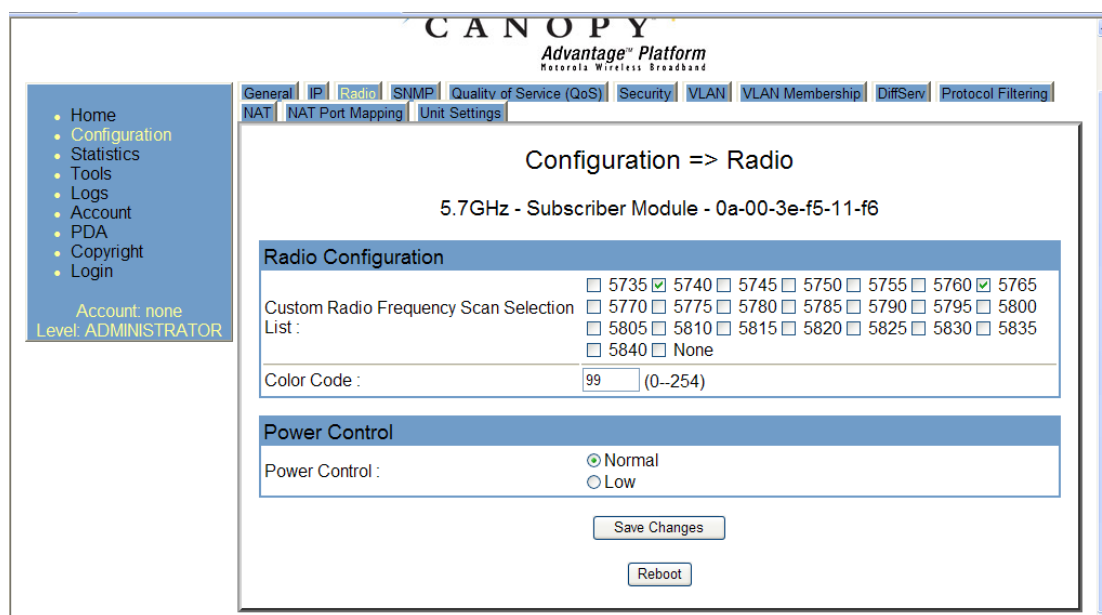
The screenshot displays the configuration interface for a Subscriber Module (SM). The main title is "Configuration => General" for a 5.2GHz SM with MAC address 0a-00-3e-01-a5-48. The interface is divided into three numbered sections:

- 1. Link Speeds:** This section allows configuration of link speeds. The "Link Speeds" field is set to "Multiple selections enable Auto Negotiation". The "Ethernet Link Enable/Disable" is set to "Enabled".
- 2. MAC Control Parameters:** This section configures MAC-related parameters. The "SM Power Up Mode With No 802.3 Link" is set to "Power up in Operational Mode". The "2X Rate" is set to "Enabled".
- 3. Frame Timing:** This section configures frame timing. The "Frame Timing Pulse Gated" is set to "Enable (If SM out of sync then do not propagate the frame timing pulse)".

At the bottom of the configuration page, there are two buttons: "Save Changes" and "Reboot".

Σχήμα 3.15

1. Στον πρώτο πίνακα φαίνονται οι επιλογές που πρέπει αν γίνουν σχετικά με τη ταχύτητα της ζεύξης. Είναι απαραίτητο οι επιλογές που θα γίνουν στο SM να είναι ίδιες με αυτές που έχουν γίνει στο AP. Ακόμη επιλέγεται αν θα είναι ενεργοποιημένη ή όχι η Ethernet θύρα του SM.
2. Στο δεύτερο πίνακα γίνονται οι επιλογές για τις παραμέτρους του MAC. Επιλέγεται δηλαδή αν θα είναι σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας ή aiming. Το aiming mode επιλέγεται όταν το SM προσπαθεί να καταχωρηθεί στο AP. Επίσης επιλέγεται και αν θα ενεργοποιηθεί ο διπλάσιος ρυθμός μετάδοσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η επιλογή έχει νόημα μόνο για τις εκδόσεις του συστήματος που το επιτρέπουν όπως είναι οι advantage εκδόσεις.
3. Τέλος στον τρίτο πίνακα επιλέγουμε αν το SM θα στέλνει το παλμό συγχρονισμού και σε άλλες συσκευές.



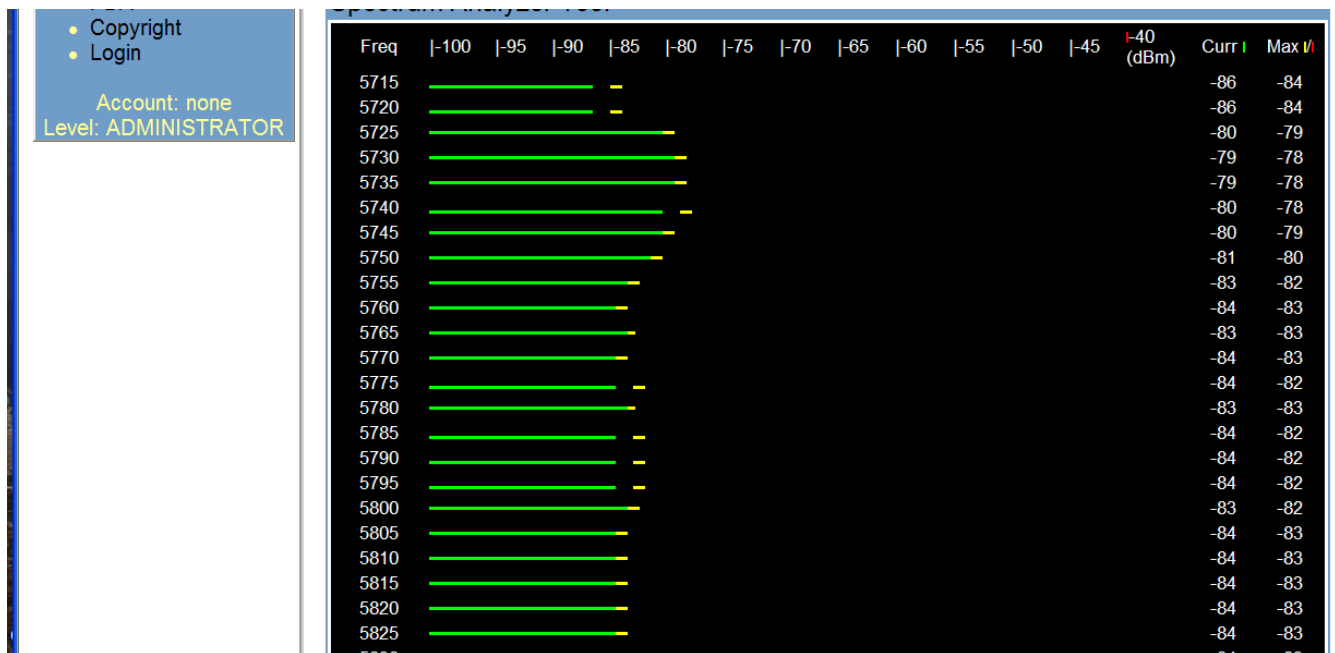
Σχήμα 3.16

Αυτές είναι οι ρυθμίσεις που πρέπει να κάνουμε για την σύνδεση των δύο μονάδων και την λήψη μετρήσεων. Υπάρχουν ακόμη πολλές ρυθμίσεις που μπορούν να γίνουν αλλά δεν θα εξεταστούν στην παρούσα εργασία.

## Μετρήσεις

### 1. Spectrum Analyzer

Όπως αναφέραμε επιλέξαμε το κανάλι 5740 MHz για τις μετρήσεις μας. Παρατηρήθηκε στο Spectrum Analyzer του σχήματος 3.17 ότι στα 5740 MHz έχουμε μέγιστη ισχύ τα -78dBm. Παρόλα αυτά λόγω του συνεχώς μεταβαλλόμενου περιβάλλοντος δεν κατέσκει δυνατό να επαναληφθή αυτή η τιμή και οι μετρήσεις έγιναν με ισχύ σήματος περίπου -80 dBm. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια των μετρήσεων η τιμή αυτή μεταβαλλόταν χωρίς όμως να ξεφεύγει από το διάστημα -78 ως -81dBm. Η τιμή αυτή επιτρέπει την επικοινωνία των δύο μονάδων καθώς η ευαισθησία των κεραίων είναι -86dBm.



Σχήμα 3.17

## 2. Link Capacity

### Μέτρηση χωρητικότητας ζεύξης

Μέσα από το λογισμικό του συστήματος δίνεται η δυνατότητα να μετρηθεί η χωρητικότητα της ζεύξης. Έτσι ρυθμίζοντας την διάρκεια του τεστ, το πλήθος και το μέγεθος των πακέτων που θα κατακλίσουν τον δίαυλο, δίνονται κάθε φορά οι τιμές της χωρητικότητας του διαύλου αλλά και η απόδοση του. Όπως έχει σημειωθεί η χωρητικότητα του διαύλου εξαρτάται από το ποσοστό του downlink, την μέγιστη απόσταση αλλά και το περιβάλλον. Για τους σκοπούς της εργασίας έγιναν μετρήσεις μεταβάλλοντας το ποσοστό του downlink και η μέγιστη εμβέλεια (max range).

Στον πίνακα 3.1 φαίνονται οι μετρήσεις που σε εργαστηριακό περιβάλλον με τις δύο μονάδες να απέχουν μέτρα η μία από την άλλη χωρίς όμως να είναι ευθυγραμμισμένες ώστε η μία να έχει μέτωπο στην άλλη. Για αυτή την ζεύξη το επίπεδο της έντασης στον δέκτη ήταν  $-39\text{dBm}$  και το Jitter 1.

Στις 3 πρώτες στήλες φαίνονται οι παράμετροι που εισάγαμε εμείς. Στις επόμενες 5 στήλες φαίνονται τα αποτελέσματα για τον ρυθμό μετάδοσης σε uplink και downlink αλλά και ο συνολικός καθώς και τα πακέτα που στέλνονται και λαμβάνονται. Τέλος παρουσιάζονται οι αποδόσεις για uplink και downlink.

Link capacity test: Κοντινή απόσταση												
			Power Level: -39dB Jitter: 1 RSSI:2101									
Δεδομένα			Αποτελέσματα									
Duration (sec)	Number of packets	Packet Length	Downlink RATE (bps)	Uplink RATE (bps)	Aggregate RATE (bps)	Pkt Xmt (Act/Exp)	Pkt Rcv (Act/Exp):	Downlink Efficiency	Downlink Index (Act/Max):	Uplink Efficiency	Uplink Index (Act/Max):	
2	2	64	512	512	1024	2/2	2/2	100%	100/100	100%	100/100	
4	4	64	512	512	1024	4/4	4/4	100%	100/100	100%	100/100	
4	8	128	2048	2048	4096	8/8	8/8	100%	100/100	100%	100/100	
4	32	128	8192	8192	16384	32/32	32/32	100%	100/100	98%	98/100	
10	64	256	13107	13107	26214	64/64	64/64	98%	98/100	98%	98/100	
4	64	128	16384	16384	32768	64/64	64/64	100%	100/100	99%	99/100	
4	32	256	16384	16384	32768	32/32	32/32	97%	97/100	100%	100/100	
4	64	256	32768	32768	65536	64/64	64/64	98%	98/100	98%	98/100	
4	32	512	32768	32768	65536	32/32	32/32	97%	97/100	98%	98/100	
4	64	512	65536	65536	131072	64/64	64/64	98%	98/100	99%	99/100	
4	32	1024	65536	65534	131072	32/32	32/32	98%	98/100	100%	100/100	
4	64	1024	131072	131200	262272	64/64	64/64	98%	98/100	99%	99/100	
4	64	1522	196608	196608	393216	64/64	64/64	98%	98/100	100%	100/100	
2	64	1024	262144	262144	524288	64/64	64/64	98%	98/100	99%	99/100	
2	64	1522	393216	393216	786432	64/64	64/64	98%	98/100	99%	99/100	

Πίνακας 3.1

Στις 3 πρώτες στήλες φαίνονται οι παράμετροι που εισάγαμε εμείς. Στις επόμενες 5 στήλες φαίνονται τα αποτελέσματα για τον ρυθμό μετάδοσης σε uplink και downlink αλλά και ο συνολικός καθώς και τα πακέτα που στέλνονται και λαμβάνονται. Τέλος παρουσιάζονται οι αποδόσεις για uplink και downlink.

Στον πίνακα 3.2 φαίνονται οι μετρήσεις που έγιναν στην τοποθεσία των σχημάτων 3.7 και 3.8.

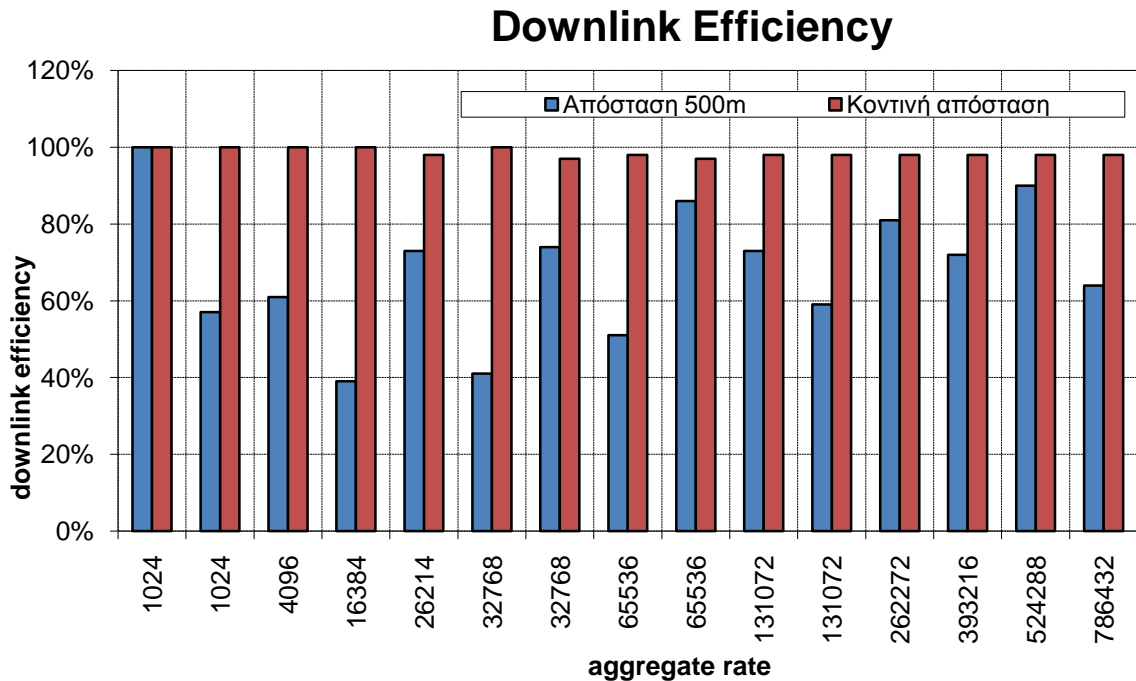
Link capacity test: Απόσταση 511m	
Power Level: -8 dB Jitter: 7 RSSI:493	
Δεδομένα	Αποτελέσματα

Duration (sec)	Number of packets	Packet Length	Downlink RATE (bps)	Uplink RATE (bps)	Aggregate RATE (bps)	Pkt Xmt (Act/Exp)	Pkt Rcv (Act/Exp):	Downlink Efficiency	Downlink Index (Act/Max):	Uplink Efficiency	Uplink Index (Act/Max):
2	2	64	512	512	1024	2/2	2/2	100%	100/100	66%	66/100
4	4	64	512	512	1024	4/4	4/4	57%	57/100	100%	100/100
4	8	128	2048	2048	4096	8/8	8/8	61%	61/100	84%	84/100
4	32	128	8192	8192	16384	32/32	32/32	39%	39/100	70%	70/100
10	64	256	13107	13107	26214	64/64	64/64	73%	73/100	94%	94/100
4	64	128	16384	16384	32768	64/64	64/64	41%	41/100	76%	76/100
4	32	256	16384	16384	32768	32/32	32/32	74%	74/100	95%	95/100
4	64	256	32768	32768	65536	64/64	64/64	51%	51/100	85%	85/100
4	32	512	32768	32768	65536	32/32	32/32	86%	86/100	95%	95/100
4	64	512	65536	65536	131072	64/64	64/64	73%	73/100	92%	92/100
4	32	1024	65536	65534	131072	32/32	32/32	59%	59/100	83%	83/100
4	64	1024	131072	131200	262272	64/64	64/64	81%	81/100	95%	95/100
4	64	1522	196608	196608	393216	64/64	64/64	72%	72/100	89%	89/100
2	64	1024	262144	262144	524288	64/64	64/64	90%	90/100	97%	97/100
2	64	1522	393216	393216	786432	64/64	64/64	64%	64/100	83%	83/100

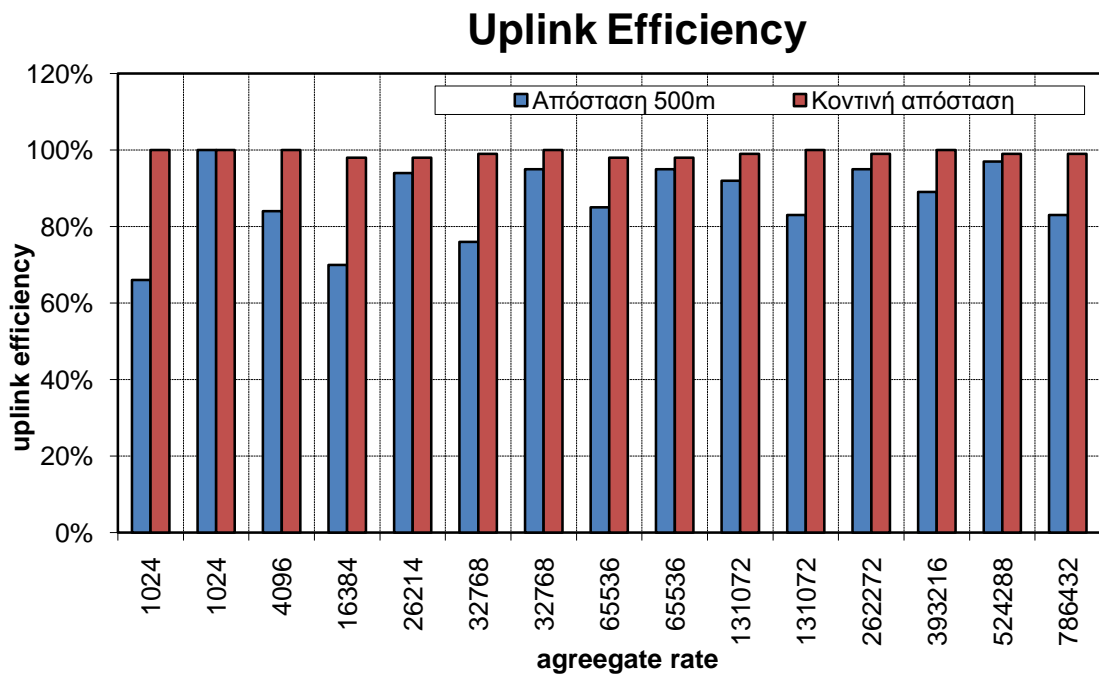
Πίνακας 3.2

Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων στις δύο περιπτώσεις παρατηρούμε το διάγραμμα του σχήματος 3.18 για την απόδοση στο downlink και του σχήματος 3.19 για την απόδοση στο uplink. Οι μετρήσεις γίναν με ποσοστό downlink 75% και Max Range 2 μίλια. Η μέγιστη αυτή απόσταση (εμβέλεια), όπως έχει περιγραφεί και στη δομή του πλαισίου στα τεχνικά χαρακτηριστικά, εισάγει μία καθυστέρηση για να αποφευχθεί η ταυτόχρονη αποστολή πακέτων από τις δύο μονάδες.





Σχήμα 3.18



Σχήμα 3.19

Παρατηρείται ότι στις δύο μετρήσεις υπάρχει σαφής διαφορά στην απόδοση του διαύλου ειδικά στην προς τα κάτω ζεύξη. Επίσης παρατηρείται μεγάλη δικύμανση στην απόδοση του διαύλου, γεγονός που εξηγείται από την μεταβολή του περιβάλλοντος και την επιρροή του στην ζεύξη. Αξίζει να σημειωθεί ότι η προς τα κάτω ζεύξη παρουσιάζει μεγαλύτερες μεταβολές από ότι η άνω ζεύξη.



Για την ζεύξη των σχημάτων 3.7 και 3.8 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μεταβάλλοντας την μέγιστη απόσταση (καθυστέρηση) της ζεύξης αλλά και το ποσοστό του downlink.

### Μεταβάλλοντας τη μέγιστημεβέλεια:

Η μετρήσεις του πίνακα 3.2 αφορούν μέγιστη απόσταση 2 μίλια. Στους πίνακες 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 και 3,8 φαίνονται οι μετρήσεις για μέγιστη απόσταση 10, 15, 20, 25 και 30 μίλια αντίστοιχα.

Link capacity test: Απόσταση 511m												
						Power Level: -80 dB			Jitter: 7		RSSI:511	
						<b>Max Range: 10miles</b>						
Δεδομένα			Αποτελέσματα									
Duration (sec)	Number of packets	Packet Length	Downlink RATE (bps)	Uplink RATE (bps)	Aggregate RATE (bps)	Pkt Xmt (Act/Exp)	Pkt Rcv (Act/Exp):	Downlink Efficiency	Downlink Index (Act/Max):	Uplink Efficiency	Uplink Index (Act/Max):	
2	2	64	512	512	1024	2/2	2/2	100%	100/100	100%	100/100	
4	4	64	512	512	1024	4/4	4/4	100%	100/100	100%	100/100	
4	8	128	2048	2048	4096	8/8	8/8	100%	100/100	94%	94/100	
4	32	128	8192	8192	16384	32/32	32/32	91%	91/100	88%	88/100	
10	64	256	13107	13107	26214	64/64	64/64	94%	94/100	96%	96/100	
4	64	128	16384	16384	32768	64/64	64/64	81%	81/100	94%	94/100	
4	32	256	16384	16384	32768	32/32	32/32	97%	97/100	99%	99/100	
4	64	256	32768	32768	65536	64/64	64/64	83%	83/100	96%	96/100	
4	32	512	32768	32768	65536	32/32	32/32	95%	95/100	98%	98/100	
4	64	512	65536	65536	131072	64/64	64/64	95%	95/100	95%	95/100	
4	32	1024	65536	66304	131840	32/32	32/32	84%	84/100	91%	91/100	
4	64	1024	131072	131200	262272	64/64	64/64	93%	93/100	97%	97/100	
4	64	1522	196608	196608	393216	64/64	64/64	96%	96/100	98%	98/100	
2	64	1024	262144	262144	524288	64/64	64/64	94%	94/100	97%	97/100	
2	64	1522	393216	393216	786432	64/64	64/64	98%	98/100	99%	99/100	

Πίνακα 3.3

Δεδομένα			Αποτελέσματα									
Duration (sec)	Number of packets	Packet Length	Downlink RATE (bps)	Uplink RATE (bps)	Aggregate RATE (bps)	Pkt Xmt (Act/Exp)	Pkt Rcv (Act/Exp):	Downlink Efficiency	Downlink Index (Act/Max):	Uplink Efficiency	Uplink Index (Act/Max):	
2	2	64	512	512	1024	2/2	2/2	100%	100/100	100%	100/100	
4	4	64	512	512	1024	4/4	4/4	100%	100/100	100%	100/100	
4	8	128	2048	2048	4096	8/8	8/8	100%	100/100	100%	100/100	
4	32	128	8192	8192	16384	32/32	32/32	100%	100/100	92%	92/100	
10	64	256	13107	13107	26214	64/64	64/64	89%	89/100	97%	97/100	
4	64	128	16384	16384	32768	64/64	64/64	65%	65/100	93%	93/100	
4	32	256	16384	16384	32768	32/32	32/32	77%	77/100	94%	94/100	
4	64	256	32768	32768	65536	64/64	64/64	71%	71/100	88%	88/100	
4	32	512	32768	32768	65536	32/32	32/32	96%	96/100	96%	96/100	
4	64	512	65536	65536	131072	64/64	64/64	66%	66/100	89%	89/100	
4	32	1024	65536	65534	131072	32/32	32/32	97%	97/100	98%	98/100	
4	64	1024	131072	131200	262272	64/64	64/64	97%	97/100	99%	99/100	
4	64	1522	196608	196608	393216	64/64	64/64	97%	97/100	99%	99/100	
2	64	1024	262144	262144	524288	64/64	64/64	97%	97/100	99%	99/100	
2	64	1522	393216	393216	786432	64/64	64/64	94%	94/100	94%	94/100	

Πίνακας 3.4

Δεδομένα			Αποτελέσματα									
Duration (sec)	Number of packets	Packet Length	Downlink RATE (bps)	Uplink RATE (bps)	Aggregate RATE (bps)	Pkt Xmt (Act/Exp)	Pkt Rcv (Act/Exp):	Downlink Efficiency	Downlink Index (Act/Max):	Uplink Efficiency	Uplink Index (Act/Max):	
2	2	64	512	512	1024	2/2	2/2	100%	100/100	100%	100/100	
4	4	64	512	512	1024	4/4	4/4	66%	66/100	100%	100/100	
4	8	128	2048	3328	5376	8/8	8/8	80%	80/100	92%	92/100	

4	32	128	8192	8192	16384	32/32	32/32	68%	98/100	90%	90/100
1											
0	64	256	13107	13107	26214	64/64	64/64	49%	49/100	80%	80/100
4	64	128	16384	16384	32768	64/64	64/64	62%	62/100	91%	91/100
4	32	256	16384	16384	32768	32/32	32/32	55%	55/100	85%	85/100
4	64	256	32768	32768	65536	64/64	64/64	67%	67/100	89%	89/100
4	32	512	32768	34048	66816	32/32	32/32	86%	86/100	96%	96/100
4	64	512	65536	65536	131072	64/64	64/64	81%	81/100	93%	93/100
4	32	1024	65536	65534	131072	32/32	32/32	77%	77/100	89%	89/100
4	64	1024	131072	131200	262272	64/64	64/64	52%	52/100	90%	90/100
4	64	1522	196608	196608	393216	64/64	64/64	47%	47/100	81%	81/100
2	64	1024	262144	262144	524288	64/64	64/64	95%	95/100	96%	96/100
2	64	1522	393216	393216	786432	64/64	64/64	94%	94/100	99%	99/100

Πίνακας 3.5

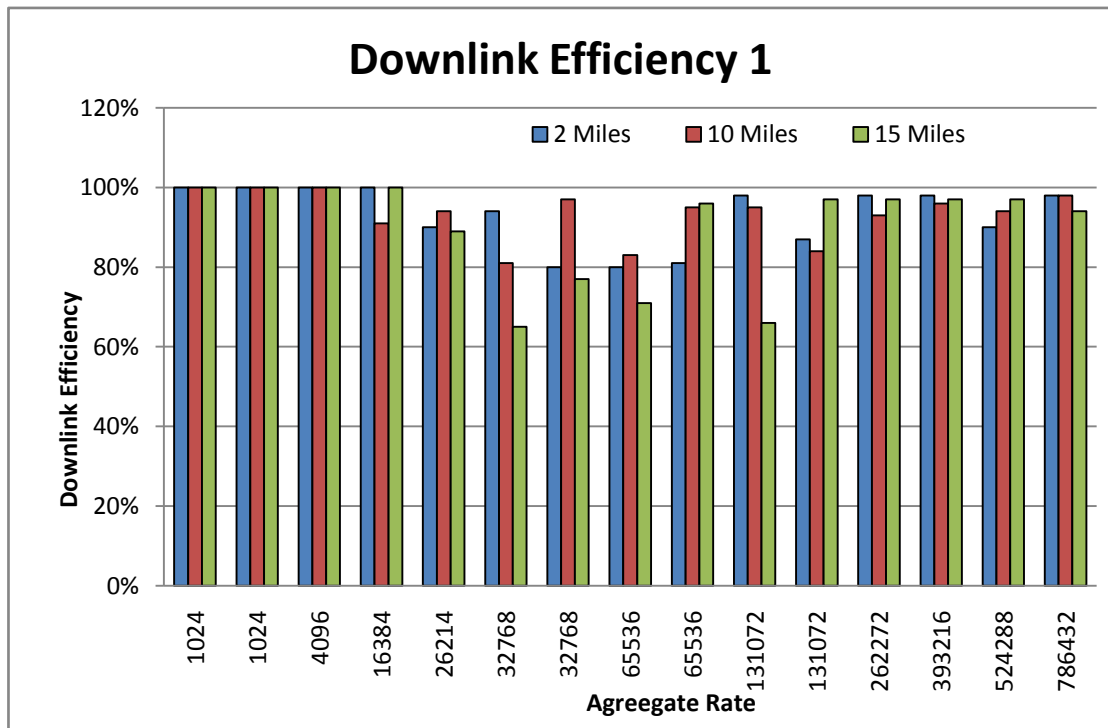
Link capacity test: Απόσταση 511m											
Power Level: -80 dB Jitter: 5 RSSI:511											
Max Range: 25 miles											
Δεδομένα			Αποτελέσματα								
Duration (sec)	Number of packets	Packet Length	Downlink RATE (bps)	Uplink RATE (bps)	Aggregate RATE (bps)	Pkt Xmt (Act/Exp)	Pkt Rcv (Act/Exp):	Downlink Efficiency	Downlink Index (Act/Max):	Uplink Efficiency	Uplink Index (Act/Max):
2	2	64	512	512	1024	2/2	2/2	100%	100/100	100%	100/100
4	4	64	512	512	1024	4/4	4/4	100%	100/100	100%	100/100
4	8	128	2048	2048	4096	8/8	8/8	94%	94/100	72%	72/100
4	32	128	8192	8192	16384	32/32	32/32	53%	53/100	88%	88/100
10	64	256	13107	13107	26214	64/64	64/64	72%	72/100	95%	95/100
4	64	128	16384	16384	32768	64/64	64/64	100%	100/100	94%	94/100
4	32	256	16384	16384	32768	32/32	32/32	80%	80/100	92%	92/100
4	64	256	32768	32768	65536	64/64	64/64	90%	90/100	97%	97/100
4	32	512	32768	32768	65536	32/32	32/32	76%	76/100	94%	94/100
4	64	512	65536	65536	131072	64/64	64/64	89%	89/100	98%	98/100
4	32	1024	65536	65534	131072	32/32	32/32	82%	82/100	98%	98/100
4	64	1024	131072	131200	262272	64/64	64/64	76%	76/100	93%	93/100
4	64	1522	196608	196608	393216	64/64	64/64	86%	86/100	95%	95/100
2	64	1024	262144	262144	524288	64/64	64/64	81%	81/100	88%	88/100
2	64	1522	393216	393216	786432	64/64	64/64	62%	62/100	85%	85/100

Πίνακας 3.6

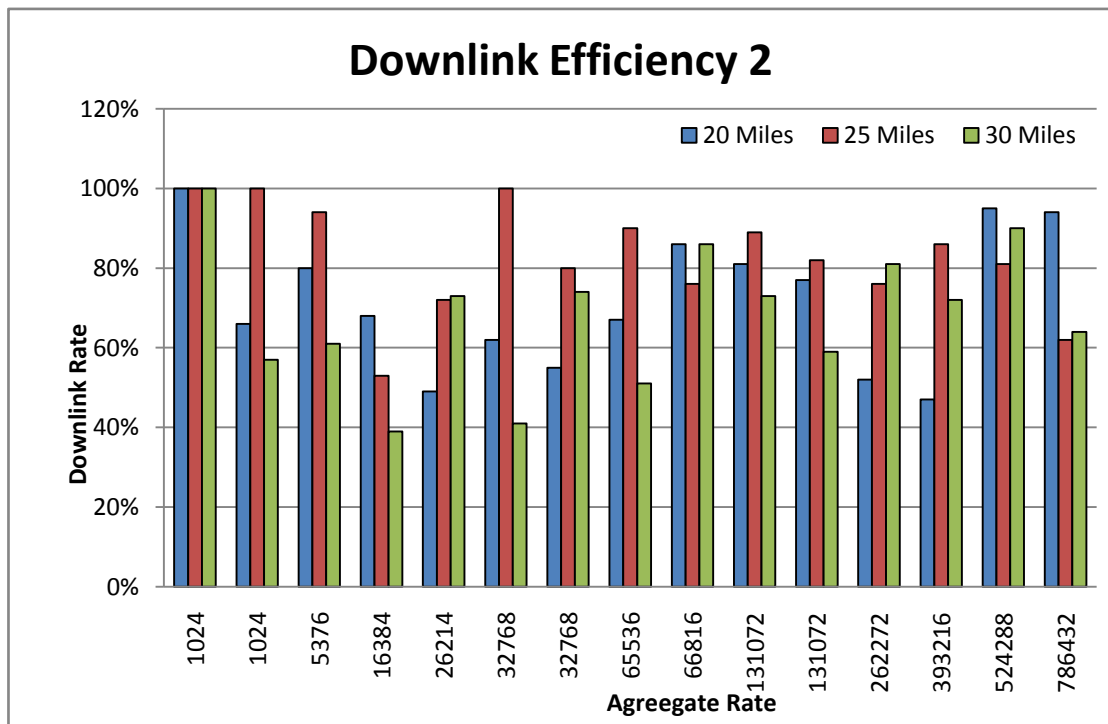
Δεδομένα			Αποτελέσματα									
Duration (sec)	Number of packets	Packet Length	Downlink RATE (bps)	Uplink RATE (bps)	Aggregate RATE (bps)	Pkt Xmt (Act/Exp)	Pkt Rcv (Act/Exp):	Downlink Efficiency	Downlink Index (Act/Max):	Uplink Efficiency	Uplink Index (Act/Max):	
2	2	64	512	512	1024	2/2	2/2	100%	100/100	66%	66/100	
4	4	64	512	512	1024	4/4	4/4	57%	57/100	100%	100/100	
4	8	128	2048	2048	4096	8/8	8/8	61%	61/100	84%	84/100	
4	32	128	8192	8192	16384	32/32	32/32	39%	39/100	70%	70/100	
10	64	256	13107	13107	26214	64/64	64/64	73%	73/100	94%	94/100	
4	64	128	16384	16384	32768	64/64	64/64	41%	41/100	76%	76/100	
4	32	256	16384	16384	32768	32/32	32/32	74%	74/100	95%	95/100	
4	64	256	32768	32768	65536	64/64	64/64	51%	51/100	85%	85/100	
4	32	512	32768	32768	65536	32/32	32/32	86%	86/100	95%	95/100	
4	64	512	65536	65536	131072	64/64	64/64	73%	73/100	92%	92/100	
4	32	1024	65536	65534	131072	32/32	32/32	59%	59/100	83%	83/100	
4	64	1024	131072	131200	262272	64/64	64/64	81%	81/100	95%	95/100	
4	64	1522	196608	196608	393216	64/64	64/64	72%	72/100	89%	89/100	
2	64	1024	262144	262144	524288	64/64	64/64	90%	90/100	97%	97/100	
2	64	1522	393216	393216	786432	64/64	64/64	64%	64/100	83%	83/100	

Πίνακας 3.7

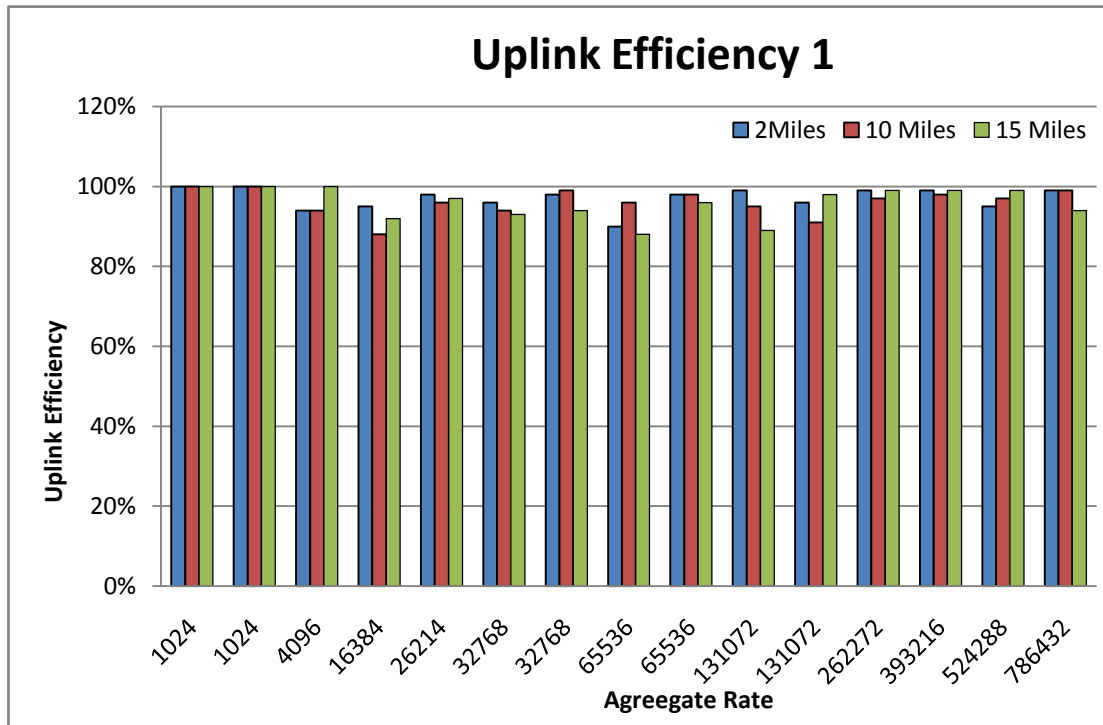
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα διαγράμματα στα σχήματα 3.20 – 3.23. Τα δύο πρώτα διαγράμματα αφορούν την προς τα κάτω ζεύξη ενώ τα άλλα δύο την προς τα κάτω.



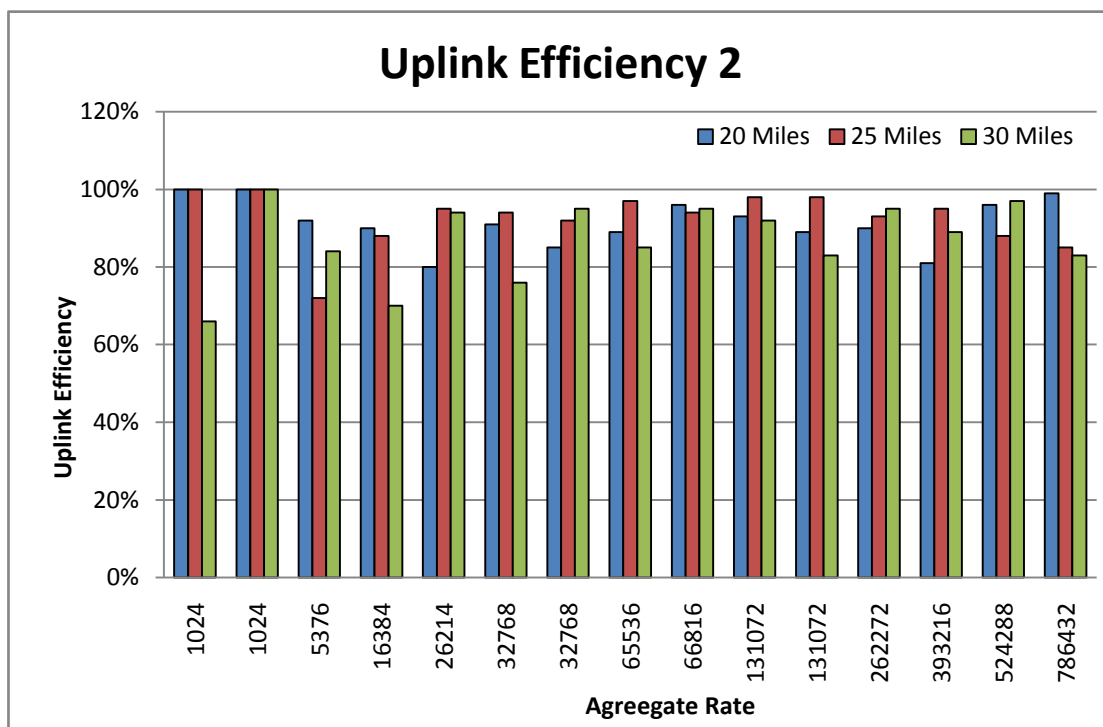
Σχήμα 3.20



Σχήμα 3.21



Σχήμα 3.22



Σχήμα 3.23

Από τους πίνακες και τα διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι σε γενικές γραμμές με την αύξηση της μέγιστης απόστασης απόστασης ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης μειώνεται παρά τις διακυμάνσεις που εμφανίζονται.

**Για την απόδοση της προς τα κάτω ζεύξης** παρατηρείται πτώση της απόδοσης του διαύλου χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η μείωση αυτή ισχύει για όλες τις μετρήσεις. Λόγω της αστάθειας του περιβάλλοντος και της αδυναμίας ελέγχου του, οι τιμές της ισχύος, του jitter αλλά και του RSSI μεταβάλλονται συνεχώς. Έτσι, για παράδειγμα στη μέγιστη απόσταση 20 km παρατηρείται μεγάλη πτώση στις τιμές της απόδοσης του διαύλου που δεν παρατηρείται στις επόμενες ζεύξεις. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι κατά την μέτρηση με αυτή τη ρύθμιση το jitter ήταν 7 ενώ στις επόμενες δύο μετρήσεις στα 25 και 30 μίλια, το jitter ήταν 5 και 4 αντίστοιχα. Αυτό εξηγεί βελτίωση του διαύλου που αντισταθμίζει την μείωση που θα είχε η απόδοση με την αύξηση της μέγιστης απόστασης.

**Για την απόδοση της άνω ζεύξης** δεν παρατηρείται μεγάλη μείωση. Γενικά, όπως θα δούμε και από τις επόμενες μετρήσεις, το σύστημα διατηρεί πολύ καλές τιμές για την άνω ζεύξη και η μεταβολές του περιβάλλοντος ανιμετωπίζονται καλύτερα από ότι στην προς τα κάτω ζεύξη. Παρόλα αυτά διαπιστώνεται από τα σχήματα 3.22 και 3.23 ότι η απόδοση του διαύλου μειώνεται όσο αυξάνεται η μέγιστη απόσταση του διαύλου.

#### Μεταβάλλοντας το ποσοστό της κάτω ζεύξης (downlink rate):

Link capacity test: Απόσταση 511m			Power Level: -81 dB			Jitter: 7		RSSI:513				
			Downlink Rate: 25%									
Δεδομένα			Αποτελέσματα									
Duration (sec)	Number of packets	Packet Length	Downlink RATE (bps)	Uplink RATE (bps)	Aggregate RATE (bps)	Pkt Xmt (Act/Exp)	Pkt Rcv (Act/Exp):	Downlink Efficiency	Downlink Index (Act/Max):	Uplink Efficiency	Uplink Index (Act/Max):	
2	2	64	512	512	1024	2/2	2/2	100%	100/100	100%	100/100	
4	4	64	512	512	1024	4/4	4/4	100%	100/100	100%	100/100	
4	8	128	2048	2048	4096	8/8	8/8	57%	57/100	88%	88/100	
4	32	128	8192	8192	16384	32/32	32/32	94%	94/100	78%	78/100	
10	64	256	13107	13107	26214	64/64	64/64	98%	98/100	98%	98/100	
4	64	128	16384	16384	32768	64/64	64/64	93%	93/100	85%	85/100	
4	32	256	16384	16384	32768	32/32	32/32	90%	90/100	84%	84/100	
4	64	256	32768	32768	65536	64/64	64/64	96%	96/100	93%	93/100	
4	32	512	32768	32768	65536	32/32	32/32	98%	98/100	95%	95/100	
4	64	512	65536	65536	131072	64/64	64/64	98%	98/100	99%	99/100	
4	32	1024	65536	65534	131072	32/32	32/32	95%	95/100	97%	97/100	

4	64	1024	131072	131200	262272	64/64	64/64	94%	94/100	98%	98/100
4	64	1522	196608	197888	394496	64/64	64/64	93%	93/100	92%	92/100
2	64	1024	262144	262144	524288	64/64	64/64	99%	99/100	99%	99/100
2	64	1522	393216	393216	786432	64/64	64/64	97%	97/100	98%	98/100

Πίνακας 3.8

Δεδομένα			Αποτελέσματα									
Duration (sec)	Number of packets	Packet Length	Downlink RATE (bps)	Uplink RATE (bps)	Aggregate RATE (bps)	Pkt Xmt (Act/Exp)	Pkt Rcv (Act/Exp):	Downlink Efficiency	Downlink Index (Act/Max):	Uplink Efficiency	Uplink Index (Act/Max):	
2	2	64	512	512	1024	2/2	2/2	100%	100/100	100%	100/100	
4	4	64	512	512	1024	4/4	4/4	40%	40/100	80%	80/100	
4	8	128	2048	2048	4096	8/8	8/8	80%	80/100	88%	88/100	
4	32	128	8192	8192	16384	32/32	32/32	83%	83/100	86%	86/100	
10	64	256	13107	13414	26521	64/64	64/64	54%	54/100	75%	75/100	
4	64	128	16384	16384	32768	64/64	64/64	55%	55/100	60%	60/100	
4	32	256	16384	17664	34048	32/32	32/32	64%	64/100	94%	94/100	
4	64	256	32768	32768	65536	64/64	64/64	83%	83/100	94%	94/100	
4	32	512	32768	32768	65536	32/32	32/32	95%	95/100	91%	91/100	
4	64	512	65536	65536	131072	64/64	64/64	98%	98/100	98%	98/100	
4	32	1024	65536	65534	131072	32/32	32/32	94%	94/100	97%	97/100	
4	64	1024	131072	131200	262272	64/64	64/64	96%	96/100	98%	98/100	
4	64	1522	196608	196608	393216	64/64	64/64	76%	76/100	88%	88/100	
2	64	1024	262144	262144	524288	64/64	64/64	96%	96/100	97%	97/100	
2	64	1522	393216	393216	786432	64/64	64/64	79%	79/100	92%	92/100	

Πίνακας 3.9

Δεδομένα			Αποτελέσματα									
Duration (sec)	Number of packets	Packet Length	Downlink RATE (bps)	Uplink RATE (bps)	Aggregate RATE (bps)	Pkt Xmt (Act/Exp)	Pkt Rcv (Act/Exp):	Downlink Efficiency	Downlink Index (Act/Max):	Uplink Efficiency	Uplink Index (Act/Max):	
2	2	64	512	512	1024	2/2	2/2	100%	100/100	100%	100/100	
4	4	64	512	512	1024	4/4	4/4	40%	40/100	80%	80/100	
4	8	128	2048	2048	4096	8/8	8/8	80%	80/100	88%	88/100	
4	32	128	8192	8192	16384	32/32	32/32	83%	83/100	86%	86/100	
10	64	256	13107	13414	26521	64/64	64/64	54%	54/100	75%	75/100	
4	64	128	16384	16384	32768	64/64	64/64	55%	55/100	60%	60/100	
4	32	256	16384	17664	34048	32/32	32/32	64%	64/100	94%	94/100	
4	64	256	32768	32768	65536	64/64	64/64	83%	83/100	94%	94/100	
4	32	512	32768	32768	65536	32/32	32/32	95%	95/100	91%	91/100	
4	64	512	65536	65536	131072	64/64	64/64	98%	98/100	98%	98/100	
4	32	1024	65536	65534	131072	32/32	32/32	94%	94/100	97%	97/100	
4	64	1024	131072	131200	262272	64/64	64/64	96%	96/100	98%	98/100	
4	64	1522	196608	196608	393216	64/64	64/64	76%	76/100	88%	88/100	
2	64	1024	262144	262144	524288	64/64	64/64	96%	96/100	97%	97/100	
2	64	1522	393216	393216	786432	64/64	64/64	79%	79/100	92%	92/100	



2	2	64	512	512	1024	2/2	2/2	100%	100/100	100%	100/100
4	4	64	512	512	1024	4/4	4/4	100%	100/100	100%	100/100
4	8	128	2048	2048	4096	8/8	8/8	100%	100/100	94%	94/100
4	32	128	8192	8192	16384	32/32	32/32	100%	100/100	95%	95/100
10	64	256	13107	13107	26214	64/64	64/64	90%	90/100	98%	98/100
4	64	128	16384	16384	32768	64/64	64/64	94%	94/100	96%	96/100
4	32	256	16384	16384	32768	32/32	32/32	80%	80/100	98%	98/100
4	64	256	32768	32768	65536	64/64	64/64	80%	80/100	90%	90/100
4	32	512	32768	32768	65536	32/32	32/32	81%	81/100	98%	98/100
4	64	512	65536	65536	131072	64/64	64/64	98%	98/100	99%	99/100
4	32	1024	65536	65534	131072	32/32	32/32	87%	87/100	96%	96/100
4	64	1024	131072	131200	262272	64/64	64/64	98%	98/100	99%	99/100
4	64	1522	196608	196608	393216	64/64	64/64	98%	98/100	99%	99/100
2	64	1024	262144	262144	524288	64/64	64/64	90%	90/100	95%	95/100
2	64	1522	393216	393216	786432	64/64	64/64	98%	98/100	99%	99/100

Πίνακας3.10

Link capacity test: Απόσταση 511m												Power Level: -81 dB	Jitter: 6	RSSI:455
Δεδομένα			Αποτελέσματα									Downlink Rate: 85%		
Duration (sec)	Number of packets	Packet Length	Downlink RATE (bps)	Uplink RATE (bps)	Aggregate RATE (bps)	Pkt Xmt (Act/Exp)	Pkt Rcv (Act/Exp):	Downlink Efficiency	Downlink Index (Act/Max):	Uplink Efficiency	Uplink Index (Act/Max):			
2	2	64	512	512	1024	2/2	2/2	66%	66/100	100%	100/100			
4	4	64	512	512	1024	4/4	4/4	100%	100/100	100%	100/100			
4	8	128	2048	2048	4096	8/8	8/8	88%	88/100	100%	100/100			
4	32	128	8192	8192	16384	32/32	32/32	80%	80/100	98%	98/100			
10	64	256	13107	13107	26214	64/64	64/64	75%	75/100	99%	99/100			
4	64	128	16384	16384	32768	64/64	64/64	91%	91/100	97%	97/100			
4	32	256	16384	16384	32768	32/32	32/32	77%	77/100	96%	96/100			
4	64	256	32768	32768	65536	64/64	64/64	63%	63/100	95%	95/100			
4	32	512	32768	32768	65536	32/32	32/32	64%	64/100	95%	95/100			
4	64	512	65536	65536	131072	64/64	64/64	94%	94/100	99%	99/100			
4	32	1024	65536	65534	131072	32/32	32/32	84%	84/100	96%	96/100			
4	64	1024	131072	131200	262272	64/64	64/64	98%	98/100	97%	97/100			

4	64	1522	196608	196608	393216	64/64	64/64	72%	72/100	95%	95/100
2	64	1024	262144	262144	524288	64/64	64/64	91%	91/100	91%	91/100
2	64	1522	393216	393216	786432	64/64	64/64	92%	92/100	94%	94/100

Πίνακας 3.11

Δεδομένα			Αποτελέσματα									
Duration (sec)	Number of packets	Packet Length	Downlink RATE (bps)	Uplink RATE (bps)	Aggregate RATE (bps)	Pkt Xmt (Act/Exp)	Pkt Rcv (Act/Exp):	Downlink Efficiency	Downlink Index (Act/Max):	Uplink Efficiency	Uplink Index (Act/Max):	
<b>Link capacity test: Απόσταση 511m</b> <span style="float: right;">Power Level: -80 dB    Jitter: 7    RSSI:473</span> <b>Downlink Rate: 90%</b>												
2	2	64	512	512	1024	2/2	2/2	100%	100/100	66%	66/100	
4	4	64	512	512	1024	4/4	4/4	80%	80/100	100%	100/100	
4	8	128	2048	2560	4608	8/8	8/8	57%	57/100	90%	90/100	
4	32	128	8192	8192	16384	32/32	32/32	68%	68/100	88%	88/100	
10	64	256	13107	13107	26214	64/64	64/64	82%	82/100	97%	97/100	
4	64	128	16384	16384	32768	64/64	64/64	78%	78/100	99%	99/100	
4	32	256	16384	16384	32768	32/32	32/32	82%	82/100	97%	97/100	
4	64	256	32768	32768	65536	64/64	64/64	78%	78/100	95%	95/100	
4	32	512	32768	32768	65536	32/32	32/32	87%	87/100	97%	97/100	
4	64	512	65536	65536	131072	64/64	64/64	85%	85/100	97%	97/100	
4	32	1024	65536	65534	131072	32/32	32/32	87%	87/100	95%	95/100	
4	64	1024	131072	131200	262272	64/64	64/64	97%	97/100	98%	98/100	
4	64	1522	196608	196608	393216	64/64	64/64	92%	92/100	92%	92/100	
2	64	1024	262144	262144	524288	64/64	64/64	72%	72/100	94%	94/100	
2	64	1522	393216	393216	786432	64/64	64/64	94%	94/100	97%	97/100	

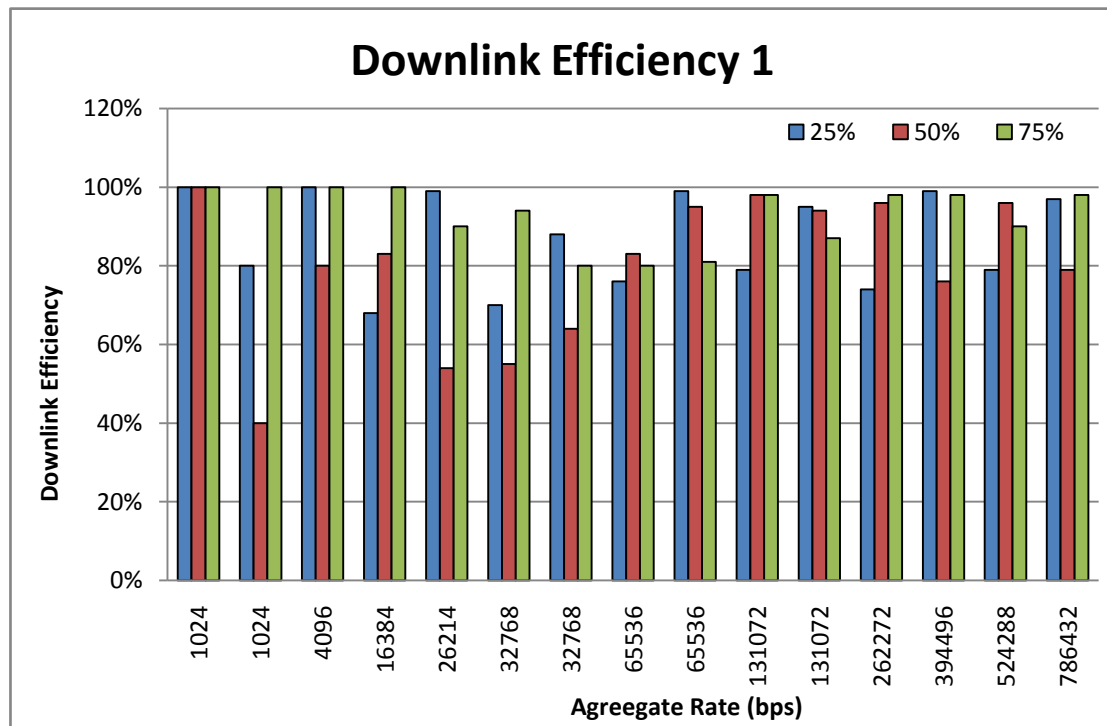
Πίνακας 3.12

Δεδομένα			Αποτελέσματα									
Duration (sec)	Number of packets	Packet Length	Downlink RATE (bps)	Uplink RATE (bps)	Aggregate RATE (bps)	Pkt Xmt (Act/Exp)	Pkt Rcv (Act/Exp):	Downlink Efficiency	Downlink Index (Act/Max):	Uplink Efficiency	Uplink Index (Act/Max):	
<b>Link capacity test: Απόσταση 511m</b> <span style="float: right;">Power Level: -80 dB    Jitter: 7    RSSI:473</span> <b>Downlink Rate: 99%</b>												
2	2	64	512	512	1024	2/2	2/2	100%	100/100	66%	66/100	
4	4	64	512	512	1024	4/4	4/4	80%	80/100	66%	66/100	

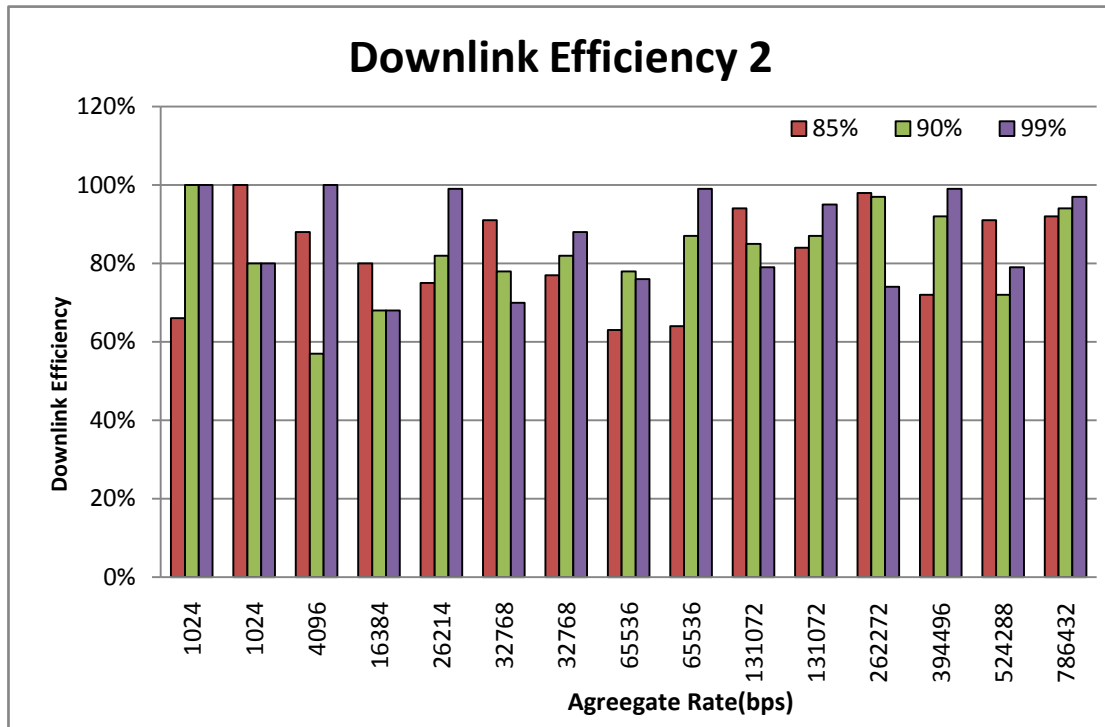
4	8	128	2048	2048	4096	8/8	8/8	100%	100/100	100%	100/100
4	32	128	8192	8192	16384	32/32	32/32	68%	68/100	92%	92/100
10	64	256	13107	13107	26214	64/64	64/64	99%	99/100	99%	99/100
4	64	128	16384	16384	32768	64/64	64/64	70%	70/100	95%	95/100
4	32	256	16384	16384	32768	32/32	32/32	88%	88/100	99%	99/100
4	64	256	32768	32768	65536	64/64	64/64	76%	76/100	95%	95/100
4	32	512	32768	32768	65536	32/32	32/32	99%	99/100	97%	97/100
4	64	512	65536	65536	131072	64/64	64/64	79%	79/100	93%	93/100
4	32	1024	65536	67200	131072	32/32	32/32	95%	95/100	99%	99/100
4	64	1024	131072	131200	262272	64/64	64/64	74%	74/100	98%	98/100
4	64	1522	196608	196608	393216	64/64	64/64	99%	99/100	99%	99/100
2	64	1024	262144	262144	524288	64/64	64/64	79%	79/100	87%	87/100
2	64	1522	393216	372480	765696	64/64	64/64	97%	97/100	100%	100/100

Πίνακας 3.13

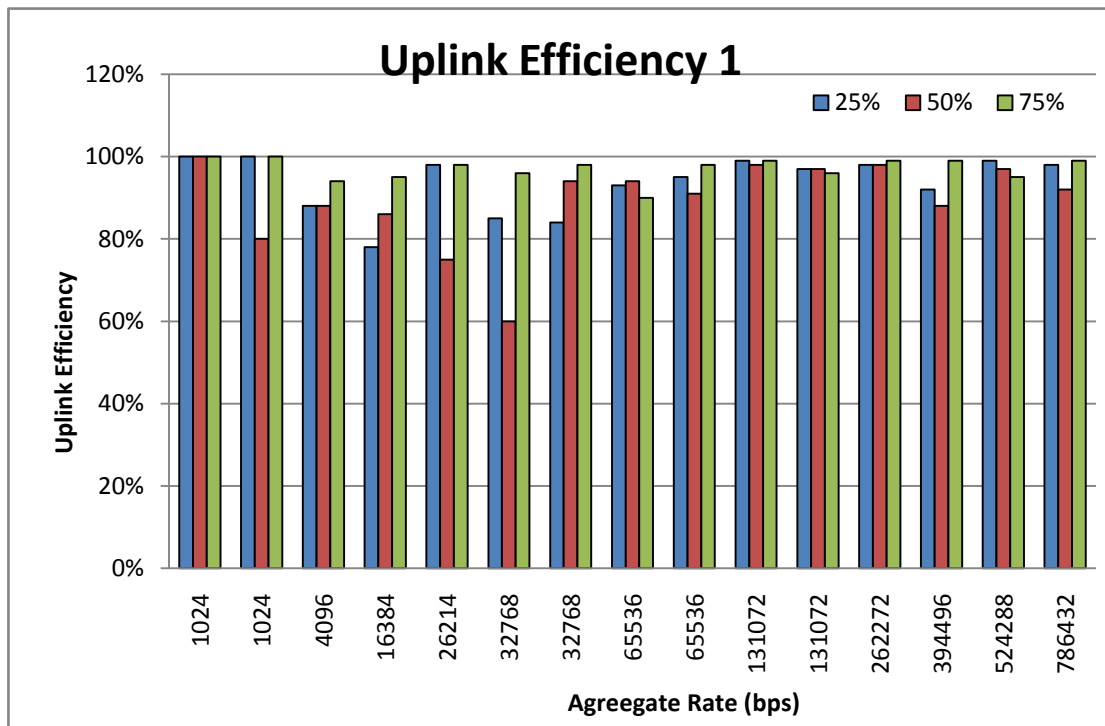
Στα σχήματα 3.24-3.27 φαίνονται τα διαγράμματα αυτών των μετρήσεων.



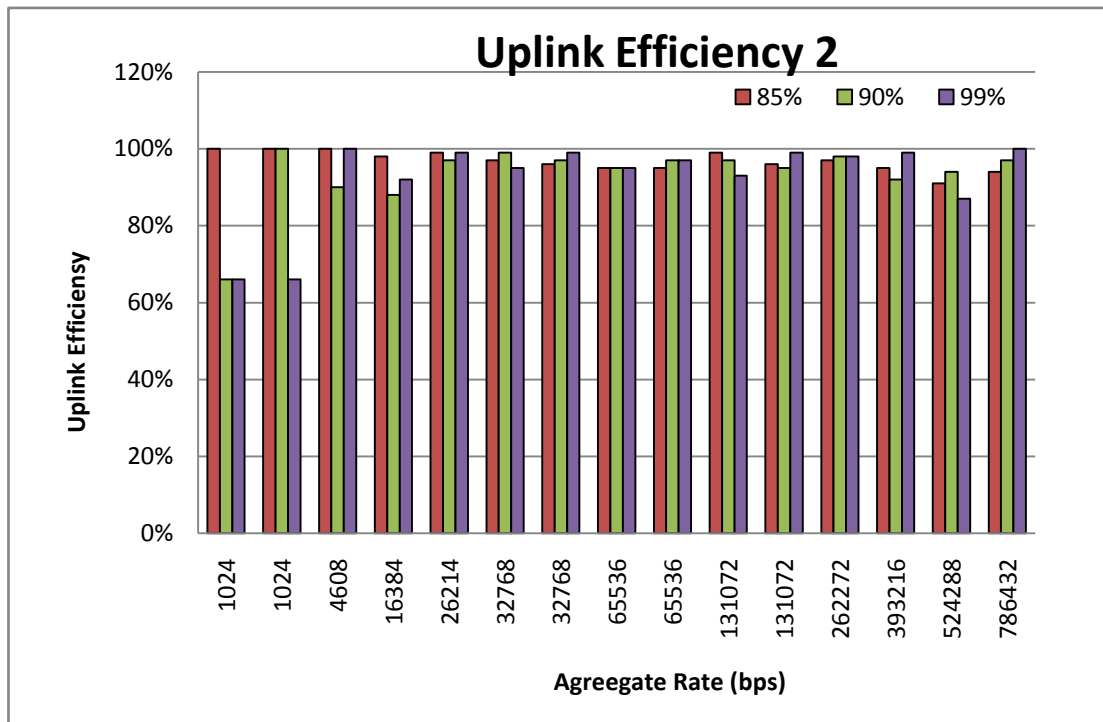
Σχήμα 3.24



Σχήμα 3.25



Σχήμα 3.26



Σχήμα 3.27

Για την απόδοση της προς τα κάτω ζεύξης παρατηρείται από τα σχήματα 3.24 και 3.25 ότι οι τιμές εμφανίζουν μεγάλες διακυμάνσεις ειδικά για χαμηλές τιμές του downlink rate. Τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις παρατηρούμε στο 25% και στο 50%, ενώ την μεγαλύτερη σταθερότητα στο 75%. Η ελάχιστη τιμή εμφανίζεται στο 50%. Η μεγάλη διακύμανση και οι χαμηλές τιμές που εμφανίζονται στο 85% και στο 90% οφείλονται πιθανόνο σε κακή ποιότητα της ζεύξης και στις μεταβολές του περιβάλλοντος, καθώς δεν δικαιολογούνται σε αυτά τα downlink rate.

Για την απόδοση της άνω ζεύξης παρατηρείται από τα σχήματα 3.26 και 3.27 ότι η διακύμανση των τιμών είναι σαφώς μικρότερη από ότι στο downlink. Παρόλα αυτά και σε αυτή την περίπτωση οι τιμές παρουσιάζουν σημαντικές μεταβολές. Η μεγαλύτερη διακύμανση παρατηρείται στο 99% και 90% downlink rate. Μεγάλη διακύμανση παρατηρείται και στα 25% και 50% που όμως δεν μπορεί να δικαιολογηθεί από το ποσοστό του downlink. Η ελάχιστη τιμή εμφανίζεται στο 50%. Η κακή απόδοση του διαύλου σε αυτά τα ποσοστά οφείλεται σε παράγοντες όπως είναι το περιβάλλον της ζεύξης τη δεδομένη στιγμή.

### 3. Frame Calculator

Το λογισμικό του συστήματος Canopy δίνει την δυνατότητα στον χειριστή να διαπιστώσει τα δεδομένα του πλαισίου αλλάζοντας τις παραμέτρους όπως αναφέρθηκε στην περιγραφή της διαδικασίας των μετρήσεων.

Έτσι για να δούμε πως κατανέμονται τα slots μέσα στο πλαίσιο έγιναν 3 σειρές μετρήσεων με διαφορετικές παραμέτρους κάθε φορά.

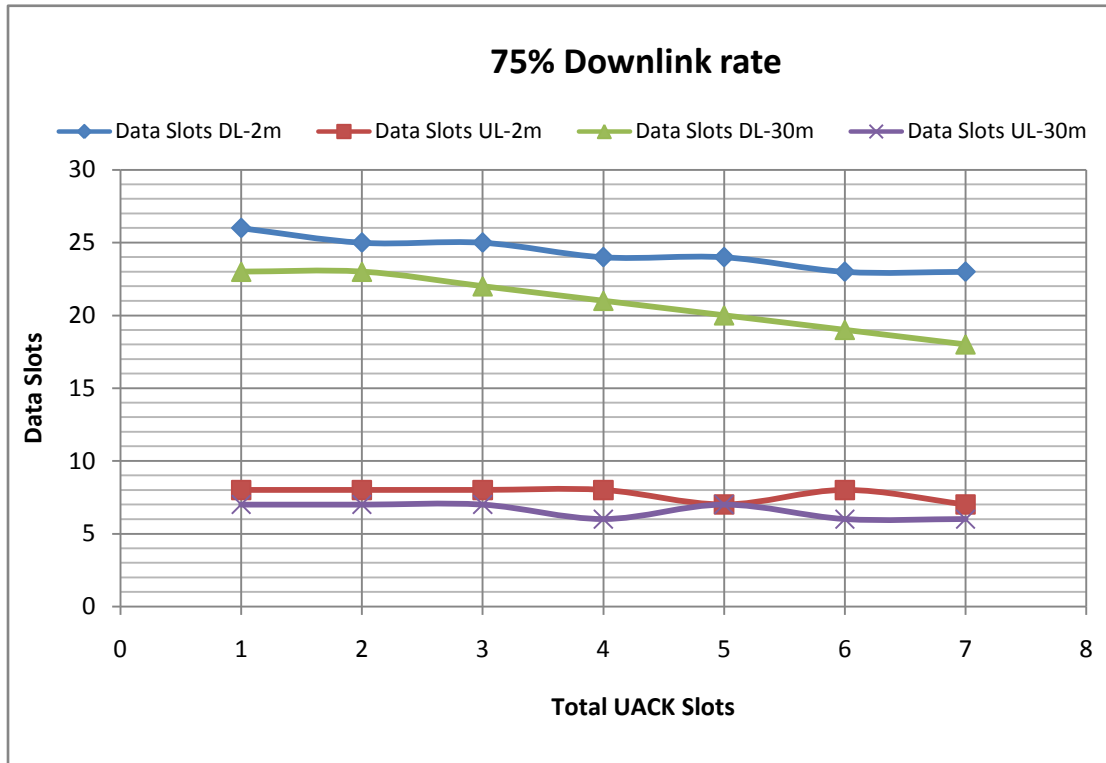
Οι μετρήσεις αυτές εξηγούν εν μέρη και τις μεταβολές της χωρητικότητας του διαύλου (link capacity) όπως θα εξηγηθεί στα συμπεράσματα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι για το σκοπό αυτής της εργασίας δεν έγιναν μετρήσεις μεταβάλλοντας τα high priority slots για αυτό τον λόγο δεν εμφανίζονται και στους πίνακες.

Η πρώτη σειρά μετρήσεων έγινε ορίζοντας την μέγιστη ακτίνα του διαύλου στα 2 μίλια ή αλλιώς μέγιστη καυστέρηση 216 bits που είναι τα bit που εισάγει το σύστημα ανάμεσα στα slots downlink και uplink έτσι ώστε να αποφευχθούν οι συγκρούσεις. Στην δεύτερη σειρά μετρήσεων ορίσαμε μέγιστη ακτίνα του διαύλου στα 30 μίλια ή αλλιώς μέγιστη καυστέρηση 3240 bits. Με τις δύο αυτές παραμέτρους σταθερές, σε κάθε σειρά μεταβάλαμε το πλήθος των uplink acknowledgment slots, των downlink acknowledgment slots και των control slots κρατώντας τις άλλες δύο παραμέτρους στην default τιμή τους που είναι 3 όπως φαίνεται στους πίνακες. Εκτός όμως από αυτές τις τιμές μεταβάλαμε και το downlink rate. Στους πίνακες 3.14-3.25 φαίνονται οι μετρήσεις των δύο αυτών σειρών. Μετά από από κάθε πίνακα φαίνονται τα διαγράμματα που δείχνουν την μεταβολή των slots δεδομένων για uplink και downlink.

Δεδομένα				Αποτελέσματα									
				Transmit Details					Receive Details				
Max Range 2 miles													
Downlink Data Rate %	Total Number UACK Slots	DACK Slots	Control Slots	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay (Actual/MaxRange) (bits)	Approximate distance (Actual/Max Range)(miles)	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay (Actual/MaxRange) (bits)	Approximate distance (Actual/Max Range)(miles)
75	1	3	3	3850	26	8	0/216	0/2m	3850	26	8	0/216	0/2m
75	2	3	3	4190	25	8	0/216	0/2m	4190	25	8	0/216	0/2m
75	3	3	3	4530	25	8	0/216	0/2m	4530	25	8	0/216	0/2m
75	4	3	3	4870	24	8	0/216	0/2m	4870	24	8	0/216	0/2m
75	5	3	3	5210	24	7	0/216	0/2m	5210	24	7	0/216	0/2m
75	6	3	3	5550	23	8	0/216	0/2m	5550	23	8	0/216	0/2m
75	7	3	3	5890	23	7	0/216	0/2m	5890	23	7	0/216	0/2m
Max Range 30 miles													
75	1	3	3	6874	22	7	0/3240	0/30m	6874	22	7	0/3240	0/30m
75	2	3	3	7214	21	7	0/3240	0/30m	7214	21	7	0/3240	0/30m
75	3	3	3	7554	21	7	0/3240	0/30m	7554	21	7	0/3240	0/30m
75	4	3	3	7894	21	6	0/3240	0/30m	7894	21	6	0/3240	0/30m
75	5	3	3	8234	20	7	0/3240	0/30m	8234	20	7	0/3240	0/30m
75	6	3	3	8574	20	6	0/3240	0/30m	8574	20	6	0/3240	0/30m
75	7	3	3	8914	19	6	0/3240	0/30m	8914	19	6	0/3240	0/30m

Πίνακας 3.14

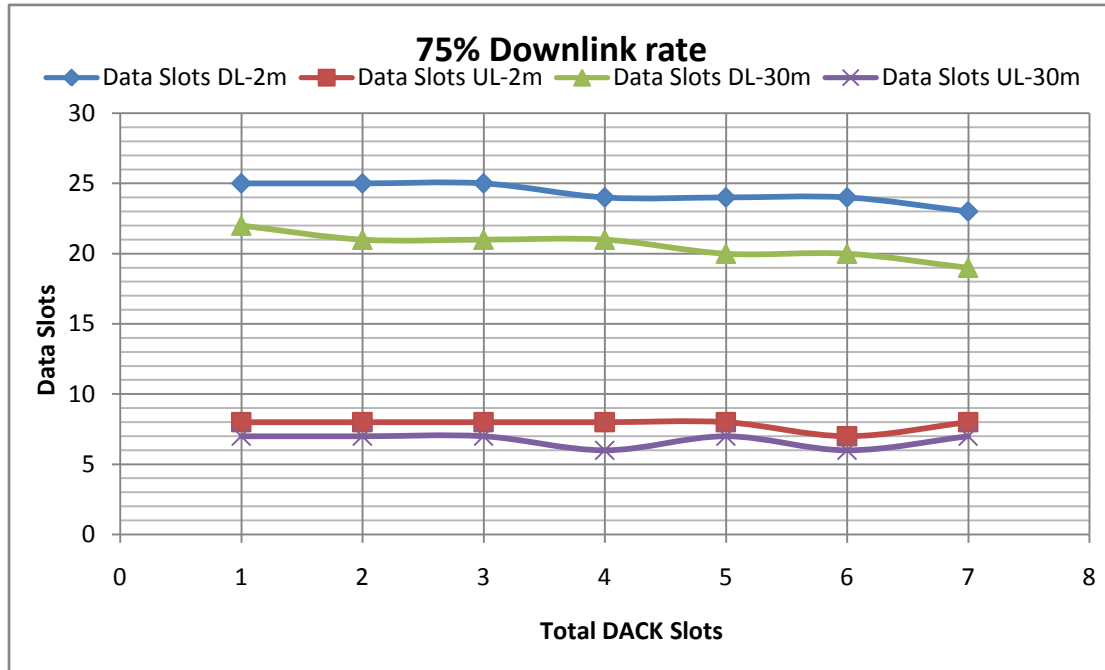


Σχήμα 3.28

Δεδομένα				Αποτελέσματα									
				Transmit Details					Receive Details				
Max Range 2 miles													
Downlink Data Rate %	Total Number UACK Slots	DACK Slots	Control Slots	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay (Actual/Max Range) (bits)	Approximate distance (Actual/Max Range)(miles)	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay (Actual/Max Range) (bits)	Approximate distance (Actual/Max Range)(miles)
75	3	1	3	3934	25	8	0/216	0/2m	3934	25	8	0/216	0/2m
75	3	2	3	4232	25	8	0/216	0/2m	4232	25	8	0/216	0/2m
75	3	3	3	4530	25	8	0/216	0/2m	4530	25	8	0/216	0/2m
75	3	4	3	4828	24	8	0/216	0/2m	4828	24	8	0/216	0/2m
75	3	5	3	5126	24	8	0/216	0/2m	5126	24	8	0/216	0/2m
75	3	6	3	5424	24	7	0/216	0/2m	5424	24	7	0/216	0/2m
75	3	7	3	5722	23	8	0/216	0/2m	5722	23	8	0/216	0/2m
Max Range 30 miles													
75	3	1	3	6958	22	7	0/3240	0/30m	6958	22	7	0/3240	0/30m
75	3	2	3	7256	21	7	0/3240	0/30m	7256	21	7	0/3240	0/30m
75	3	3	3	7554	21	7	0/3240	0/30m	7554	21	7	0/3240	0/30m

75	3	4	3	7852	21	6	0/3240	0/30m	7852	21	6	0/3240	0/30m
75	3	5	3	8150	20	7	0/3240	0/30m	8150	20	7	0/3240	0/30m
75	3	6	3	8448	20	6	0/3240	0/30m	8448	20	6	0/3240	0/30m
75	3	7	3	8746	19	7	0/3240	0/30m	8746	19	7	0/3240	0/30m

Πίνακας 3.15



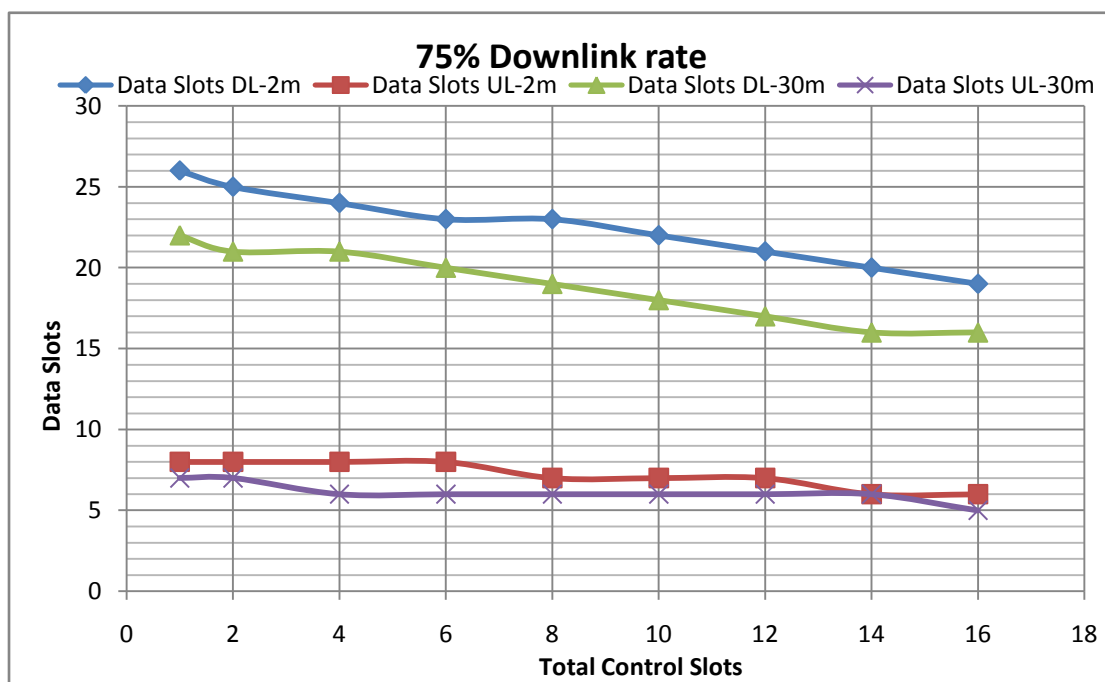
Σχήμα 3.29

Δεδομένα				Αποτελέσματα									
				Transmit Details					Receive Details				
Max Range 2 miles													
Downlink Data Rate %	Total Number UACK Slots	DACK Slots	Control Slots	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay (Actual/MaxRange) (bits)	Approximate distance (Actual/MaxRange)(miles)	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay (Actual/MaxRange) (bits)	Approximate distance (Actual/MaxRange)(miles)
75	3	3	1	3850	26	8	0/216	0/2m	3850	26	8	0/216	0/2m
75	3	3	2	4190	25	8	0/216	0/2m	4190	25	8	0/216	0/2m
75	3	3	4	4870	24	8	0/216	0/2m	4870	24	8	0/216	0/2m
75	3	3	6	5550	23	8	0/216	0/2m	5550	23	8	0/216	0/2m
75	3	3	8	6230	23	7	0/216	0/2m	6230	23	7	0/216	0/2m
75	3	3	10	6910	22	7	0/216	0/2m	6910	22	7	0/216	0/2m
75	3	3	12	7590	21	7	0/216	0/2m	7590	21	7	0/216	0/2m
75	3	3	14	8270	20	6	0/216	0/2m	8270	20	6	0/216	0/2m
75	3	3	16	8970	19	6	0/216	0/2m	8970	19	6	0/216	0/2m



Max Range 30 miles													
75	3	3	1	6874	22	7	0/3240	0/30m	6874	22	7	0/3240	0/30m
75	3	3	2	7214	21	7	0/3240	0/30m	7214	21	7	0/3240	0/30m
75	3	3	4	7894	21	6	0/3240	0/30m	7894	21	6	0/3240	0/30m
75	3	3	6	8574	20	6	0/3240	0/30m	8574	20	6	0/3240	0/30m
75	3	3	8	9254	19	6	0/3240	0/30m	9254	19	6	0/3240	0/30m
75	3	3	10	9934	18	6	0/3240	0/30m	9934	18	6	0/3240	0/30m
75	3	3	12	10614	17	6	0/3240	0/30m	10614	17	6	0/3240	0/30m
75	3	3	14	11294	16	6	0/3240	0/30m	11294	16	6	0/3240	0/30m
75	3	3	16	11974	16	5	0/3240	0/30m	11974	16	5	0/3240	0/30m

Πίνακας 3.16



Σχήμα 3.30

Από τους πίνακες 3.14 – 3.16 παρατηρούμε ότι με την αύξηση των ack και των control slots αυξάνονται, όπως είναι φυσικό και τα bits της επικεφαλίδας (overhead bits). Ακόμη διαπιστώνεται ότι η αύξηση της μέγιστης απόστασης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των overhead bits από 34% ως 44%. Το ποσοστό αυτό μειώνεται όσο αυξάνονται τα ack και τα control slots.

Συγκεκριμένα, παρατηρούμε από το διάγραμμα του σχήματος 3.28, ότι με την αύξηση των uplink acknowledgment slots μειώνονται σταθερά τα slots δεδομένων για το downlink ενώ για το uplink παρατηρούμε ότι τα slots δεδομένων παρουσιάζουν πολύ μικρές αυξομειώσεις. Τα data slots του downlink μειώνονται κατά ένα με κάθε αύξηση δύο ack slots για max range 2 μίλια ενώ για την περίπτωση που ρυθμίζεται στα 30 μίλια τα downlink data slots είναι σταθερά καθοδικά. Τα uplink data slots παραμένουν σταθερά μέχρι που τα UACK γίνονται τέσσερα για max range 2 μίλια και μέχρι τα τρία για max range 30 μίλια.

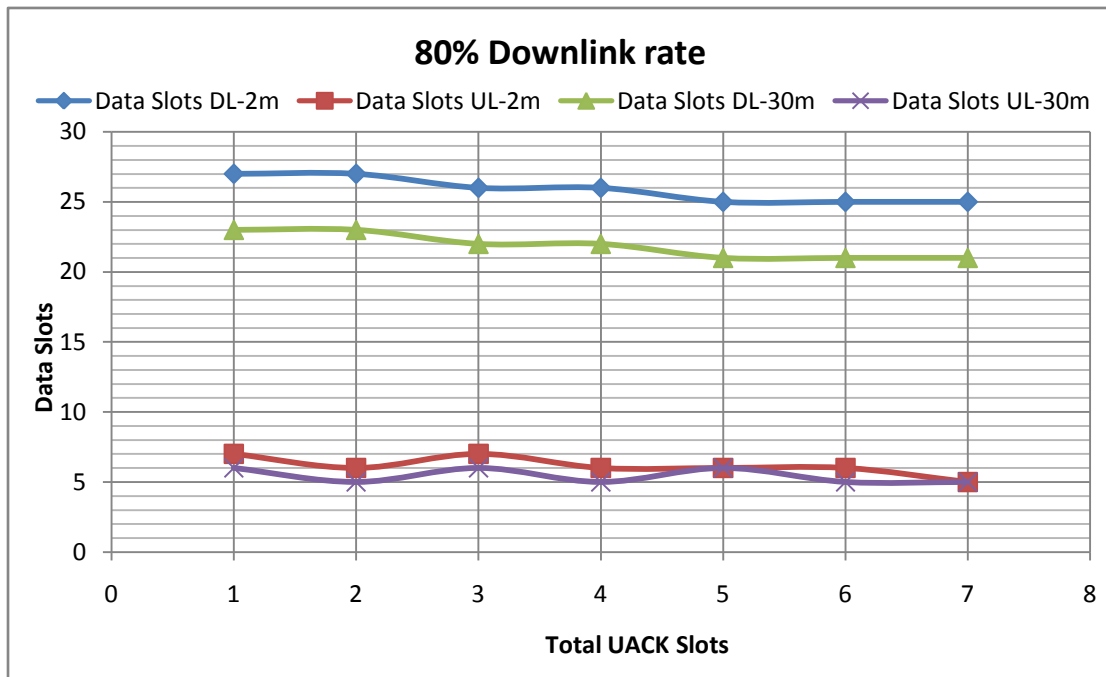
Από το διάγραμμα του σχήματος 3.29 είναι εμφανές ότι όταν μεταβάλλονται τα downlink acknowledgment slots τα data slots παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά όπως και κατά τη μεταβολή των uplink acknowledgment slots, με τη διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση η μείωση των downlink data slots είναι πιο αργή και τα uplink data slots παρουσιάζουν μεγαλύτερη σταθερότητα.

Και στην περίπτωση που μεταβάλλονται τα control slots τα slots δεδομένων μειώνονται σταθερά για το downlink και πιο ομαλά για το uplink όπως και στην περίπτωση της αύξησης των acknowledgment.

Όσον αφορά την αύξηση του max range το αποτέλεσμα είναι, εκτός από την αύξηση των overhead bits και η μείωση, όπως είναι φυσικό, των data slots. Παρατηρούμε όμως από τα διαγράμματα ότι η πτώση για τα uplink data slots είναι μικρότερη από ότι στα downlink data slots.

Δεδομένα				Αποτελέσματα									
				Transmit Details					Receive Details				
Max Range 2 miles													
Downlink Data Rate %	Total Number UACK Slots	DACK Slots	Control Slots	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay (Actual/MaxRange) (bits)	Approximate distance (Actual/MaxRange)(miles)	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay (Actual/MaxRange) (bits)	Approximate distance (Actual/MaxRange)(miles)
80	1	3	3	3850	27	7	0/216	0/2m	3850	27	7	0/216	0/2m
80	2	3	3	4190	27	6	0/216	0/2m	4190	27	6	0/216	0/2m
80	3	3	3	4530	26	7	0/216	0/2m	4530	26	7	0/216	0/2m
80	4	3	3	4870	26	6	0/216	0/2m	4870	26	6	0/216	0/2m
80	5	3	3	5210	25	6	0/216	0/2m	5210	25	6	0/216	0/2m
80	6	3	3	5550	25	6	0/216	0/2m	5550	25	6	0/216	0/2m
80	7	3	3	5890	25	5	0/216	0/2m	5890	25	5	0/216	0/2m
Max Range 30 miles													
80	1	3	3	6874	23	6	0/3240	0/30m	6874	23	6	0/3240	0/30m
80	2	3	3	7214	23	5	0/3240	0/30m	7214	23	5	0/3240	0/30m
80	3	3	3	7554	22	6	0/3240	0/30m	7554	22	6	0/3240	0/30m
80	4	3	3	7894	22	5	0/3240	0/30m	7894	22	5	0/3240	0/30m
80	5	3	3	8234	21	6	0/3240	0/30m	8234	21	6	0/3240	0/30m
80	6	3	3	8574	21	5	0/3240	0/30m	8574	21	5	0/3240	0/30m
80	7	3	3	8914	21	5	0/3240	0/30m	8914	21	5	0/3240	0/30m

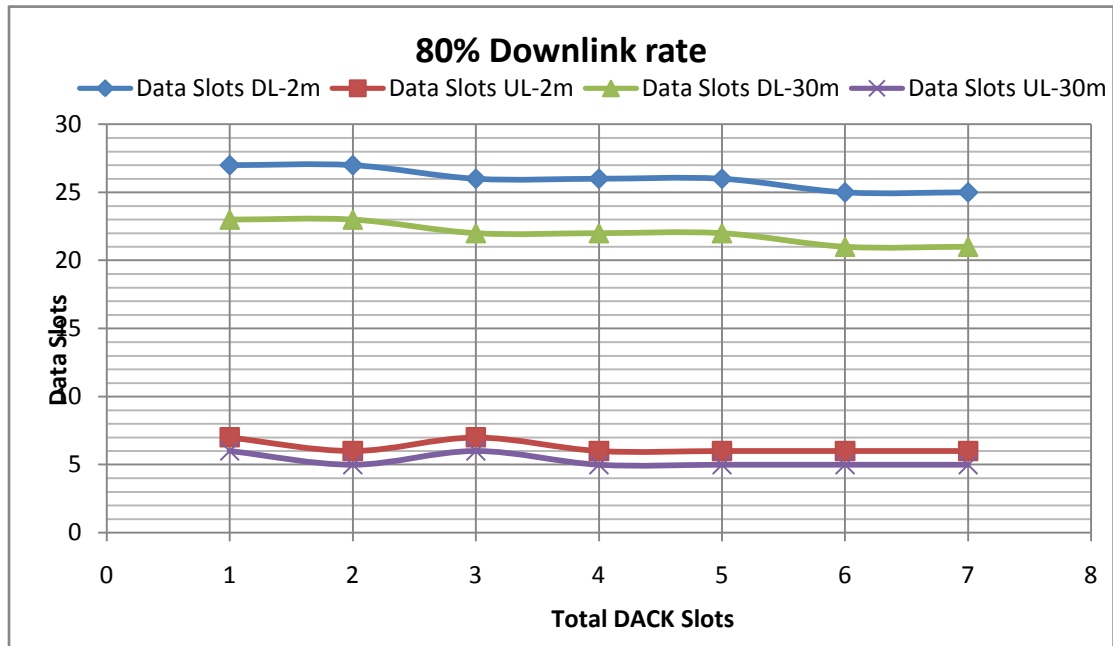
Πίνακας 3.17



Σχήμα 3.31

Δεδομένα				Αποτελέσματα									
				Transmit Details					Receive Details				
Max Range 2 miles													
Downlink Data Rate %	Total Number UACK Slots	DACK Slots	Control Slots	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay (Actual/Max Range) (bits)	Approximate distance (Actual/Max Range)(miles)	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay (Actual/Max Range) (bits)	Approximate distance (Actual/Max Range)(miles)
80	3	1	3	3934	27	7	0/216	0/2m	3934	27	7	0/216	0/2m
80	3	2	3	4232	27	6	0/216	0/2m	4232	27	6	0/216	0/2m
80	3	3	3	4530	26	7	0/216	0/2m	4530	26	7	0/216	0/2m
80	3	4	3	4828	26	6	0/216	0/2m	4828	26	6	0/216	0/2m
80	3	5	3	5126	26	6	0/216	0/2m	5126	26	6	0/216	0/2m
80	3	6	3	5424	25	6	0/216	0/2m	5424	25	6	0/216	0/2m
80	3	7	3	5722	25	6	0/216	0/2m	5722	25	6	0/216	0/2m
Max Range 30 miles													
80	3	1	3	6958	23	6	0/3240	0/30m	6958	23	6	0/3240	0/30m
80	3	2	3	7256	23	5	0/3240	0/30m	7256	23	5	0/3240	0/30m
80	3	3	3	7554	22	6	0/3240	0/30m	7554	22	6	0/3240	0/30m
80	3	4	3	7852	22	5	0/3240	0/30m	7852	22	5	0/3240	0/30m
80	3	5	3	8150	22	5	0/3240	0/30m	8150	22	5	0/3240	0/30m
80	3	6	3	8448	21	5	0/3240	0/30m	8448	21	5	0/3240	0/30m
80	3	7	3	8746	21	5	0/3240	0/30m	8746	21	5	0/3240	0/30m

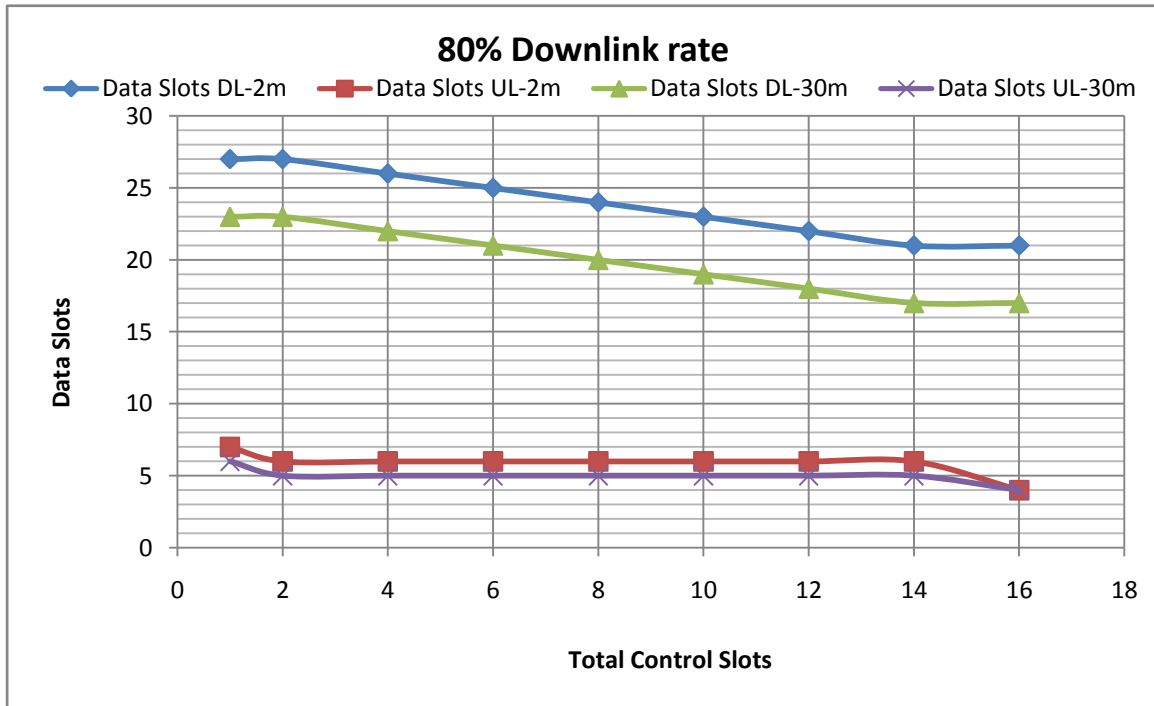
Πίνακας 3.18



Σχήμα 3.32

Δεδομένα				Αποτελέσματα									
				Transmit Details					Receive Details				
<b>Max Range 2 miles</b>													
Downlink Data Rate %	Total Number UACK Slots	DACK Slots	Control Slots	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay (Actual/Max Range) (bits)	Approximate distance (Actual/Max Range)(miles)	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay (Actual/Max Range) (bits)	Approximate distance (Actual/Max Range)(miles)
80	3	3	1	3850	27	7	0/216	0/2m	3850	27	7	0/216	0/2m
80	3	3	2	4190	27	6	0/216	0/2m	4190	27	6	0/216	0/2m
80	3	3	4	4870	26	6	0/216	0/2m	4870	26	6	0/216	0/2m
80	3	3	6	5550	25	6	0/216	0/2m	5550	25	6	0/216	0/2m
80	3	3	8	6230	24	6	0/216	0/2m	6230	24	6	0/216	0/2m
80	3	3	10	6910	23	6	0/216	0/2m	6910	23	6	0/216	0/2m
80	3	3	12	7590	22	6	0/216	0/2m	7590	22	6	0/216	0/2m
80	3	3	14	8270	21	6	0/216	0/2m	8270	21	6	0/216	0/2m
80	3	3	16	8970	21	4	0/216	0/2m	8270	21	4	0/216	0/2m
<b>Max Range 30 miles</b>													
80	3	3	1	6874	23	6	0/3240	0/30m	6874	23	6	0/3240	0/30m
80	3	3	2	7214	23	5	0/3240	0/30m	7214	23	5	0/3240	0/30m
80	3	3	4	7894	22	5	0/3240	0/30m	7894	22	5	0/3240	0/30m
80	3	3	6	8574	21	5	0/3240	0/30m	8574	21	5	0/3240	0/30m
80	3	3	8	9254	20	5	0/3240	0/30m	9254	20	5	0/3240	0/30m
80	3	3	10	9934	19	5	0/3240	0/30m	9934	19	5	0/3240	0/30m
80	3	3	12	10614	18	5	0/3240	0/30m	10614	18	5	0/3240	0/30m
80	3	3	14	11294	17	5	0/3240	0/30m	11294	17	5	0/3240	0/30m
80	3	3	16	11974	17	4	0/3240	0/30m	11974	17	4	0/3240	0/30m

Πίνακας 3.19



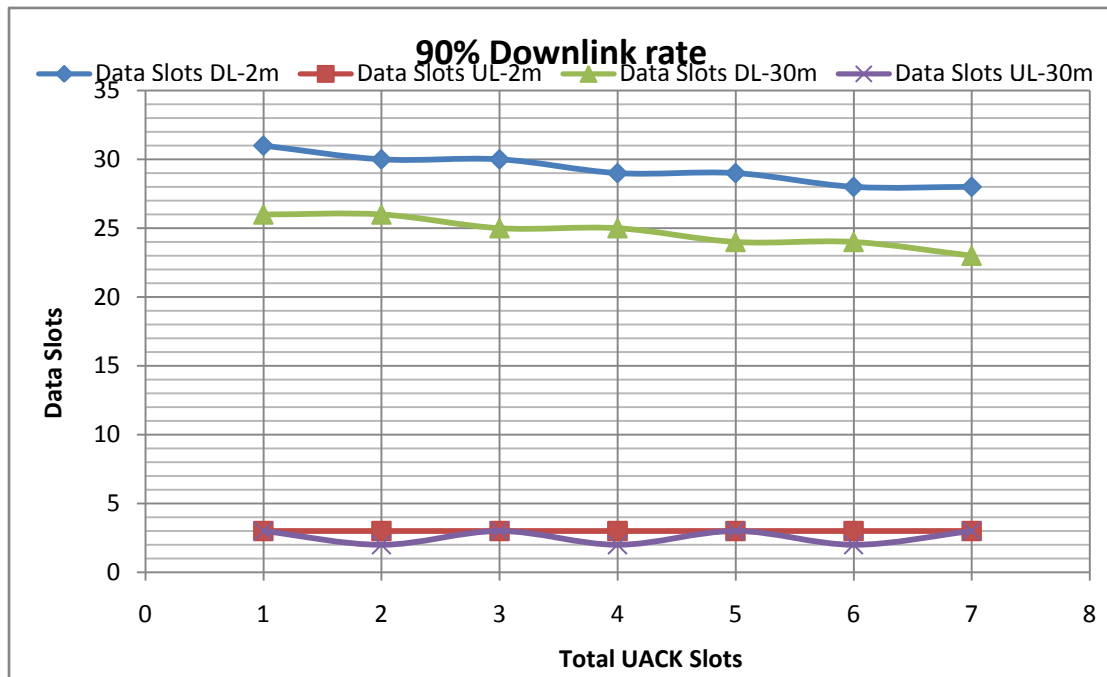
Σχήμα 3.33

Στους πίνακες 3.17 – 3.20 και στα σχήματα 3.31 – 3.33 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις μετρήσεις όπου το downlink rate ήταν ρυθμισμένο στο 80%. Από τους πίνακες κάνουμε τις ίδιες παρατηρήσεις που κάναμε και από τους πίνακες 3.14 – 3.16 με τη διαφορά εδώ ότι τα overhead bits είναι περισσότερα για το ίδιο πλήθος acknowledgment και control slots. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε από το διάγραμμα του σχήματος 3.31, ότι με την αύξηση των uplink acknowledgment slots μειώνονται σταθερά τα slots δεδομένων για το downlink ενώ για το uplink παρατηρούμε ότι τα slots δεδομένων παρουσιάζουν πολύ μικρές αυξομειώσεις. Από το διάγραμμα του σχήματος 3.32 είναι εμφανές ότι όταν μεταβάλλονται τα downlink acknowledgment slots τα data slots παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά όπως και κατά τη μεταβολή των uplink acknowledgment slots. Και στην περίπτωση που μεταβάλλονται τα control slots τα slots δεδομένων μειώνονται σταθερά για το downlink και πιο ομαλά για το uplink όπως και στην περίπτωση της αύξησης των acknowledgment. Παρατηρούμε ότι τα uplink data slots για max range 2 μίλια, παρουσιάζουν μείωση κατά 2 slots στην τελευταία μέτρηση, μεταβολή που δεν σημειώθηκε όταν το downlink rate ήταν 75%.

Όσον αφορά την αύξηση του max range το αποτέλεσμα είναι αντίστοιχα με αυτά που παρατηρήσαμε για downlink rate 75%.

Δεδομένα				Αποτελέσματα									
				Transmit Details					Receive Details				
Max Range 2 miles													
Downlink Data Rate %	Total Number UACK Slots	DACK Slots	Control Slots	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay (Actual/MaxRange) (bits)	Approximate distance (Actual/MaxRange)(miles)	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay (Actual/MaxRange) (bits)	Approximate distance (Actual/MaxRange)(miles)
90	1	3	3	3850	31	3	0/216	0/2m	3850	31	3	0/216	0/2m
90	2	3	3	4190	30	3	0/216	0/2m	4190	30	3	0/216	0/2m
90	3	3	3	4530	30	3	0/216	0/2m	4530	30	3	0/216	0/2m
90	4	3	3	4870	29	3	0/216	0/2m	4870	29	3	0/216	0/2m
90	5	3	3	5210	29	3	0/216	0/2m	5210	29	3	0/216	0/2m
90	6	3	3	5550	28	3	0/216	0/2m	5550	28	3	0/216	0/2m
90	7	3	3	5890	28	3	0/216	0/2m	5890	28	3	0/216	0/2m
90													
90	1	3	3	6874	26	3	0/3240	0/30m	6874	26	3	0/3240	0/30m
90	2	3	3	7214	26	2	0/3240	0/30m	7214	26	2	0/3240	0/30m
90	3	3	3	7554	25	3	0/3240	0/30m	7554	25	3	0/3240	0/30m
90	4	3	3	7894	25	2	0/3240	0/30m	7894	25	2	0/3240	0/30m
90	5	3	3	8234	24	3	0/3240	0/30m	8234	24	3	0/3240	0/30m
90	6	3	3	8574	24	2	0/3240	0/30m	8574	24	2	0/3240	0/30m
90	7	3	3	8914	23	3	0/3240	0/30m	8914	23	3	0/3240	0/30m

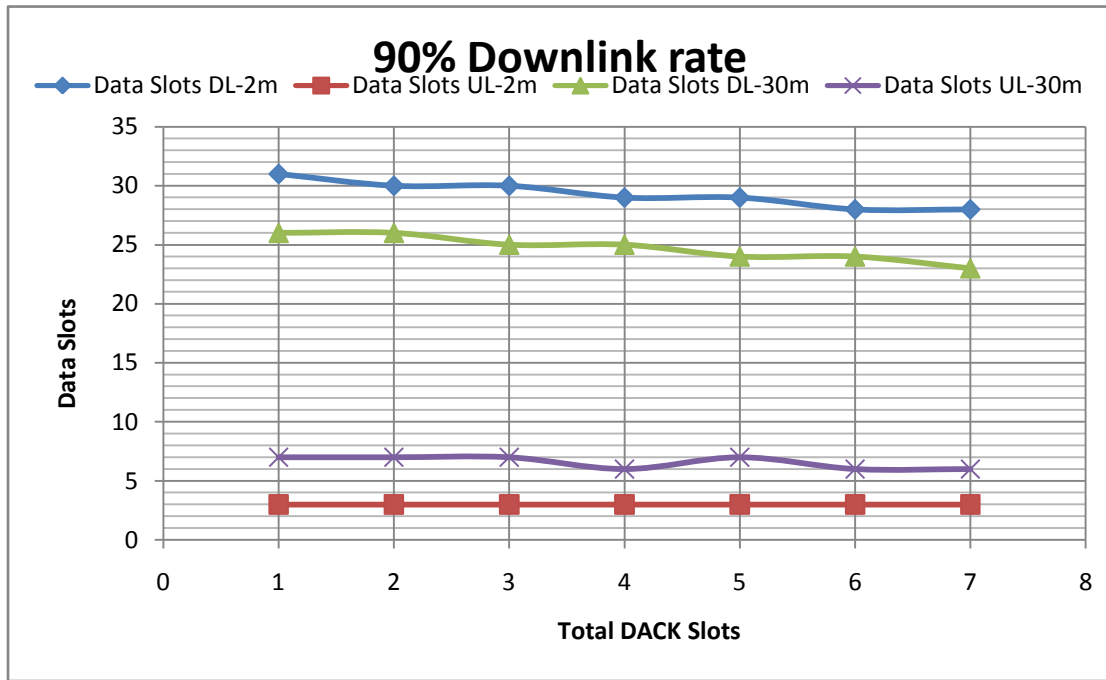
Πίνακας3.20



Σχήμα 3.34

Δεδομένα				Αποτελέσματα									
				Transmit Details					Receive Details				
Max Range 2 miles													
Downlink Data Rate %	Total Number UACK Slots	DACK Slots	Control Slots	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay (Actual/MaxRange) (bits)	Approximate distance (Actual/MaxRange)(miles)	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay (Actual/MaxRange) (bits)	Approximate distance (Actual/MaxRange)(miles)
90	3	1	3	3934	31	3	0/216	0/2m	3934	31	3	0/216	0/2m
90	3	2	3	4232	30	3	0/216	0/2m	4232	30	3	0/216	0/2m
90	3	3	3	4530	30	3	0/216	0/2m	4530	30	3	0/216	0/2m
90	3	4	3	4828	29	3	0/216	0/2m	4828	29	3	0/216	0/2m
90	3	5	3	5126	29	3	0/216	0/2m	5126	29	3	0/216	0/2m
90	3	6	3	5424	28	3	0/216	0/2m	5424	28	3	0/216	0/2m
90	3	7	3	5722	28	3	0/216	0/2m	5722	28	3	0/216	0/2m
Max Range 30 miles													
90	3	1	3	6958	26	7	0/3240	0/30m	6958	26	7	0/3240	0/30m
90	3	2	3	7256	26	7	0/3240	0/30m	7256	26	7	0/3240	0/30m
90	3	3	3	7554	25	7	0/3240	0/30m	7554	25	7	0/3240	0/30m
90	3	4	3	7852	25	6	0/3240	0/30m	7852	25	6	0/3240	0/30m
90	3	5	3	8150	24	7	0/3240	0/30m	8150	24	7	0/3240	0/30m
90	3	6	3	8448	24	6	0/3240	0/30m	8448	24	6	0/3240	0/30m
90	3	7	3	8746	23	6	0/3240	0/30m	8746	23	6	0/3240	0/30m

Πίνακας 3.21

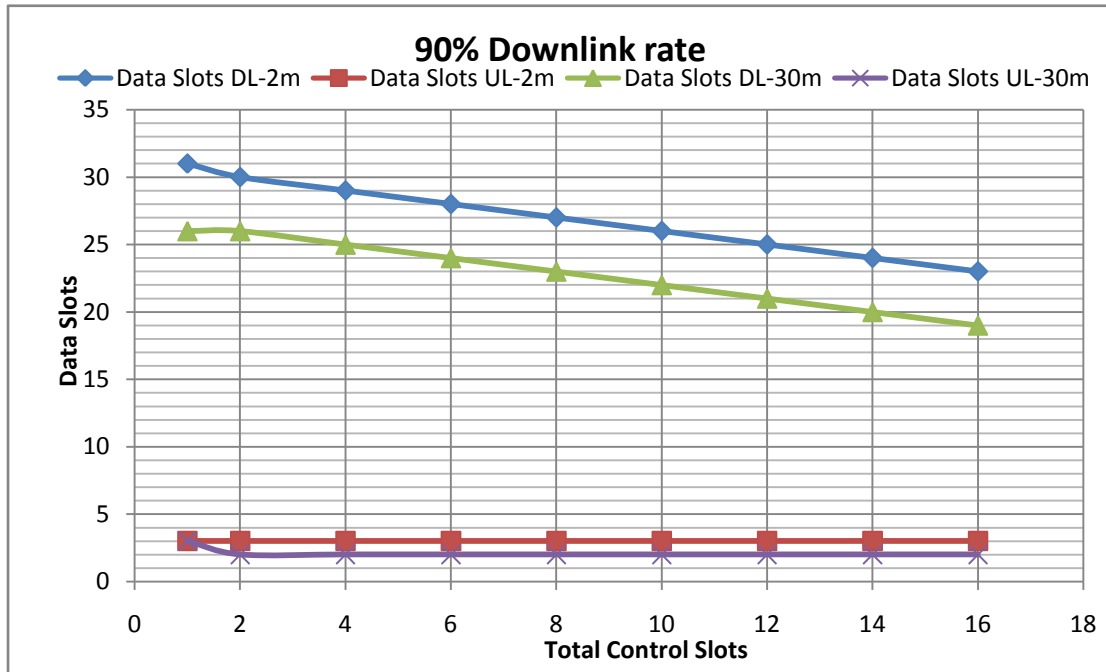


Σχήμα 3.35

Δεδομένα				Αποτελέσματα									
				Transmit Details					Receive Details				
Max Range 2 miles													
Downlink Data Rate %	Total Number UACK Slots	DACK Slots	Control Slots	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay (Actual/MaxRange) (bits)	Approximate distance (Actual/MaxRange)(miles)	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay (Actual/MaxRange) (bits)	Approximate distance (Actual/MaxRange)(miles)
90	3	3	1	3850	31	3	0/216	0/2m	3850	31	3	0/216	0/2m
90	3	3	2	4190	30	3	0/216	0/2m	4190	30	3	0/216	0/2m
90	3	3	4	4870	29	3	0/216	0/2m	4870	29	3	0/216	0/2m
90	3	3	6	5550	28	3	0/216	0/2m	5550	28	3	0/216	0/2m
90	3	3	8	6230	27	3	0/216	0/2m	6230	27	3	0/216	0/2m
90	3	3	10	6910	26	3	0/216	0/2m	6910	26	3	0/216	0/2m
90	3	3	12	7590	25	3	0/216	0/2m	7590	25	3	0/216	0/2m
90	3	3	14	8270	24	3	0/216	0/2m	8270	24	3	0/216	0/2m
90	3	3	16	8970	23	3	0/216	0/2m	8270	23	3	0/216	0/2m
Max Range 30 miles													
90	3	3	1	6874	26	3	0/3240	0/30m	6874	26	3	0/3240	0/30m
90	3	3	2	7214	26	2	0/3240	0/30m	7214	26	2	0/3240	0/30m
90	3	3	4	7894	25	2	0/3240	0/30m	7894	25	2	0/3240	0/30m
90	3	3	6	8574	24	2	0/3240	0/30m	8574	24	2	0/3240	0/30m
90	3	3	8	9254	23	2	0/3240	0/30m	9254	23	2	0/3240	0/30m
90	3	3	10	9934	22	2	0/3240	0/30m	9934	22	2	0/3240	0/30m
90	3	3	12	10614	21	2	0/3240	0/30m	10614	21	2	0/3240	0/30m
90	3	3	14	11294	20	2	0/3240	0/30m	11294	20	2	0/3240	0/30m
90	3	3	16	11974	19	2	0/3240	0/30m	11974	19	2	0/3240	0/30m



Πίνακας 3.22



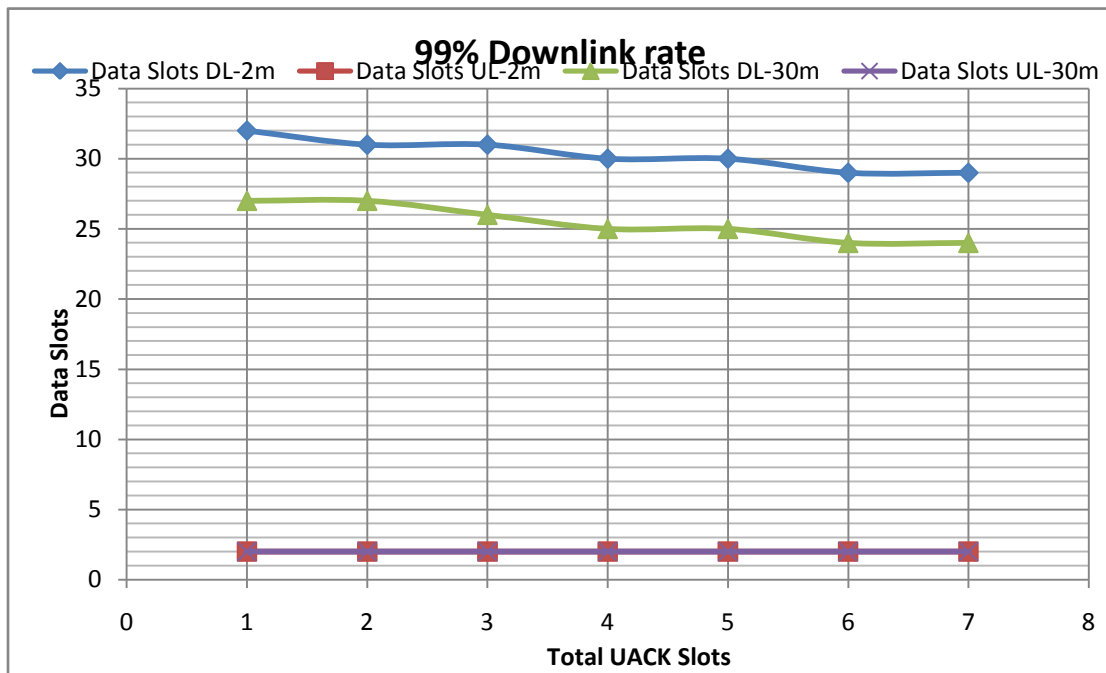
Σχήμα 3.36

Στους πίνακες 3.20 – 3.22 και στα σχήματα 3.34 – 3.36 παρουσιάζονται οι μετρήσεις για downlink rate 90%. Τα αποτελέσματα και σε αυτή την περίπτωση είναι παρόμοια με αυτά που παρατηρήθηκαν για downlink rate 75% και 80%. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε από το διάγραμμα του σχήματος 3.34, ότι με την αύξηση των uplink acknowledgment slots μειώνονται σταθερά τα slots δεδομένων για το downlink ενώ για το uplink παρατηρούμε ότι τα slots δεδομένων παρουσιάζουν πολύ μικρές αυξομειώσεις στην περίπτωση όπου το max range είναι 30 μίλια, αλλά παραμένουν σταθερά και ίσα με 3 όταν το max range 2 μίλια. Στο σχήμα 3.35, διαπιστώνεται ότι τα slots δεδομένων για το downlink παρουσιάζουν σταθερή μείωση όπως και στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις. Τα uplink data slots όμως, για την μέγιστη εμβέλεια 2 μίλια παραμένουν σταθερά και ίσα με 3, ενώ για μέγιστη εμβέλεια 30 μίλια είναι 6-7 παρουσιάζοντας μικρές αυξομειώσεις. Στην περίπτωση της μεταβολής των control slots, τα downlink data slots παρουσιάζουν σταθερή μείωση. Τα uplink data slots είναι σταθερά 3 για μέγιστη εμβέλεια 2 μίλια και σταθερά 2 για μέγιστη εμβέλεια 30 μίλια, εκτός από μία μικρή απόκλιση που έχουμε στην 1<sup>η</sup> μέτρηση.

Δεδομένα				Αποτελέσματα									
				Transmit Details						Receive Details			
Max Range 2 miles													
Downlink	Total	DACK	Control	Total Frame	Data Slots	Data Slots	AirDelay	Approximate	Total Frame	Data Slots	Data	AirDelay	Approxim

Data Rate %	Number UACK Slots	Slots	Slots	Overhead Bits	Downlink	Uplink	(Actual/MaxRange)(bits)	distance (Actual/MaxRange)(miles)	Overhead Bits	Downlink	Slots Uplink	(Actual/MaxRange) (bits)	ate distance (Actual/MaxRange)(miles)
99	1	3	3	3850	32	2	0/216	0/2m	3850	32	2	0/216	0/2m
99	2	3	3	4190	31	2	0/216	0/2m	4190	31	2	0/216	0/2m
99	3	3	3	4530	31	2	0/216	0/2m	4530	31	2	0/216	0/2m
99	4	3	3	4870	30	2	0/216	0/2m	4870	30	2	0/216	0/2m
99	5	3	3	5210	30	2	0/216	0/2m	5210	30	2	0/216	0/2m
99	6	3	3	5550	29	2	0/216	0/2m	5550	29	2	0/216	0/2m
99	7	3	3	5890	29	2	0/216	0/2m	5890	29	2	0/216	0/2m
<b>Max Range 30 miles</b>													
99	1	3	3	6874	27	2	0/3240	0/30m	6874	27	2	0/3240	0/30m
99	2	3	3	7214	27	2	0/3240	0/30m	7214	27	2	0/3240	0/30m
99	3	3	3	7554	26	2	0/3240	0/30m	7554	26	2	0/3240	0/30m
99	4	3	3	7894	25	2	0/3240	0/30m	7894	25	2	0/3240	0/30m
99	5	3	3	8234	25	2	0/3240	0/30m	8234	25	2	0/3240	0/30m
99	6	3	3	8574	24	2	0/3240	0/30m	8574	24	2	0/3240	0/30m
99	7	3	3	8914	24	2	0/3240	0/30m	8914	24	2	0/3240	0/30m

Πίνακας3.23

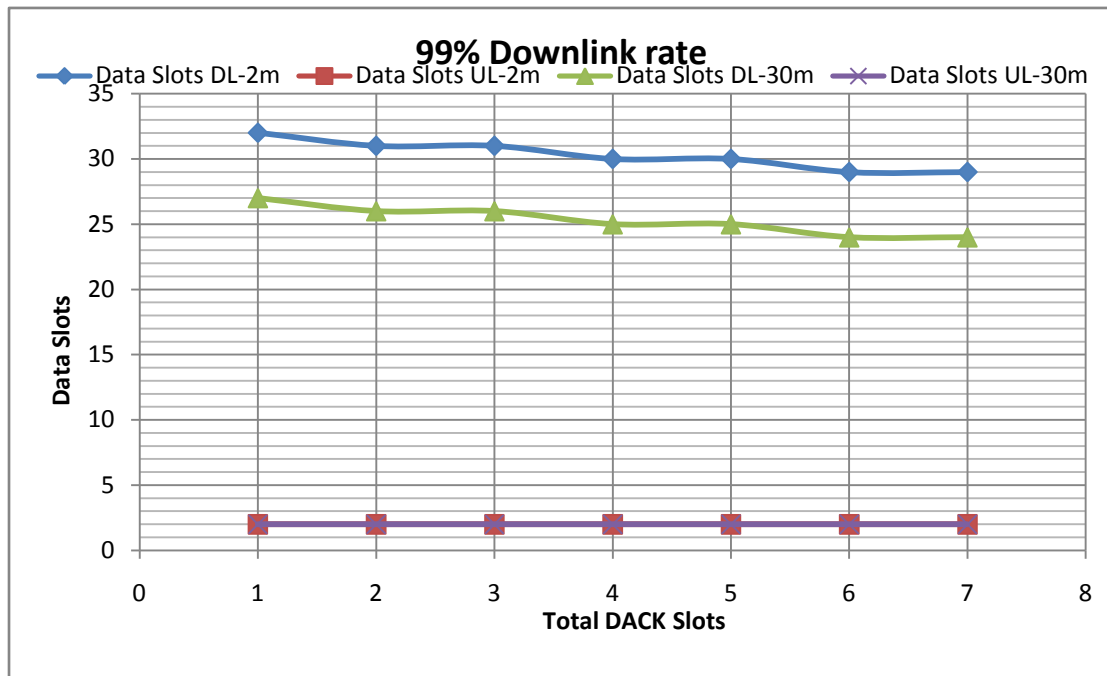


Σχήμα 3.37

Δεδομένα				Αποτελέσματα	
				Max Range 2 miles	
				Transmit Details	
				Receive Details	

Downlink Data Rate %	Total Number UACK Slots	DACK Slots	Control Slots	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay (Actual/MaxRange) (bits)	Approximate distance (Actual/MaxRange)(miles)	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay (Actual/MaxRange) (bits)	Approximate distance (Actual/MaxRange)(miles)
99	3	1	3	3934	32	2	0/216	0/2m	3934	32	2	0/216	0/2m
99	3	2	3	4232	31	2	0/216	0/2m	4232	31	2	0/216	0/2m
99	3	3	3	4530	31	2	0/216	0/2m	4530	31	2	0/216	0/2m
99	3	4	3	4828	30	2	0/216	0/2m	4828	30	2	0/216	0/2m
99	3	5	3	5126	30	2	0/216	0/2m	5126	30	2	0/216	0/2m
99	3	6	3	5424	29	2	0/216	0/2m	5424	29	2	0/216	0/2m
99	3	7	3	5722	29	2	0/216	0/2m	5722	29	2	0/216	0/2m
<b>Max Range 30 miles</b>													
99	3	1	3	6958	27	2	0/3240	0/30m	6958	27	2	0/3240	0/30m
99	3	2	3	7256	26	2	0/3240	0/30m	7256	26	2	0/3240	0/30m
99	3	3	3	7554	26	2	0/3240	0/30m	7554	26	2	0/3240	0/30m
99	3	4	3	7852	25	2	0/3240	0/30m	7852	25	2	0/3240	0/30m
99	3	5	3	8150	25	2	0/3240	0/30m	8150	25	2	0/3240	0/30m
99	3	6	3	8448	24	2	0/3240	0/30m	8448	24	2	0/3240	0/30m
99	3	7	3	8746	24	2	0/3240	0/30m	8746	24	2	0/3240	0/30m

Πίνακας 3.24

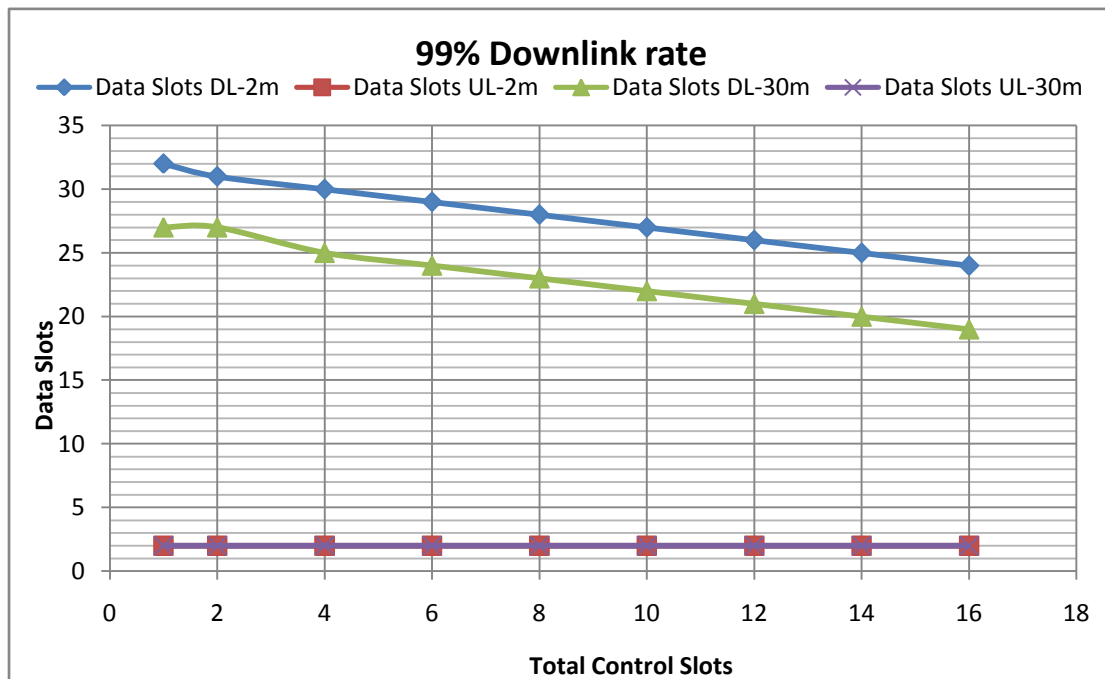


Σχήμα 3.38

Δεδομένα				Αποτελέσματα									
				Transmit Details					Receive Details				
<b>Max Range 2 miles</b>													
Downlink	Total	DACK	Control	Total Frame	Data Slots	Data	AirDelay	Approximate	Total	Data Slots	Data	AirDelay	Approximate

Data Rate %	Number UACK Slots	Slots	Slots	Overhead Bits	Downlink	Slots Uplink	(Actual/MaxRange)(bits)	distance (Actual/MaxRange)(miles)	Frame Overhead Bits	Downlink	Slots Uplink	(Actual/MaxRange)(bits)	distance (Actual/MaxRange)(miles)
99	3	3	1	3850	32	2	0/216	0/2m	3850	32	2	0/216	0/2m
99	3	3	2	4190	31	2	0/216	0/2m	4190	31	2	0/216	0/2m
99	3	3	4	4870	30	2	0/216	0/2m	4870	30	2	0/216	0/2m
99	3	3	6	5550	29	2	0/216	0/2m	5550	29	2	0/216	0/2m
99	3	3	8	6230	28	2	0/216	0/2m	6230	28	2	0/216	0/2m
99	3	3	10	6910	27	2	0/216	0/2m	6910	27	2	0/216	0/2m
99	3	3	12	7590	26	2	0/216	0/2m	7590	26	2	0/216	0/2m
99	3	3	14	8270	25	2	0/216	0/2m	8270	25	2	0/216	0/2m
99	3	3	16	8970	24	2	0/216	0/2m	8270	24	2	0/216	0/2m
<b>Max Range 30 miles</b>													
99	3	3	1	6874	27	2	0/3240	0/30m	6874	27	2	0/3240	0/30m
99	3	3	2	7214	27	2	0/3240	0/30m	7214	27	2	0/3240	0/30m
99	3	3	4	7894	25	2	0/3240	0/30m	7894	25	2	0/3240	0/30m
99	3	3	6	8574	24	2	0/3240	0/30m	8574	24	2	0/3240	0/30m
99	3	3	8	9254	23	2	0/3240	0/30m	9254	23	2	0/3240	0/30m
99	3	3	10	9934	22	2	0/3240	0/30m	9934	22	2	0/3240	0/30m
99	3	3	12	10614	21	2	0/3240	0/30m	10614	21	2	0/3240	0/30m
99	3	3	14	11294	20	2	0/3240	0/30m	11294	20	2	0/3240	0/30m
99	3	3	16	11974	19	2	0/3240	0/30m	11974	19	2	0/3240	0/30m

Πίνακας 3.25



Σχήμα 3.39

Στους πίνακες 3.23 – 3.25 και στα σχήματα 3.37 – 3.39 παρουσιάζονται οι μετρήσεις για downlink rate 99%. Τα αποτελέσματα και σε αυτή την περίπτωση είναι παρόμοια με αυτά που παρατηρήθηκαν για downlink rate 75%, 80% και 90%. Και στα τρία

διαγράμματα τα downlink data slots παρουσιάζουν καθοδική πορεία όπως και στις άλλες μετρήσεις. Η σημαντική διαφορά εδώ είναι πως για όλες τις τιμές των UACK, DACK και control slots το πλήθος των uplink data slots είναι σταθερό και ίσο με 2, που είναι και η ελάχιστη τιμή.

Από τους πίνακες 3.14 – 3.25 και τα σχήματα 3.28 – 3.39 γενικά διαπιστώνουμε ότι με την αύξηση του downlink rate αυξάνονται τα slots δεδομένων για την προς τα κάτω ζεύξη και μειώνονται αυτά που εξυπηρετούν την προς τα κάτω ζεύξη.

Στην τρίτη σειρά μετρήσεων μεταβάλλαμε την μέγιστη εμβέλεια (Max Range) και κατα συνέπεια και την καθυστέρηση και διατηρήσαμε σταθές τις τιμές των acknowledgment και control slots (στην default τιμή 3). Οι μετρήσεις έγιναν για 3 τιμές του downlink rate 25%, 50% και 75%. Στους πίνακες 3.26-3.28 φαίνονται τα αποτελέσματα για τις 3 αυτές τιμές. Στα διαγράμματα που φαίνονται στα σχήματα 3.40 και 3.41 φαίνονται σχηματικά οι μετρήσεις αυτές.

Frame Calculator															
		Transmit Details							Receive Details :						
Downlink Data	Max Range (miles)	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay Actual	Max Range	Approximate distance Actual	Max Range	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay Actual	Max Range	Approximate distance Actual	Max Range
75%	1	4422	25	8	0	108	0	1	4422	25	8	0	108	0	1
75%	2	4530	25	8	0	216	0	2	4530	25	8	0	216	0	2
75%	3	4638	25	7	0	324	0	3	4638	25	7	0	324	0	3
75%	4	4746	24	8	0	432	0	4	4746	24	8	0	432	0	4
75%	5	4854	24	8	0	540	0	5	4854	24	8	0	540	0	5
75%	6	4962	24	8	0	648	0	6	4962	24	8	0	648	0	6
75%	7	5070	24	8	0	756	0	7	5070	24	8	0	756	0	7
75%	8	5178	24	7	0	864	0	8	5178	24	7	0	864	0	8
75%	9	5286	24	7	0	972	0	9	5286	24	7	0	972	0	9
75%	10	5394	24	7	0	1080	0	10	5394	24	7	0	1080	0	10
75%	11	5502	23	8	0	1188	0	11	5502	23	8	0	1188	0	11
75%	12	5610	23	8	0	1296	0	12	5610	23	8	0	1296	0	12
75%	13	5718	23	8	0	1404	0	13	5718	23	8	0	1404	0	13
75%	14	5826	23	7	0	1512	0	14	5826	23	7	0	1512	0	14
75%	15	5934	23	7	0	1620	0	15	5934	23	7	0	1620	0	15
75%	16	6042	23	7	0	1728	0	16	6042	23	7	0	1728	0	16
75%	17	6150	23	7	0	1836	0	17	6150	23	7	0	1836	0	17

75%	18	6258	23	7	0	1944	0	18	6258	23	7	0	1944	0	18
75%	19	6366	22	7	0	2052	0	19	6366	22	7	0	2052	0	19
75%	20	6474	22	7	0	2160	0	20	6474	22	7	0	2160	0	20
75%	21	6582	22	7	0	2268	0	21	6582	22	7	0	2268	0	21
75%	22	6690	22	7	0	2376	0	22	6690	22	7	0	2376	0	22
75%	23	6798	22	7	0	2484	0	23	6798	22	7	0	2484	0	23
75%	24	6906	22	7	0	2592	0	24	6906	22	7	0	2592	0	24
75%	25	7014	22	7	0	2700	0	25	7014	22	7	0	2700	0	25
75%	26	7122	21	7	0	2808	0	26	7122	21	7	0	2808	0	26
75%	27	7230	21	7	0	2916	0	27	7230	21	7	0	2916	0	27
75%	28	7338	21	7	0	3024	0	28	7338	21	7	0	3024	0	28
75%	29	7446	21	7	0	3132	0	29	7446	21	7	0	3132	0	29
75%	30	7554	21	7	0	3240	0	30	7554	21	7	0	3240	0	30

Πίνακας 3.26

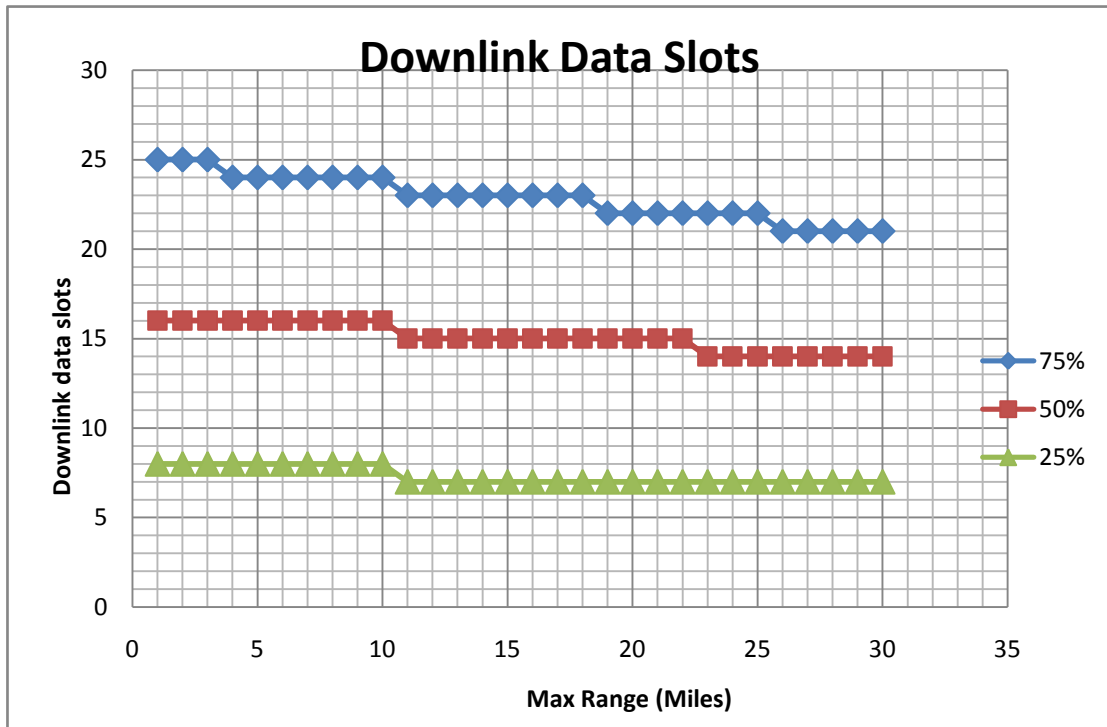
Frame Calculator															
		Transmit Details							Receive Details :						
Downlink Data	Max Range (miles)	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay Actual	Max Range	Approximate distance Actual	Max Range	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay Actual	Max Range	Approximate distance Actual	Max Range
50%	1	4422	16	16	0	108	0	1	4422	16	16	0	108	0	1
50%	2	4530	16	16	0	216	0	2	4530	16	16	0	216	0	2
50%	3	4638	16	16	0	324	0	3	4638	16	16	0	324	0	3
50%	4	4746	16	16	0	432	0	4	4746	16	16	0	432	0	4
50%	5	4854	16	15	0	540	0	5	4854	16	15	0	540	0	5
50%	6	4962	16	15	0	648	0	6	4962	16	15	0	648	0	6
50%	7	5070	16	15	0	756	0	7	5070	16	15	0	756	0	7
50%	8	5178	16	15	0	864	0	8	5178	16	15	0	864	0	8
50%	9	5286	16	15	0	972	0	9	5286	16	15	0	972	0	9
50%	10	5394	16	15	0	1080	0	10	5394	16	15	0	1080	0	10
50%	11	5502	15	15	0	1188	0	11	5502	15	15	0	1188	0	11
50%	12	5610	15	15	0	1296	0	12	5610	15	15	0	1296	0	12
50%	13	5718	15	15	0	1404	0	13	5718	15	15	0	1404	0	13
50%	14	5826	15	15	0	1512	0	14	5826	15	15	0	1512	0	14
50%	15	5934	15	15	0	1620	0	15	5934	15	15	0	1620	0	15
50%	16	6042	15	14	0	1728	0	16	6042	15	14	0	1728	0	16
50%	17	6150	15	14	0	1836	0	17	6150	15	14	0	1836	0	17
50%	18	6258	15	14	0	1944	0	18	6258	15	14	0	1944	0	18
50%	19	6366	15	14	0	2052	0	19	6366	15	14	0	2052	0	19
50%	20	6474	15	14	0	2160	0	20	6474	15	14	0	2160	0	20
50%	21	6582	15	14	0	2268	0	21	6582	15	14	0	2268	0	21
50%	22	6690	15	14	0	2376	0	22	6690	15	14	0	2376	0	22
50%	23	6798	14	14	0	2484	0	23	6798	14	14	0	2484	0	23
50%	24	6906	14	14	0	2592	0	24	6906	14	14	0	2592	0	24
50%	25	7014	14	14	0	2700	0	25	7014	14	14	0	2700	0	25

50%	26	7122	14	14	0	2808	0	26	7122	14	14	0	2808	0	26
50%	27	7230	14	14	0	2916	0	27	7230	14	14	0	2916	0	27
50%	28	7338	14	13	0	3024	0	28	7338	14	13	0	3024	0	28
50%	29	7446	14	13	0	3132	0	29	7446	14	13	0	3132	0	29
50%	30	7554	14	13	0	3240	0	30	7554	14	13	0	3240	0	30

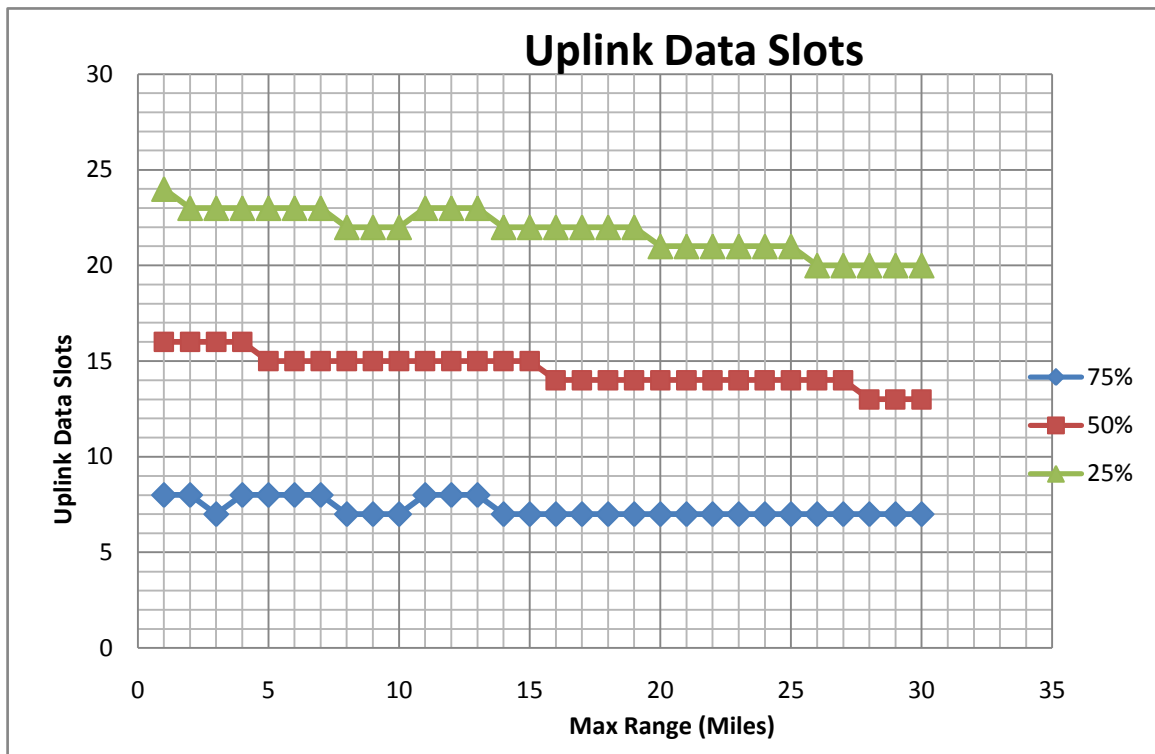
Πίνακας 2.27

Frame Calculator															
Transmit Details									Receive Details :						
Downlink Data	Max Range (miles)	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay Actual	Max Range	Approximate distance Actual	Max Range	Total Frame Overhead Bits	Data Slots Downlink	Data Slots Uplink	AirDelay Actual	Max Range	Approximate distance Actual	Max Range
25%	1	4422	8	24	0	108	0	1	4422	8	24	0	108	0	1
25%	2	4530	8	23	0	216	0	2	4530	8	23	0	216	0	2
25%	3	4638	8	23	0	324	0	3	4638	8	23	0	324	0	3
25%	4	4746	8	23	0	432	0	4	4746	8	23	0	432	0	4
25%	5	4854	8	23	0	540	0	5	4854	8	23	0	540	0	5
25%	6	4962	8	23	0	648	0	6	4962	8	23	0	648	0	6
25%	7	5070	8	23	0	756	0	7	5070	8	23	0	756	0	7
25%	8	5178	8	22	0	864	0	8	5178	8	22	0	864	0	8
25%	9	5286	8	22	0	972	0	9	5286	8	22	0	972	0	9
25%	10	5394	8	22	0	1080	0	10	5394	8	22	0	1080	0	10
25%	11	5502	7	23	0	1188	0	11	5502	7	23	0	1188	0	11
25%	12	5610	7	23	0	1296	0	12	5610	7	23	0	1296	0	12
25%	13	5718	7	23	0	1404	0	13	5718	7	23	0	1404	0	13
25%	14	5826	7	22	0	1512	0	14	5826	7	22	0	1512	0	14
25%	15	5934	7	22	0	1620	0	15	5934	7	22	0	1620	0	15
25%	16	6042	7	22	0	1728	0	16	6042	7	22	0	1728	0	16
25%	17	6150	7	22	0	1836	0	17	6150	7	22	0	1836	0	17
25%	18	6258	7	22	0	1944	0	18	6258	7	22	0	1944	0	18
25%	19	6366	7	22	0	2052	0	19	6366	7	22	0	2052	0	19
25%	20	6474	7	21	0	2160	0	20	6474	7	21	0	2160	0	20
25%	21	6582	7	21	0	2268	0	21	6582	7	21	0	2268	0	21
25%	22	6690	7	21	0	2376	0	22	6690	7	21	0	2376	0	22
25%	23	6798	7	21	0	2484	0	23	6798	7	21	0	2484	0	23
25%	24	6906	7	21	0	2592	0	24	6906	7	21	0	2592	0	24
25%	25	7014	7	21	0	2700	0	25	7014	7	21	0	2700	0	25
25%	26	7122	7	20	0	2808	0	26	7122	7	20	0	2808	0	26
25%	27	7230	7	20	0	2916	0	27	7230	7	20	0	2916	0	27
25%	28	7338	7	20	0	3024	0	28	7338	7	20	0	3024	0	28
25%	29	7446	7	20	0	3132	0	29	7446	7	20	0	3132	0	29
25%	30	7554	7	20	0	3240	0	30	7554	7	20	0	3240	0	30

Πίνακας 3.28



Σχήμα 3.40



Σχήμα 3.41



Από τους πίνακες παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η μέγιστη εμβέλεια τόσο αυξάνεται η καθυστέρηση για τη μέγιστη απόσταση και κατά συνέπεια και τα overhead bits. Από τους πίνακες και τα διαγράμματα είναι εμφανές ότι αυτό προκαλεί μείωση των data slots είτε αυτά είναι downlink είτε είναι uplink. Πιο συγκεκριμένα τα downlink slots για 75% downlink rate ξεκινούν από 25 slots και μειώνονται σταθερά φτάνοντας τα 21, για 50% ξεκινούν από 16 και φτάνουν τα 14, ενώ για το 25% ξεκινούν από 8 και φτάνουν τα 7. Δεν παρουσιάζονται σε καμία από αυτές τις περιπτώσεις αυξομειώσεις. Για τα uplink data slots η συμπεριφορά είναι παρόμοια αλλά στην περίπτωση αυτή έχουμε αυξομειώσεις. Έτσι, για 75% downlink rate από 8 slots και φτάνουν τα 7 χωρίς όμως να παρουσιάζουν σταθερή μείωση. Στο 50% ξεκινούν από 16, όπως και στο downlink, αλλά φτάνουν τα 13 παρουσιάζοντας μεγαλύτερη μείωση από το τα downlink data slots. Στην περίπτωση του 25% ξεκινούν από 24 και φτάνουν τα 20, παρουσιάζοντας και αυτά αυξομειώσεις.

## Κεφάλαιο 4

### Συμπεράσματα

Τα τελευταία χρόνια η ανάγκη ανάπτυξης ασύρματων συστημάτων πρόσβασης υψηλής ταχύτητας είναι όλο και πιο επιτακτική. Οι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (real time) και οι υψηλές απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσιών οδηγεί στην ανάπτυξη προηγμένων ασύρματων συστημάτων σταθερής πρόσβασης (BWA). Τέτοια συστήματα αναπτύχθηκαν σε υψηλές (10 – 30 MHz) αλλά και χαμηλές (2 – 11 MHz) συχνότητες ώστε να καλύψουν όλες τις απαιτήσεις των χρηστών. Στις υψηλές συχνότητες αντιμετωπίζονται πολλά προβλήματα που σχετίζονται με το περιβάλλον. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά των συστημάτων σε χαμηλές συχνότητες όπου δεν απαιτείται άδεια παραχώρησης της συχνότητας. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε το σύστημα Canopy της εταιρείας Motorola.

#### Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Στην μελέτη των τεχνικών χαρακτηριστικών εξετάστηκε η έκδοση του συστήματος στην μπάντα συχνοτήτων 5.7GHz. Η ψηφιακή διαμόρφωση που χρησιμοποιεί το βασικό σύστημα είναι BFSK, ενώ στις βελτιωμένες εκδόσεις για την επιτεύξη υψηλότερων ταχυτήτων μετάδοσης χρησιμοποιείται 4-FSK. Η FSK είναι μία μέθοδος ψηφιακής διαμόρφωσης όπου η στιγμιαία συχνότητα του σήματος παίρνει διακριτές τιμές ανάλογα με την τιμή του σήματος της ψηφιακής πληροφορίας. Στην BFSK έχουμε δύο στάθμες συχνοτήτων που η κάθε μία αντιστοιχεί σε ένα bit. Στην 4-FSK έχουμε τέσσερις στάθμες συχνοτήτων όπου η κάθε μία αντιστοιχεί σε ένα ζεύγος bit.

Η μέθοδος που υιοθετείται για την πολλαπλή πρόσβαση των χρηστών είναι πολυπλαξία χρόνου (TDMA). Το διατιθέμενο φάσμα χωρίζεται σε χρονοσχισμές (slots) όπου κάθε μία από αυτές τις χρονοσχισμές παραχωρείται σε έναν χρήστη είτε για να εκπέμψει είτε για να λάβει πληροφορία. Οι χρονοσχισμές επαναλαμβάνονται κυκλικά.

Για τον χωρισμό των καναλιών μέσα στην διατηθέμενη μπάντα συχνοτήτων λαμβάνεται υπόψη η προϋπόθεση τα κανάλια να έχουν απόσταση 20MHz για την αποφυγή των παρεμβολών. Στα 5.7GHz έχουμε 3 μη επικαλυπτόμενα κανάλια από τα οποία όμως μόνο τα 3 χρησιμοποιούνται σε κάθε κυψέλη. Αυτό δίνει την δυνατότητα στον πάροχο να μπορεί να τοποθετήσει δύο εξάδες AP για τη κάλυψη μίας κυψέλης.

Για την διαχείριση του εύρους ζώνης χρησιμοποιείται η θεωρία token bucket. Με την μέθοδο αυτή το εύρος μοιράζεται ανάμεσα στα συνδεδεμένα SM. Υπάρχουν ουσιαστικά δύο token buckets, ένας για κάθε κατεύθυνση. Η σωστή ρύθμιση του token bucket αλλά και του ρυθμού με τον οποίο γεμίζει βελτιστοποιεί την απόδοση του διαύλου όσον αφορά την καλύτερη και γρηγορότερη εξυπηρέτηση των συνδρομητών.

Η δομή του πλαισίου (frame) είναι πολύ σημαντική για την μετάδοση της πληροφορίας. Σε κάποιες εκδόσεις του συστήματος Canopy υπάρχει η δυνατότητα επιλογή ανάμεσα σε hardware και software scheduling. Σε κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις η δομή του πλαισίου είναι διαφορετική καθώς επίσης μεταβάλλονται και οι ρυθμίσεις που επιτρέπεται να κάνει ο χρήστης. Στην διαδικασία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε software scheduling, καθώς αυτό μόνο υποστήριζε η έκδοση του συστήματος που ήταν διαθέσιμη. Ανάλογα με τις ρυθμίσεις που κανουμε κάθε φορά, όσον αφορά τα control και τα acknowledgment slots, αλλάζει και το πλήθος των data slots. Επίσης η αλλαγή στον λόγο του downlink προς το uplink προκαλεί μεταβολή και στο πλαίσιο.

Όσον αφορά την ασφάλεια του συστήματος, στη βασική έκδοση συναντάμε την μέθοδο DES ενώ στην advantage έκδοση συναντάμε την μέθοδο AES. Η μέθοδος DES θεωρείται πλέον ανασφαλείς για υπηρεσίες που απαιτείται υψηλή κρυπτογράφηση, όπως στρατός και σώματα ασφαλείας, καθώς το μέγεθος του κλειδιού που χρησιμοποιείται είναι μόλις 56 bit. Παρόλα αυτά σε εφαρμογές που απαιτείται ένα πρώτο επίπεδο ασφάλειας, η DES αρκεί. Η γενική μορφή της μεθόδου αποτελείται από 16 πανομοιότυπα στάδια, μία αρχική και μια τελική εναλλαγή. Κατά αυτή τη μέθοδο η κρυπτογράφηση και η αποκρυπτογράφηση είναι διαδικασίες που παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα, με μοναδική διαφορά ότι τα subkeys εφαρμόζονται με αντίστροφα σε κάθε περίπτωση. Το γεγονός αυτό απλοποιεί εξαιρετικά την υλοποίηση καθώς δεν υπάρχει ανάγκη για διαφορετικούς αλγόριθμους κρυπτογράφησης και αποκρυπτογράφησης. Για πιο προηγμένες υπηρεσίες που απαιτείται υψηλή κρυπτογράφηση χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος AES. Αναπτύχθηκε μόλις το 2002 και χρησιμοποιεί κλειδί 128 bits που το εφαρμόζει σε blocks των 128, 192 ή 256 bits.

## Παράμετροι

Σε κάθε BWA συστήματα υπάρχουν σημαντικές παράμετροι που πρέπει να καθορίζονται και να μετρούνται για την σωστή λειτουργία του συστήματος. Βασική ιδιότητα για την σωστή λειτουργία είναι η διασφάλιση του bit rate ή αλλιώς ρυθμός μετάδοσης bit. Η τιμή αυτή μετράται σε bps δεν αναφέρεται στην ταχύτητα της μεταφοράς της πληροφορίας από τα τηλεπικοινωνιακά κανάλια, αλλά εκφράζει το ρυθμό αποστολής της από τον πομπό. Μια άλλη πολύ σημαντική παράμετρος είναι ο ρυθμός μετάδοσης του διαμορφωμένου σήματος ή αλλιώς baud rate. Η παράμετρος αυτή εκφράζει τον αριθμό μεταβολών του διαμορφωμένου σήματος που έγιναν στην μονάδα του χρόνου. Το bit rate δεν είναι πάντα ταυτόσημο με το baud rate, παρα μόνο όταν σε κάθε μεταβολή του διαμορφωμένου σήματος αντιστοιχεί σε ένα bit. Όταν σε κάθε μεταβολή του διαμορφωμένου σήματος αντιστοιχούν περισσότερα από ένα bit τότε το bit rate είναι μεγαλύτερο του baud rate.

Με το όρο χωρητικότητα ζεύξης ονομάζουμε την ικανότητα μετάδοσης της πληροφορίας ή αλλιώς τον μέγιστο αριθμό των συμβόλων που μπορούν να μεταφερθούν μέσω μίας ζεύξης στη μονάδα του χρόνου. Μετράται σε bps και είναι άμεσα εξαρτώμενη από τον θόρυβο και το εύρος ζώνης συχνοτήτων.

Μια άλλη πολύ σημαντική παράμετρος για την ποιότητα της ζεύξης είναι το bit error rate (BER), δηλαδή ο λόγος των σφαλμάτων προς τα συνολικά bits. Στην ουσία ο λόγος αυτός ποσοτικοποιεί την ποιότητα ολόκληρου του συστήματος και αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε περιπτώσεις που οι συνθήκες δεν είναι ιδανικές. Ο κυριότερος παράγοντας μείωση του είναι ο θόρυβος, είτε αυτός προέρχεται από τα ηλεκτρονικά συστήματα, είτε από το περιβάλλον. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το BER είναι τα σφάλματα κβαντοποίησης. Και οι δύο αυτοί παράγοντες περιγράφονται από τους όρους των πιθανοτήτων και της στατιστικής. Η μέτρηση του BER παρόλο που θεωρητικά είναι εύκολη, παρουσιάζει δυσκολίες λόγω της φύσης της αλλά και της εγκατάστασης συστήματος για την ακριβή μέτρηση της.

Το Jitter είναι μια παράμετρος που και αυτή μας δείχνει την ποιότητα της ζεύξης. Πιο συγκεκριμένα με τον όρο αυτό περιγράφουμε κάθε σύντομη απόκλιση του σήματος από αυτό που θεωρείται ιδανικό. Οι ανωμαλίες αυτές μπορεί να προκαλέσουν δυσλειτουργίες στον εξοπλισμό του δέκτη με αποτέλεσμα να μην γίνεται σωστή αναπαραγωγή του σήματος. Οι ανωμαλίες αυτές μπορεί να προκληθούν είτε κατά την μεταφορά από την κακή ποιότητα του μέσου διάδοσης είτε κατά την λήψη από την λαμβάνουσα συσκευή. Για την διόρθωση του jitter χρησιμοποιείται ένα jitter buffer που είναι μια περιοχή αποθήκευσης του στο σύστημα που τα εισερχόμενα πακέτα παραμένουν μέχρι να τακτοποιηθούν και να εξασφαλιστεί ότι έχουν φτάσει ολόκληρα.

Με τον όρο EIRP ονομάζουμε την φαινόμενη ακτινοβολούμενη ισχύ προς τον δέκτη, εάν υποθεθεί ότι το σήμα ακτινοβολείται ισομερώς προς όλες τις

κατευθύνσεις. Η EIRP υπολογίζεται με βάση την εκπεμπόμενη ισχύ και το κέρδος των κεραιών. Η τιμή της περιορίζεται έτσι ώστε να συμφωνούν με τους κανονισμούς σε κατοικημένες περιοχές αλλά και για να αποφεύγονται οι παρεμβολές σε άλλα συστήματα.

Πέρα όμως από αυτές τις παραμέτρους είναι πολύ σημαντικό πριν από την εγκατάσταση κάθε ζεύξης και κάθε δικτύου είναι σημαντική η μελέτη της ραδιοκάλυψης. Σε ένα περιβάλλον χωρίς κτήρια και ανωμαλίες του εδάφους οι απώλειες μετρώνται από τον τύπο του FSL. Οι περιπτώσεις αυτές όμως είναι σπάνιες. Τις πιο πολλές φορές οι εγκαταστάσεις BWA συστημάτων γίνονται σε αστικές ή ημιαστικές περιοχές. Για την μελέτη σε αυτές τις περιοχές είναι πολύ δημοφιλές το μοντέλο OKUMURA HATA που όμως εφαρμόζεται για συχνότητες μέχρι 1500 MHz. Έμεις, όπως προαναφέρθηκε εξετάζουμε το φάσμα συχνοτήτων στα 5700 MHz. Για την μελέτη αυτών των συχνοτήτων χρησιμοποιείται το μοντέλο knife edge diffraction που όμως απαιτεί την γνώση των ακριβών απόστάσεων και ύψους των εμποδίων που παρεμβάλλονται. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής δεν ήταν δυνατόν να εφαρμοστεί αυτή η μέθοδος καθώς τα μεγέθη αυτά δεν ήταν γνωστά. Εφαρμόσαμε την μέθοδο OKUMURA HATA παρόλο που ήταν γνωστό ότι ήταν έκτος των προδιαγραφών του μοντέλου. Παρόλα αυτά τα αποτελέσματα που μας δίνει είναι πολύ κοντά στις μετρήσεις με διαφορές της τάξης των 3 dB όπως είναι εμφανές από την σύγκριση στα 0,5 km.

## Μετρήσεις

Με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις σημαντικές παραμέτρους έγιναν οι απαραίτητες μετρήσεις για μία ζεύξη. Για τις ανάγκες των μετρήσεων αυτών εγκαταστάθηκαν δύο πομποδέκτες σε δύο κτήρια χωρίς όμως να υπάρχει η επιθυμητή οπτική επαφή. Για αυτό το λόγο ενισχύθηκε το σήμα με τη χρήση παθητικού παραβολικού κατόπτρου στην πλευρά του SM. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ένα κοινός φορητός υπολογιστής που συνδέθηκε στο SM με ενισχυμένο καλώδιο CAT 5, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του συστήματος. Το λογισμικών των μονάδων δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να κάνει όλες τις απαραίτητες μετρήσεις για την μελέτη μιας ζεύξης. Πιο συγκεκριμένα υπάρχει η δυνατότητα χρήσης Spectrum analyzer για τον έλεγχο της κατάστασης του ραδιοδιαύλου, εργαλείο ελέγχου χωρητικότητας του διαύλου (link capacity test), μέτρηση του BER για τις συνολικές μεταδόσεις της ζεύξης και εργαλείο frame calculator που μετρά τα slots δεδομένων ανάλογα με τα slots ελέγχου. Επίσης ανά πάσα στιγμή ο χρήστης μπορεί να δει την ποιότητα της ζεύξης ελέγχοντας τις τιμές του jitter, το RSSI και το επίπεδο ισχύος στον δέκτη. Με την χρήση αυτών των εργαλείων έγιναν και οι μετρήσεις για τις ανάγκες αυτής της εργασίας.

Εφόσον υπήρχε η δυνατότητα μίας μόνο ζεύξης μεγαλύτερη σημασία είχαν οι μετρήσεις όπου άλλαζαν οι παράμετροι του συστήματος και όχι οι συνθήκες του περιβάλλοντος. Αξίζει να σημειωθεί όμως, ότι η τοποθεσία των μετρήσεων έγινε σε περιβάλλον συνεχώς μεταβαλλόμενο με αρκετά εμπορικά κτήρια και κεντρικές λεωφόρους. Το γεγονός αυτό επηρέασε και τις μετρήσεις σε μεγάλο βαθμό έτσι

ώστε σε περιπτώσεις που θα ήταν αναμενόμενο να είχαμε χειροτέρευση των συνθηκών να έχουμε σταθερότητα ή ακόμη και βελτίωση.

Η πρώτη μέτρηση που έγινε ήταν το spectrum analyzer. Επειδή όμως έχουμε μόνο μία ζεύξη έχουμε μόνο μία μέτρηση στο Spectrum analyzer. Σε αυτή την μέτρηση φαίνεται ότι στα 5740MHz, που είναι η συχνότητα που έχουμε ρυθμίσει να λειτουργεί το σύστημα, το σήμα έχει τη μέγιστη τιμή. Η τιμή αυτή δεν ξεπερνά τα -78dBm. Όπως φαίνεται και στη μέτρηση της ισχύος στις επόμενες μετρήσεις η ελάχιστη τιμή της είναι -81 dBm.

Η δεύτερη μέτρηση που έγινε είναι αυτή που αφορά την χωρητικότητα του διαύλου. Οι μετρήσεις έγιναν αλλάζοντας κάθε φορά διαφορετική παράμετρο. Αρχικά έγιναν δύο σειρές μετρήσεων, μια σε περιβάλλον εργαστηρίου, όπου το επίπεδο της ισχύος, το RSSI και το jitter είχαν άριστες τιμές, και μία σειρά στην ζεύξη που κάναμε ανάμεσα στα δύο κτήρια. Στην πρώτη περίπτωση οι τιμές της απόδοσης του διαύλου ήταν σταθερά πάνω από 97% φτάνοντας συχνά το 100% και για το uplink και για το downlink. Στην δεύτερη περίπτωση οι μετρήσεις δεν είχαν αυτά τα υψηλά ποσοστά σε απόδοση του διαύλου με ελάχιστη τιμή 80% για το downlink και 90% για το uplink. Αυτό είναι φυσικό δεδομένου ότι το επίπεδο ισχύος στον δέκτη είναι -80dBm έναντι των -39dBm που ήταν στο εργαστήριο και jitter 7 έναντι του 1 που ήταν η τιμή για την εργαστηριακή μέτρηση.

Η χωρητικότητα του διαύλου, όπως είναι γνωστό εξαρτάται από το περιβάλλον, το ποσοστό του downlink και την μέγιστη εμβέλεια. Το περιβάλλον δεν μπορούμε να το ελέγξουμε και γι αυτό το λόγο περιοριζόμαστε στις μετρήσεις μόνο αλλάζοντας τους άλλους δύο παράγοντες για την μέτρηση σε απόσταση και όχι στο εργαστήριο γιατί αυτό δεν θα είχε νόημα αφού οι τιμές θα παρέμεναν σε πολύ υψηλά επίπεδα έτσι κι αλλιώς. Έτσι όλες οι μετρήσεις έγιναν στην ζεύξη ανάμεσα στα δύο κτήρια. Στην πρώτη σειρά μετρήσεων μεταβάλλουμε την μέγιστη εμβέλεια από 2 ως 30 μίλια ή αλλιώς 3,2 έως 48,3 km. Σαν γενικά συμπεράσματα μπορούμε να πούμε ότι με την αύξηση της μέγιστης εμβέλειας μειώνεται η απόδοση της downlink και της uplink ζεύξης με την πρώτη να σημειώνει μεγαλύτερη μείωση. Η διαπίστωση αυτή όμως δεν είναι απόλυτη καθώς σε πολλές περιπτώσεις η απόδοση σε μέγιστη εμβέλεια 30 μίλια μπορεί να είναι καλύτερη από ότι για 25 μίλια. Αυτό οφείλεται κυρίως στην συνεχή αλλαγή των συνθηκών του διαύλου αφού για παράδειγμα στην πρώτη περίπτωση το jitter είναι 4 και στην δεύτερη είναι 5.

Στην δεύτερη σειρά μετρήσεων θεωρήθηκε σαν μεταβλητή το ποσοστό της κάτω ζεύξης ή αλλιώς downlink rate. Οι μετρήσεις έγιναν για downlink rate από 25% έως 99% που είναι και το μέγιστο που μας επιτρέπει το σύστημα να ορίσουμε. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η default τιμή του downlink rate είναι 75% και αυτή ισχύει σε περίπτωση που δεν αναφέρεται διαφορετικά. Προφανώς μπορεί να οριστεί μια διαφορετική τιμή για το downlink rate ανάλογα με την υπηρεσία που παρέχεται στους χρήστες. Για παράδειγμα σε περιπτώσεις που γίνεται μεταφορά εικόνας από τον συνδρομητή (SM) προς το κεντρικό σύστημα (AP) τότε επιθυμούμε μικρότερο



ποσοστό του downlink και μεγαλύτερο του uplink. Πρακτικά σπάνια χρησιμοποιούνται χαμηλές τιμές του downlink rate ακόμη και σε αυτές τις περιπτώσεις.

Λογικά το αποτέλεσμα που θα έπρεπε να είχαμε με την αύξηση του downlink rate, θα ήταν μείωση της απόδοσης του uplink και αύξηση στο downlink. Αυτό όμως όπως βλέπουμε και στις μετρήσεις δεν είναι απόλυτο. Η απόδοση του uplink διατηρεί καλές τιμές με λίγες εξαιρέσεις, ακόμη και όταν το ποσοστό της προς τα κάτω ζεύξης έχει φτάσει το 99% και παρουσιάζει μια πτώση στο 50% χωρίς προφανή λόγο. Από την άλλη πλευρά η απόδοση του downlink δεν εμφανίζει την βελτίωση που θα ήταν αναμενόμενη. Σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να πεί κάποιος ότι χειροτερεύει η συμπεριφορά του παρά βελτιώνεται. Τα αποτελέσματα αυτά μπορεί να οφείλονται σε αλλαγές των συνθηκών που επηρεάζουν τον ραδιοδιάλογο κατά την διαδικασία των μετρήσεων χωρίς όμως να παρατηρούνται σημαντικές αυξομειώσεις στο jitter και τη ισχύ στον δέκτη.

Η τρίτη και τελευταία μέτρηση που διεξήχθηκε αφορά τον υπολογισμό των παραμέτρων του πλαισίου (frame), μεταβάλλοντας κάθε φορά το αριθμό των slots ελέγχου (control, ack slots), την μέγιστη εμβέλεια (max range), το ποσοστό της προς τα κάτω ζεύξης (downlink rate) και την καθυστέρηση (delay).

Η αύξηση της μέγιστης ακτίνας, όπως φαίνεται και από τις μετρήσεις, αυξάνει το πλήθος των overhead bits ή αλλιώς bits επικεφαλίδας, με αποτέλεσμα να μειώνονται τα slots δεδομένων. Από τους πίνακες φαίνεται ότι η ελάχιστη τιμή των overhead bits είναι 3850, που επιτρέπουν την ύπαρξη συνολικά 34 data slots, και μέγιστο 11974 και συνολικά 21 data slots. Η ελάχιστη αυτή τιμή εμφανίζεται για max range 2 μίλια, όταν τα UACK ή τα control slots έχουν πλήθος ένα την στιγμή που τα άλλα έχουν την default τιμή 3. Όταν τα DACK slots είναι ίσα με ένα και τα άλλα δύο 3 τότε τα overhead bits είναι 3934 που επιτρέπουν όμως και πάλι την ύπαρξη συνολικά 34 data slots. Με max range 30 μίλια η τιμή των overhead bits αυξάνεται, έτσι ώστε να φτάνει το μέγιστο όταν τα UACK και DACK έχουν πλήθος 3 και τα control slots είναι 16. Στα διαγράμματα οι μεταβολές αυτές και οι διαφορές στις τιμές σε κάθε περίπτωση φαίνονται σαφώς.

Η αύξηση στο ποσοστό της κάτω ζεύξης αλλάζει την αναλογία των downlink και uplink slots δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα όσο αυξάνεται το ποσοστό αυτό τόσο αυξάνονται τα downlink data slots μέχρι την μέγιστη τιμή 31, και τόσο μειώνονται τα uplink data slots μέχρι που φτάνουν την ελάχιστη τιμή των 2. Παρατηρούμε όμως ότι το άθροισμα των slots δεδομένων δεν ξεπερνά ποτέ τα 34 slots και αυτό μόνο όταν τα overhead bits είναι ελάχιστα.

Τέλος έγιναν τρεις σειρές μετρήσεων μεταβάλλοντας την μέγιστη εμβέλεια και κατά συνέπεια την καθυστέρηση για την μέγιστη εμβέλεια. Τα δύο αυτά μεγέθη είναι ανάλογα. Σε κάθε μια από αυτές τις σειρές ματρήσεων ορίστηκε διαφορετικό downlink rate 75%, 50% και 25%. Παρατηρούμε ότι τα overhead bits αυξάνονται όσο αυξάνεται το max range ενώ δεν παρουσιάζουν διαφορά όσο αλλάζει το

downlink rate. Η αύξηση αυτή των overhead bits έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση των συνολικών data slots. Με downlink rate 75% συνολικά slots δεδομένων ξεκινούν από 33 και φτάνουν το ελάχιστο 30, ενώ για downlink rate 50% και 25% η τιμή αυτή έχει μέγιστο 32 και ελάχιστο 27 χωρίς όμως να έχουν διαφορετική τιμή τα overhead bits.