



Π.Μ.Σ. Διδακτικής της Τεχνολογίας & Ψηφιακά Συστήματα

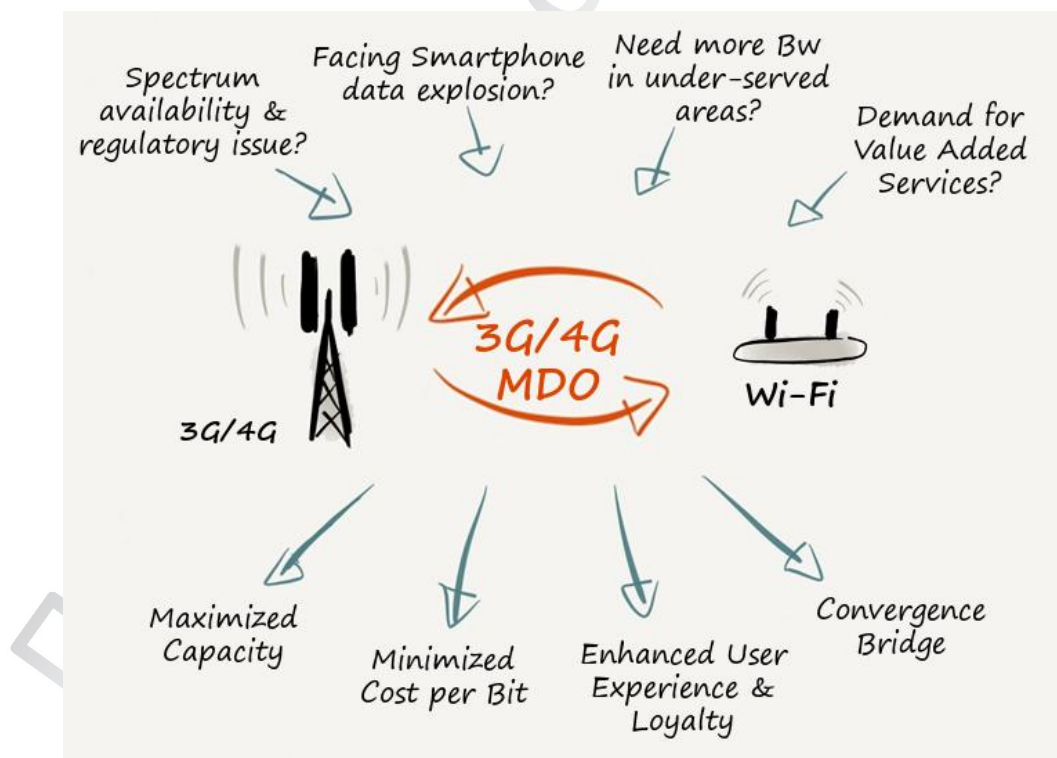
Κατεύθυνση: Ψηφιακές Επικοινωνίες & Δίκτυα

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία με θέμα:

## WIFI INTEGRATION IN FUTURE WIRELESS NETWORKS

Σπυριδάκης Μιχαήλ - ME12076

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: ΑΓΓΕΛΙΚΗ ΑΛΕΞΙΟΥ ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΠΕΙΡΑΙΟΣ



## *Περίληψη*

Το Σύστημα Long Term Evolution (LTE) του Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) γνωστό και ως Evolved Packet System (EPS) είναι μια καινοτόμα κίνηση στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών. Μια τέτοια επαναστατική κίνηση υποκινείται από την ακατάπαυστη αύξηση της ζήτησης συνδέσεων γρήγορων ταχυτήτων στα δίκτυα, χαμηλών χρόνων καθυστερήσεων, χαμηλών ρυθμών σφαλμάτων και ελαστικότητας διότι οι νέοι χρήστες και οι εφαρμογές δικτύων εξαρτώνται πολύ από αυτές τις απαιτήσεις για να απολαμβάνουν επαρκή λειτουργικότητα και απόδοση.

Το Third Generation Partnership Project Long Term Evolution (3GPP LTE) υπόσχεται υψηλούς ρυθμούς δεδομένων και στην ανερχόμενη και στην κατερχόμενη ζεύξη, φασματική επάρκεια, χαμηλούς χρόνους καθυστέρησης και χαμηλό ρυθμό σφαλμάτων. Αυτοί οι στόχοι λειτουργίας και επίδοσης του 3GPP LTE είναι αξιόπαινοι και μπορούν να επιτευχθούν με αρκετή σιγουριά. Το LTE αξιοποιεί μια πληθώρα τεχνολογιών. Ονομαστικά τις Τεχνικές Πολλαπλών Εισόδων Πολλαπλών Εξόδων κεραιών (Multiple Input Multiple Output - MIMO), της Πολυπλεξίας Ορθογώνιας Διαίρεσης Χρόνου (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM), της Πολλαπλής Πρόσβασης Ορθογώνιας Διαίρεσης Χρόνου (Orthogonal Frequency Division Multiple Access - OFDMA) στην κατερχόμενη ζεύξη και της τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης Διαίρεσης Συχνότητας Μονού Φέροντος (Single Carrier Frequency Division Multiple Access - SC-FDMA) στην ανερχόμενη ζεύξη. Επίσης υποστηρίζει τις τεχνικές διαμόρφωσης Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), 16 Quadrature Amplitude Modulation (16QAM), και 64QAM.

Το πρότυπο του LTE είναι σχεδιασμένο ώστε να παρέχει ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων στη καθοδική ζεύξη (downlink) της τάξης των 300 Mbps και στην ανοδική (uplink) μέχρι και 75 Mbps. Επίσης παρέχει Ποιότητα Υπηρεσιών (Quality of Service - QoS) η οποία ορίζει καθυστέρηση διάδοσης μικρότερη από 5ms στο δίκτυο ραδιο-πρόσβασης.

Λόγω της αύξησης των έξυπνων τερματικών και την ανάγκη για όλο και μεγαλύτερη μετάδοση δεδομένων, τα ετερογενή δίκτυα είναι μια προτεινόμενη λύση για την αποσυμφόρηση και την αύξηση της ταχύτητας του δικτύου. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία προτείνεται και αναλύεται μια πιθανοτική και πλήρως κατανεμημένη μέθοδος συλλογής και συνάθροισης δεδομένων για ετερογενή δίκτυα.

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από 6 κεφάλαια. Ξεκινάει με την βιβλιογραφική ανάλυση των δικτύων που χρησιμοποιήθηκαν, συνεχίζει με τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την προσομοίωση – αποτελέσματα και τελειώνει με τον επίλογο που είναι το έκτο και τελευταίο κεφάλαιο.

Από προσομοιώσεις που έγιναν για να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου φάνηκε πως αυτή επιτυγχάνει αυξημένη μετάδοση δεδομένων χωρίς όμως να χάνει το βαθμό αξιοπιστίας που διακατέχει το σύστημα.

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

### *Ευχαριστίες*

Θα ήθελα αρχικά να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην επιβλέπουσα καθηγήτρια της πτυχιακής μου εργασίας κα. Αγγελική Αλεξίου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στο να φέρω εις πέρας το συγκεκριμένο θέμα. Δεδομένης της φύσης της διπλωματικής, απέκτησα μια βαθύτερη κατανόηση για τα δίκτυα επικοινωνιών, τους παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση σε αυτά, και ενδυνάμωσα τις ικανότητες μου στον προγραμματισμό. Τέλος οι υποδείξεις και οι παρατηρήσεις της κα. Αλεξίου βοήθησαν στο να γίνει ο τρόπος εργασίας μου αποδοτικότερος και να εκτεθώ στην νοοτροπία ενός μεταπτυχιακού φοιτητή-ερευνητή.

Τέλος ευχαριστώ και αφιερώνω την εργασία αυτή στους γονείς μου (Κωνσταντίνο και Αναστασία) και τον αδελφό μου (Νίκο) και για την στήριξη που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο Πανεπιστήμιο Πειραιά. Η αγάπη και η βοήθειά τους ήταν πραγματικά πολύτιμη για μένα.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>7</b>
<b>2. OFDM – BASED CELLULAR.....</b>	<b>9</b>
2.1. OFDM.....	9
2.1.1. Βασικές αρχές OFDM.....	11
2.1.2. Ορθογωνικότητα.....	15
2.1.3. Επίδραση ασύρματου καναλιού.....	18
2.2. LTE – LTE ADVANCE.....	20
2.3. ΓΕΝΙΚΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ.....	21
2.3.1. Υπηρεσίες που προσφέρονται σε υψηλότερα επίπεδα.....	21
2.3.2. Πολλαπλή πρόσβαση.....	22
2.3.3. Φυσικά κανάλια και διαμόρφωση.....	22
2.4. ΔΟΜΗ ΤΟΥ DL FRAME ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΑ RESOURCE ELEMENTS.....	23
2.5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ.....	27
2.5.1. Προσθήκη CRC στο transport block.....	28
2.5.2. Καταμερισμός του code block και προσθήκη του CRC σε αυτό.....	28
2.5.3. Κωδικοποίηση Καναλιού.....	29
2.6. ΓΕΝΙΚΗ ΔΟΜΗ ΓΙΑ ΤΑ DL ΦΥΣΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ.....	29
2.6.1. Scrambling.....	30
2.6.2. Διαμόρφωση.....	30
2.6.3. Αντιστοίχιση σε επίπεδα (Layer Mapping).....	30
2.6.4. Προκωδικοποίηση (Precoding).....	30
2.6.5. Αντιστοίχιση σε resource elements.....	31
2.6.6. Δημιουργία μγαδικού OFDM σήματος.....	31
<b>3. IEEE 802.11 - WIFI.....</b>	<b>32</b>
3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	32
3.2. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ - ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	32
3.2.1. Ανεξάρτητα Δίκτυα.....	32
3.2.2. Δίκτυα Υποδομής.....	33
3.3. ΒΑΣΙΚΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΤΟΥ IEEE 802.11.....	34
3.4. ΣΤΟΙΒΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΤΟΥ IEEE 802.11.....	35
3.5. ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΣΤΟ IEEE 802.11.....	38
3.5.1. Infrared (Υπέρυθρες Ακτίνες).....	38
3.5.2. Frequency Hopping Spread Spectrum - FHSS & Direct Sequence Spread Spectrum - DSSS.....	38
3.6. ΣΤΡΩΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΣΤΟ IEEE 802.11.....	40
3.6.1. DCF (Distribution Coordination Function).....	40
3.6.2. PCF (Point Coordination Function).....	41
3.7. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΣΤΟ IEEE 802.11.....	41
3.7.1. Μηχανισμοί Πρόσβασης: EDCF (Enhanced Distribution Function).....	41
3.7.2. HCF (Hybrid Coordination Function).....	42
3.8. ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΣΤΟ IEEE 802.11.....	43
3.9. ΥΠΟΠΡΟΤΥΠΑ ΤΟΥ IEEE 802.11.....	43
<b>4. OFFLOADING – HANDOVER ON OFDM BASED SYSTEMS.....</b>	<b>45</b>
4.1. IEEE 802.21 – OFDM BASED ΠΡΟΤΥΠΟ.....	46

4.2.	MEDIA INDEPENDENT HANDOVER FUNCTION (MIHF).....	48
<b>5.</b>	<b>ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>52</b>
5.1.	ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ NETWORK SIMULATOR 2 .....	52
5.2.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ .....	52
5.2.1.	Σενάριο: Διαπομπή κινητού τερματικού μεταξύ ετερογενών δικτύων OFDM και WiFi 55	
5.2.2.	Αποτελέσματα Προσομοίωσης .....	57
<b>6.</b>	<b>ΕΠΙΛΟΓΟΣ .....</b>	<b>66</b>

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το Mobile data offloading είναι η χρήση των συμπληρωματικών τεχνολογιών δικτύου για την παροχή στοιχείων που είχαν αρχικά προβλεφθεί για κυψελοειδή δίκτυα. Το data offload μπορεί να γίνει είτε από έναν τελικό χρήστη (συνδρομητή κινητής τηλεφωνίας) ή τον φορέα εκμετάλλευσης. Οι τελικοί χρήστες κάνουν εκφόρτωση δεδομένων για τον έλεγχο του κόστους των υπηρεσιών δεδομένων και την διαθεσιμότητα του μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Οι φορείς εκμετάλλευσης χρησιμοποιούν το offloading για να αποσυμφωρίσουν τα κυψελωτά δίκτυα. Οι κυριότερες συμπληρωματικές τεχνολογίες δικτύου που χρησιμοποιούνται για την κινητή εκφόρτωση δεδομένων είναι το Wi-Fi, femtocell και Integrated Mobile Broadcast. Προβλέπεται ότι η κινητή εκφόρτωση των δεδομένων θα γίνει ένα νέο τμήμα της βιομηχανίας λόγω της μεγάλης αύξησης της κίνησης δεδομένων στα συστήματα κινητής τηλεφωνίας.[1]

Ανάλογα με τις υπηρεσίες που πρόκειται να εκφορτωθούν και το επιχειρηματικό μοντέλο μπορεί να υπάρχει ανάγκη για τυποποίηση της διασυνεργασίας . Προσπάθειες τυποποίησης έχουν επικεντρωθεί σχετικά με τον καθορισμό πόσο σφιχτά ή χαλαρά θα είναι η σύζευξη μεταξύ του συστήματος κινητής τηλεφωνίας και των δικτύων Wi-Fi . Το LTE εφαρμόζει την αρχιτεκτονική σφιχτή σύζευξη , την οποία ορίζει επαναδρομολόγηση στο κυψελοειδές δίκτυο σηματοδότησης μέσω δικτύων Wi-Fi . Αυτό καθιστά το Wi-Fi de facto LTE - RAN . Το LTE διευκρίνισε επίσης μια εναλλακτική χαλαρά συνδεδεμένη λύση για το Wi-Fi . Η προσέγγιση αυτή ονομάζεται Interworking Wireless LAN (IWLAN) αρχιτεκτονική και είναι μια λύση για να μεταφέρονται δεδομένα IP μεταξύ κινητού τηλεφώνου και του πυρήνα του δικτύου κινητής τηλεφωνίας μέσω ενός Wi-Fi . Στην αρχιτεκτονική IWLAN , μια φορητή συσκευή ανοίγει μια σήραγγα VPN / IPsec από τη συσκευή προς τον dedicated server IWLAN στον πυρήνα του δικτύου του φορέα να παρέχει στο χρήστη , είτε πρόσβαση σε υπηρεσίες garden του operator ή σε μια πύλη στο Internet.

Ο πιο απλός τρόπος για να εκφορτώσουμε δεδομένα μέσω δικτύου Wi-Fi είναι να έχουμε μια άμεση σύνδεση με το Internet . Σε αυτήν την εναλλακτική λύση δεν υπάρχει σύζευξη παραλείπη οπότε και ανάγκη για τυποποίηση διασυνεργασίας . Για την πλειοψηφία της web κυκλοφορίας , δεν υπάρχει προστιθέμενη αξία για τη δρομολόγηση των δεδομένων μέσω του πυρήνα του δικτύου κινητής τηλεφωνίας . Στην περίπτωση αυτή, η εκφόρτωση μπορεί απλά να πραγματοποιηθεί με την αλλαγή της IP κίνησης να χρησιμοποιήσετε τη σύνδεση Wi-Fi σε κινητό πελάτη αντί της κυτταρικής σύνδεσης δεδομένων . Σε αυτήν την προσέγγιση τα δύο δίκτυα είναι στην πράξη τελείως διαχωρισμένα και η επιλογή δικτύου γίνεται από τον πελάτη. Οι μελέτες δείχνουν ότι σημαντική ποσότητα των δεδομένων που μπορούν να εκφορτωθούν σε αυτόν τον τρόπο σε δίκτυα Wi-Fi , ακόμη και όταν οι χρήστες είναι κινητό .

Ωστόσο, η εκφόρτωση δεν σημαίνει πάντα μείωση της κατανάλωσης πόρων (απαιτείται η ικανότητα του συστήματος ) στο δίκτυο του φορέα εκμετάλλευσης . Κάτω από ορισμένες

συνθήκες και λόγω της αύξησης της non – offloading κίνησης ( δηλαδή κίνηση που φτάνει τελικά το δίκτυο του φορέα σε ένα κανονικό τρόπο ) , το ύψος των πόρων του δικτύου για να προσφέρουν ένα συγκεκριμένο επίπεδο QoS αυξάνεται . Στο πλαίσιο αυτό , η κατανομή των περιόδων εκφόρτωσης αποδεικνύεται ότι είναι η βασική παράμετρος του σχεδιασμού για την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών για την εκφόρτωση στο δίκτυο της μη- εκφορτωμένης κυκλοφορίας να παραμένει στην ουρά για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα , ως αποτέλεσμα τη μείωση των πόρων που απαιτούνται στο δίκτυο του φορέα εκμετάλλευσης .

Τα τελευταία χρόνια έχει ξεκινήσει έρευνα για τη χρήση ετερογενών δικτύων, δηλαδή τη συνύπαρξη πολλών από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες με σκοπό την αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων της καθεμιάς, ανάλογα με την περίπτωση. Ο στόχος είναι η παροχή καλύτερης ποιότητας υπηρεσίας στο χρήστη και μεγαλύτερη διαθεσιμότητα σημείων πρόσβασης (αφού κάποια δίκτυα έχουν εμβέλεια σε περιοχές που τα άλλα δεν υπάρχουν). Με πιο απλά λόγια, εκεί που κάποιοι χρήστες θα αναγκάζονταν να αποκλειστούν λόγω έλλειψης δικτυακών πόρων, μπορούν να εξυπηρετηθούν μέσω άλλης τεχνολογίας, με ανάλογη αύξηση των κερδών των παρόχων (δικτύων και υπηρεσιών) και παράλληλη μείωση των ποσοστών δυσαρεστημένων χρηστών. Εκτός όμως από τις πολλές τεχνολογίες (άρα και τους πολλούς παρόχους δικτύων), είναι εφικτή και η συνύπαρξη πολλών παροχέων υπηρεσιών (που μπορεί να είναι και παρόχους δικτύων ταυτόχρονα), αφού η διαφορετικότητα των δικτύων επιτρέπει την προσφορά υπηρεσιών με μεγάλες ανισότητες στις απαιτήσεις τους. Έτσι, δημιουργείται ένα περιβάλλον δικτύων και υπηρεσιών, η σωστή λειτουργία του οποίου προϋποθέτει τη συνεργασία όλων των εμπλεκόμενων παρόχων.[2],[3]

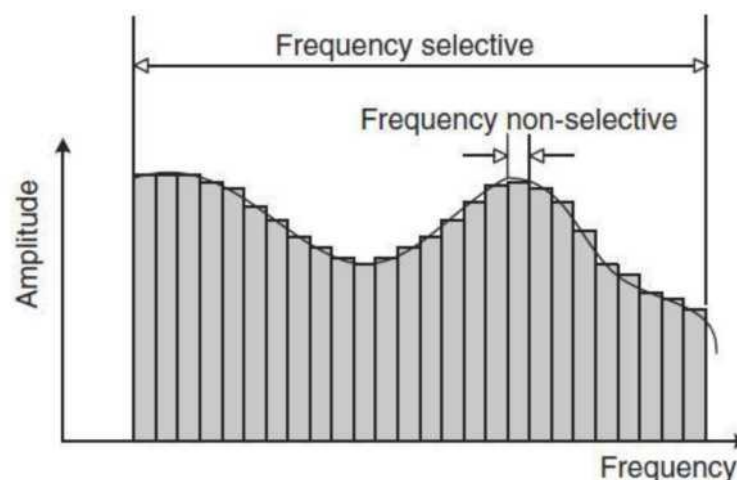


## 2. OFDM – BASED CELLULAR

### 2.1. OFDM

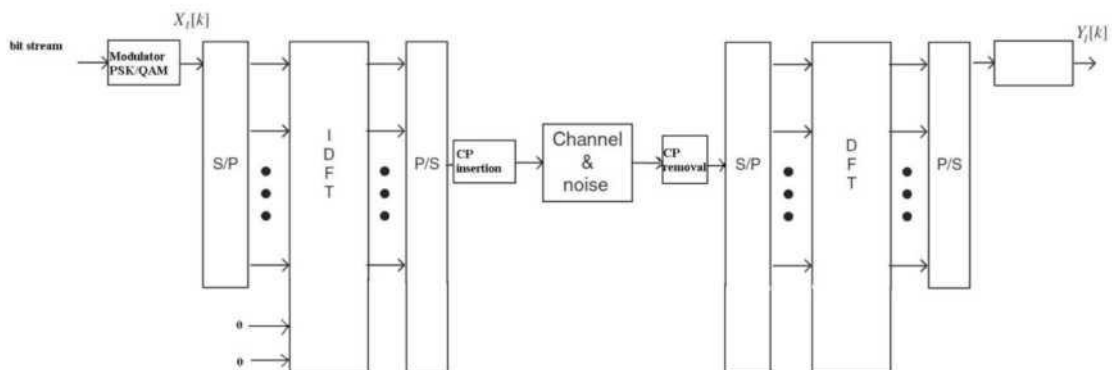
Το OFDM είναι ένα σύστημα διαμόρφωσης το οποίο έχει υιοθετηθεί επιτυχημένα σε ενσύρματες επικοινωνίες όπως το DSL, καθώς και σε ασύρματες τεχνολογίες επικοινωνιών αργότερα, όπως το Wi-Fi και το WiMAX. Οι δυνατότητες που μπορεί να προσφέρει είναι αρκετά σημαντικές και για το λόγο αυτό η 3GPP το επέλεξε για το σχεδιασμό του LTE.

Το OFDM είναι ένα FDM σύστημα που χρησιμοποιείται σαν μία ψηφιακή μέθοδος διαμόρφωσης πολλαπλών φερόντων ορθογώνιων μεταξύ τους. Δηλαδή, η βασική αρχική του OFDM είναι ο διαχωρισμός του διαθέσιμου φάσματος σε παράλληλα κανάλια στενής ζώνης (narrowband) που αναφέρονται ως subcarriers (υπό-φέροντα). Κάθε subcarrier διαμορφώνεται με ένα συμβατικό σύστημα διαμόρφωσης (BPSK, QPSK, M-QAM). Σκοπός είναι να δημιουργηθούν οι συνθήκες flat-fading καναλιού για κάθε subcarrier απλοποιώντας τη διαδικασία της ισοστάθμισης καναλιού (channel equalization). Παράλληλα, κάνοντας χρήση ενός guard interval, γίνεται δυνατός ο χειρισμός της χρονικής διασποράς (time-spreading), εξαιτίας των πολλαπλών οδεύσεων (multipath), και η εξουδετέρωση της διασυμβολικής παρεμβολής (ISI). Τέλος, η ορθογωνικότητα των subcarriers εξαλείφει τις μεταξύ τους παρεμβολές.



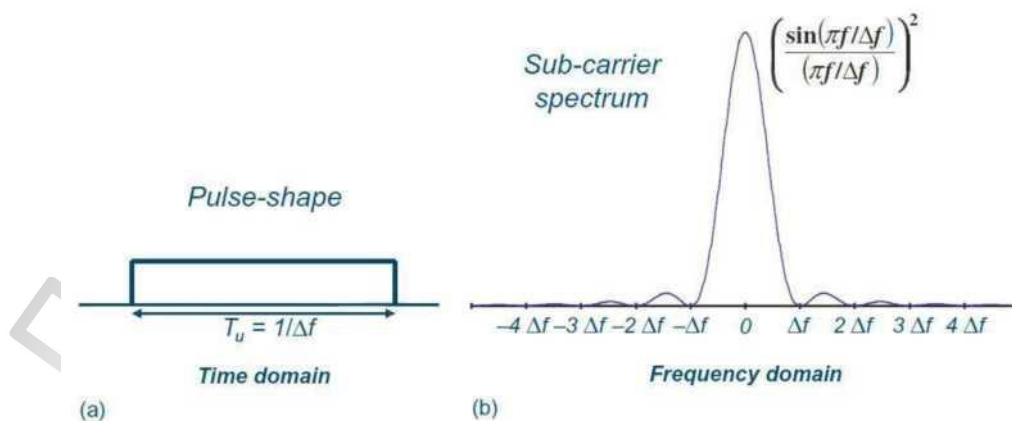
Σχήμα 2.1 Απόκριση συχνότητας ενός πολυκαναλικού συστήματος εκπομπής

Στη συνέχεια θα αναλυθεί η δημιουργία, η δομή και οι ιδιότητες ενός OFDM συμβόλου με βάση το Σχήμα 2.2. Το σχήμα απεικονίζει μία πρακτική υλοποίηση ενός OFDM συστήματος κάνοντας χρήση IDFT και DFT στον πομπό και στο δέκτη, αντίστοιχα.

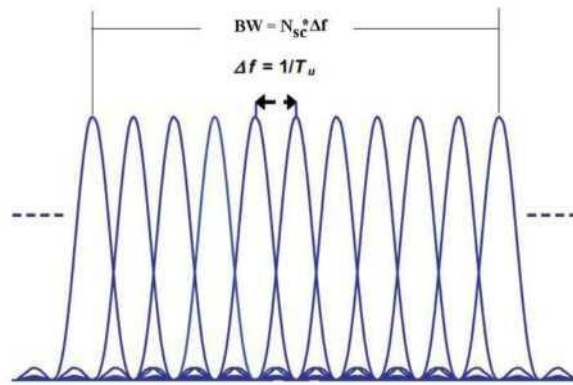


Σχήμα 2.2 Σύστημα OFDM υλοποιημένο με IDFT/DFT

Το bit stream, το οποίο μπορεί να αποτελεί προϊόν κωδικοποίησης, διέρχεται από συμβατικό διαμορφωτή (PSK/QAM) δημιουργώντας ένα stream συμβόλων  $X_l[k]$  ( $l$ -οστό μεταδιδόμενο σύμβολο διάρκειας  $T_s$ , του  $k$ -οστού subcarrier όπου  $l=0, 1, 2, \dots, l_0$  και  $k=0, 1, 2, \dots, N-1$ ). Τα σύμβολα αυτά, έχουν τη μορφή ορθογώνιου παλμού στο πεδίο του χρόνου και της συνάρτησης sinc στο πεδίο της συχνότητας, όπως στο Σχήμα 2.3. Περνώντας από μία διαδικασία series to parallel τοποθετούνται παράλληλα μεταξύ τους σε διαφορετικές συχνότητες, οι οποίες αποτελούν τα subcarriers του OFDM συμβόλου. Η απόστασή τους στη συχνότητα, γνωστή και ως subcarrier spacing, είναι ίση με  $\Delta f = 1/T_s$  (περίοδος συμβόλου, βλέπε Σχήμα 2.3b). Οπότε και προκύπτει το φάσμα ενός OFDM συμβόλου όπως στο Σχήμα 2.4. Το ονομαστικό εύρος ζώνης για  $N_{sc}$  subcarriers δεδομένων είναι ίσο με  $BW = N_{sc} * \Delta f$ .



Σχήμα 2.3 Παλμός συμβόλου στο χρόνο και στη συχνότητα (subcarrier)



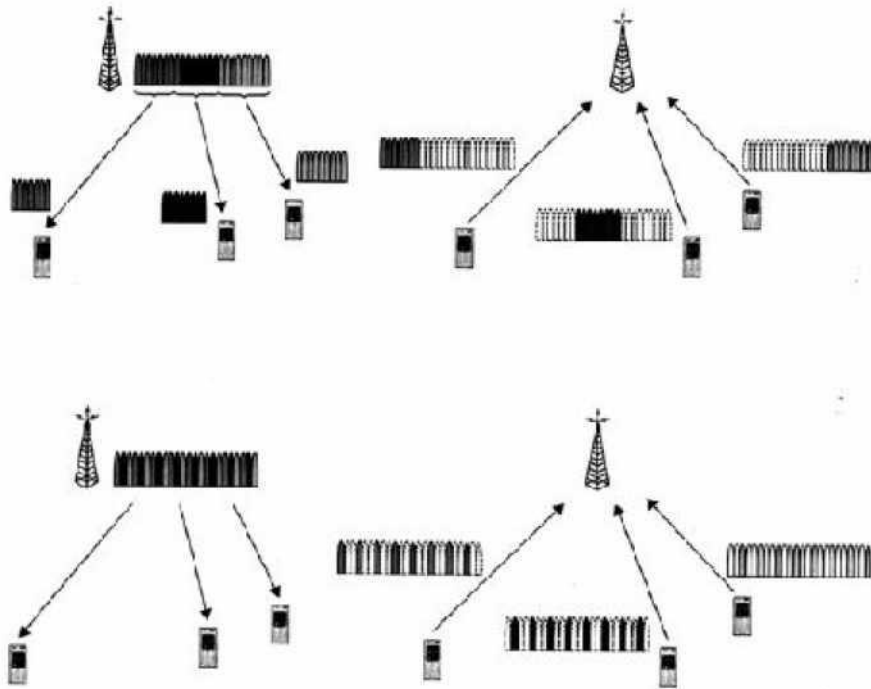
Σχήμα 2.4 Εύρος ζώνης OFDM συμβόλου

Από το Σχήμα 2.4 διαπιστώνεται ότι υφίσταται επικάλυψη μεταξύ των subcarriers, γεγονός που αυξάνει τη φασματική απόδοση (spectral efficiency) του συστήματος. Επίσης, η επικάλυψη αυτή καθίσταται δυνατή λόγω της ορθογωνικότητας μεταξύ των subcarriers.[29],[30]

### 2.1.1. Βασικές αρχές OFDM

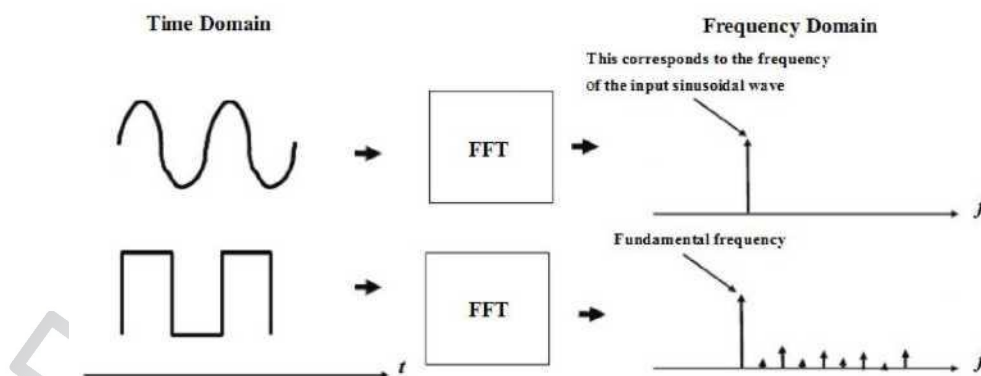
Η επικοινωνία μεταξύ πολλαπλών χρηστών απαιτεί τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης. Γενικά, οποιαδήποτε από τις γνωστές τεχνικές (TDMA και FDMA) μπορεί να χρησιμοποιηθεί άσχετα από τη φύση του OFDM σήματος. Παρόλα αυτά, οι ιδιότητες του OFDM μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για πολλαπλή πρόσβαση, δηλαδή Orthogonal Frequency Division Multiple Access- OFDMA)

Η OFDM τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πολλαπλής πρόσβασης επιτρέποντας ταυτόχρονες μεταδόσεις διαφορετικών συχνοτήτων προς/από πολλαπλά κινητά τερματικά όπως φαίνεται στην σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Βασικές αρχές OFDMA

Οι πρακτικές εφαρμογές ενός OFDMA συστήματος βασίζονται στην ψηφιακή τεχνολογία και πιο συγκεκριμένα στην χρήση του Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier (DFT) και στην αντίστροφη λειτουργία (IDFT) να κινούνται μεταξύ της αναπαράστασης των πεδίων χρόνου και συχνότητας. Το τελικό σήμα τροφοδοτεί ένα ημιτονοειδές σήμα, το block του Fast Fourier Transform (FFT) όπως απεικονίζεται στην εικόνα σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Αποτέλεσμα της FFTλειτουργίας με διαφορετικές εισόδους

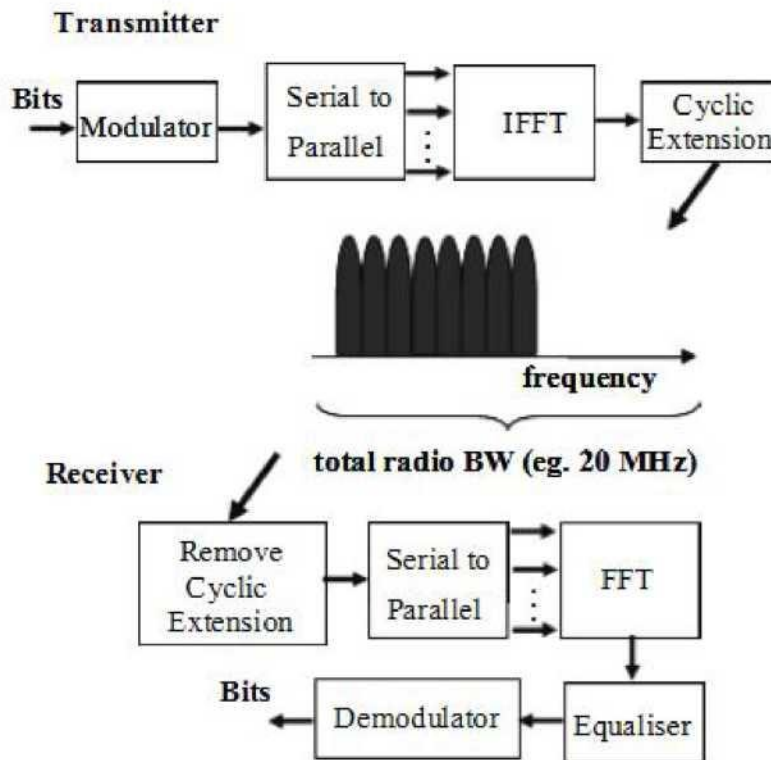
Στις πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιείται ο FFT. Η FFT λειτουργία μετακινεί το σήμα από την αναπαράσταση στο πεδίο χρόνου σε αναπαράσταση στο πεδίο συχνότητας. Ο αντίστροφος FFT (IFFT) κάνει την αντίστροφη λειτουργία. Για το ημιτονοειδές κύμα, η

έξοδος από τη λειτουργία του FFT θα έχει ένα μέγιστο στην αντίστοιχη συχνότητα και μηδέν οπουδήποτε αλλού. Εάν η είσοδος είναι ένα τετραγωνικό σήμα, τότε η έξοδος στο πεδίο της συχνότητας έχει τα μέγιστα σε πολλαπλάσιες συχνότητες καθώς τέτοιο σήμα περιέχει αρκετές συχνότητες που καλύπτονται από την FFT λειτουργία. Μια απόκριση ως είσοδος στον FFT θα είχε ένα μέγιστο σε όλες τις συχνότητες. Καθώς το τετραγωνικό σήμα έχει ένα κανονικό διάστημα  $T$ , υπάρχει ένα μεγαλύτερο μέγιστο στην συχνότητα  $1/T$  αντιπροσωπεύοντας την βασική συχνότητα της κυματομορφής και ένα μικρότερο μέγιστο στις μονές αρμονικές της βασικής συχνότητας. Η FFT λειτουργία μπορεί να εκτελεστεί από το ένα μέρος στο άλλο χωρίς να χάσει οποιαδήποτε από την αρχική πληροφορία, θεωρώντας πως οι κλασσικές απαιτήσεις για ψηφιακή επεξεργασία σήματος σε σχέση με τον ελάχιστο ρυθμό δειγματοληψίας και τα μήκη λέξης έχουν πραγματοποιηθεί.

Η εφαρμογή της FFT έχει ερευνηθεί και βελτιστοποιηθεί (μικρός αριθμός πολλαπλασιασμών) καθώς μπορεί να μείνει με δυνάμεις των μηκών λέξεων. Έτσι, για το LTE τα απαιτούμενα FFT μήκη τείνουν να είναι επίσης δυνάμεις του δύο, όπως 512, 1024 κ.τ.λ. Από την πλευρά της εφαρμογής είναι καλύτερο να έχουμε, για παράδειγμα ένα FFT μεγέθους 1024 ακόμα κι αν μόνο 600 έξοδοι χρησιμοποιούνται, από το να προσπαθεί να έχει ένα άλλο μήκος για τον FFT μεταξύ 600 και 1024.

Η βασική αρχή του πομπού σε ένα οποιοδήποτε OFDMA σύστημα είναι να χρησιμοποιήσει στενούς, αμοιβαία ορθογώνιους υπο-φορείς. Στο LTE τα διαστήματα υπο-φορέων είναι 15kHz άσχετα με το εύρος ζώνης της ολικής μετάδοσης. Οι διάφοροι υπο-φορείς είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους, καθώς τη στιγμή δειγματοληψίας ενός υπο-φορέα οι άλλοι υπο-φορείς έχουν μια μηδενική τιμή, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7. Ο πομπός ενός OFDMA συστήματος χρησιμοποιεί το block IFFT για τη δημιουργία του σήματος. Η πηγή δεδομένων τροφοδοτεί την μετατροπή σειριακής σε παράλληλη κι επιπλέον το IFFT block. Κάθε είσοδος για το block IFFT αντιστοιχεί στην είσοδο που αντιπροσωπεύει έναν συγκεκριμένο υπο-φορέα (ή συγκεκριμένη συνιστώσα συχνότητας του σήματος στο πεδίο του χρόνου) και μπορεί να διαμορφωθεί ανεξάρτητα από τους άλλους υπο-φορείς. Το block IFFT ακολουθείται προσθέτοντας την κυκλική επέκταση (κυκλικό πρόθεμα), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7.

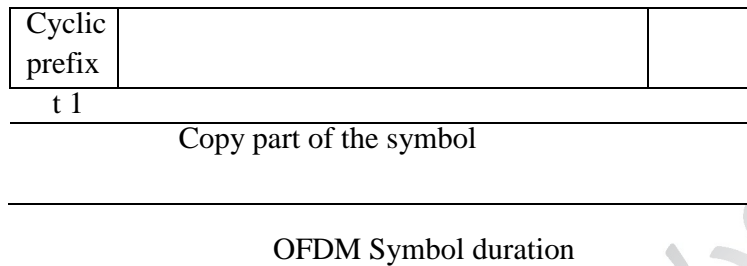
Η προσθήκη του κυκλικού προθέματος είναι για την αποφυγή της διασυμβολικής παρεμβολής. Όταν ο πομπός προσθέτει μια κυκλική επέκταση μεγαλύτερη από την απόκριση καναλιού, η επίδραση από το προηγούμενο σύμβολο μπορεί να αποφευχθεί αγνοώντας (αφαιρώντας) το κυκλικό πρόθεμα στον δέκτη.



Σχήμα 2.8: OFDMA πομπός και δέκτης

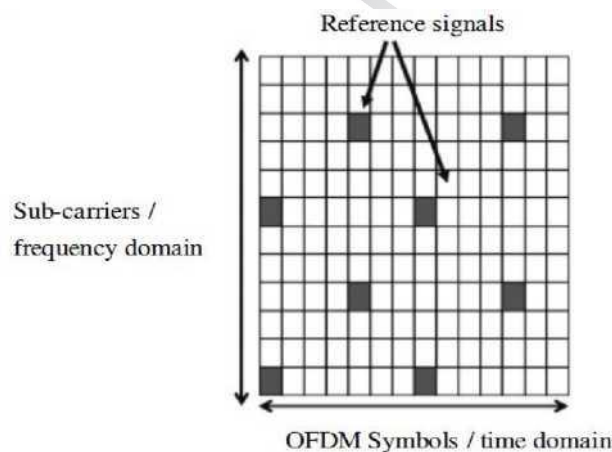
Το κυκλικό πρόθεμα προστίθεται αντιγράφοντας μέρος του συμβόλου στο τέλος και προσαρτώντας το στην αρχή του συμβόλου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8. Η χρήση της κυκλικής επέκτασης είναι προτιμότερη για να βάλει ένα 'διάλειμμα' της μετάδοσης (διάστημα ασφαλείας) καθώς το OFDM σύμβολο δείχνει να είναι περιοδικό. Έτσι το OFDM σύμβολο παρουσιάζεται ως περιοδικό εξαιτίας του κυκλικού προθέματος, η επίδραση του καναλιού καταλήγει στην αντίστοιχη του βαθμωτού πολλαπλασιασμού, θεωρώντας ότι το κυκλικό πρόθεμα είναι αρκετά μεγάλο. Η περιοδική φύση των σημάτων επιτρέπει επίσης για ένα φάσμα διακριτού Fourier να ενεργοποιήσει τη χρήση του DFT και IDFT στον δέκτη και πομπό, αντίστοιχα.

Συνήθως το διάστημα φύλαξης έχει σχεδιαστεί τέτοιο ώστε να ξεπερνά τη διάδοση καθυστέρησης στο περιβάλλον όπου πρόκειται να λειτουργήσει το σύστημα. Επιπλέον, η επίδραση του φιλτραρίσματος του πομπού και του δέκτη χρειάζεται να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό του διαστήματος φύλαξης. Ο OFDMA δέκτης θεωρεί το σύμβολο OFDMA που έρχεται μέσω ενός φίλτρου FIR, χωρίς να διαχωρίσει τα συγκεκριμένα στοιχεία συχνότητας όπως ο δέκτης RAKE. Έτσι, όμοια με την διάδοση καθυστέρησης καναλιού, το μήκος του φίλτρου που εφαρμόστηκε στο σήμα στην πλευρά του πομπού και του δέκτη θα κάνουν αυτό το γενικό αποτέλεσμα του 'φιλτραρίσματος' μεγαλύτερο από τη διάδοση της καθυστέρησης.



Σχήμα 2.9: Δημιουργία του διαστήματος φύλαξης για το OFDM σύμβολο

Ενώ ο δέκτης δεν ‘ασχολείται’ με τη διασυμβολική παρεμβολή, πρέπει να ασχοληθεί με την απόκριση του καναλιού για συγκεκριμένους υποφορείς που έχουν υποστεί αλλαγές στη συχνότητα και στο πλάτος. Η εκτίμηση καναλιού διευκολύνεται έχοντας μέρος των συμβόλων όπως σύμβολα αναφοράς και pilots. Με τη σωστή τοποθέτηση αυτών των συμβόλων στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας, ο δέκτης μπορεί να παρεμβάλλει το αποτέλεσμα του καναλιού στους διάφορους υποφορείς από το πλέγμα του πεδίου συχνότητας και χρόνου. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.10: Διάδοση συμβόλων αναφοράς στους OFDMA υποφορείς συμβόλων

Ένας σύνθετος τύπος δέκτη είναι ο ισοσταθμιστής στο πεδίο της συχνότητας, ο οποίος αλλάζει βασικά την απόκριση καναλιού για κάθε υποφορέα. Ο ισοσταθμιστής στο πεδίο της συχνότητας απλά πολλαπλασιάζει κάθε υποφορέα που βασίζεται στην υπολογισμένη συχνότητα απόκρισης του καναλιού (η ρύθμιση της φάσης και του πλάτους κάθε υποφορέα). [29],[30]

### 2.1.2. Ορθογωνικότητα

Στο OFDM οι συχνότητες των subcarriers επιλέγονται έτσι ώστε τα subcarriers να είναι ορθογώνια το ένα στο άλλο, με αποτέλεσμα να εξαλείφεται η μεταξύ τους παρεμβολή, γνωστή και ως ICI - Inter Carrier Interference-. Σε αντίθεση με τη συμβατική FDM δεν απαιτείται ξεχωριστό φίλτρο για κάθε υπό-κανάλι. Η έννοια της ορθογωνικότητας γίνεται

κατανοητή στο Σχήμα 2.4. Το φάσμα κάθε σήματος είναι της μορφής  $\text{sinc}(\pi f/\Delta f)/(\pi f/\Delta f)$  με μηδενικά στο κέντρο των άλλων subcarriers. Αυτό διασφαλίζει την ορθογωνικότητα των subcarriers.

Θεωρούνται τα μιγαδικά εκθετικά σήματα  $\{e^{j2\pi f_k t}\}$  τα οποία αναπαριστούν τα subcarriers στη συχνότητα  $f_k = k/T_{sym}$ , όπου  $0 < t < T_{sym}$ .  $T_{sym}$  είναι η περίοδος του OFDM συμβόλου και άρα η κοινή περίοδος τους. Είναι γνωστό πως δύο σήματα είναι ορθογώνια μεταξύ αν το ολοκλήρωμα του γινομένου τους στην κοινή τους περίοδο είναι ίσο με το μηδέν.

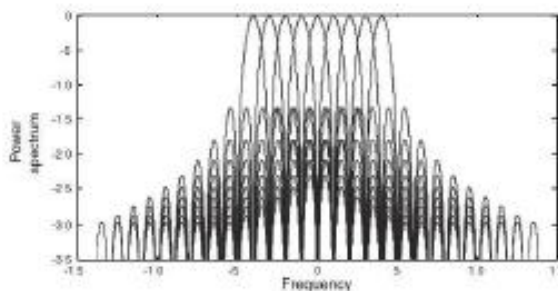
Στο συνεχή χρόνο είναι :

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_{sym}} \int_0^{T_{sym}} e^{j2\pi f_k t} e^{-j2\pi f_l t} dt &= \frac{1}{T_{sym}} \int_0^{T_{sym}} e^{j2\pi \frac{k}{T_{sym}} t} e^{-j2\pi \frac{l}{T_{sym}} t} dt = \\ &= \int_0^{T_{sym}} e^{j2\pi \frac{(k-l)}{T_{sym}} t} dt = \begin{cases} 1, & \forall k = l \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \end{aligned}$$

Στο διακριτό χρόνο θέτοντας τις στιγμές δειγματολήπτησης ως  $t = nT_s = nT_{sym}/N_{sc}$  ( $n=0, 1, 2, \dots, N_{sc}-1$ ) η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi \frac{k}{T_{sym}} nT_s} e^{-j2\pi \frac{l}{T_{sym}} nT_s} &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi \frac{k}{T_{sym}} n \frac{T_{sym}}{N}} e^{-j2\pi \frac{l}{T_{sym}} n \frac{T_{sym}}{N}} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi \frac{(k-l)}{N} n} = \begin{cases} 1, & \forall k = l \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \end{aligned}$$

Παρατηρείται πως στην είσοδο του IDFT τοποθετούνται, εκτός από τα σύμβολα δεδομένων και μηδενικά σύμβολα. Τα σύμβολα αυτά είναι γνωστά ως Virtual Carriers και χρησιμεύουν ως guard band στα εξωτερικά subcarriers του OFDM συμβόλου για τη μείωση της out-of-band ακτινοβολίας. Η χρήση τους συνίσταται απαραίτητη καθώς όπως παρατηρείται από το φάσμα ισχύος ενός OFDM συμβόλου στο Σχήμα 2.11 ο πρώτος πλευρικός λοβός δεν είναι αρκετά μικρότερος από τον κύριο.



Σχήμα 2.11 Φασματική πυκνότητα ισχύος OFDM συμβόλου

Μετά την εκτέλεση του IDFT και μίας διαδικασίας parallel to series δημιουργείται μία ακολουθία δεδομένων - το OFDM σύμβολο - στο χρόνο.



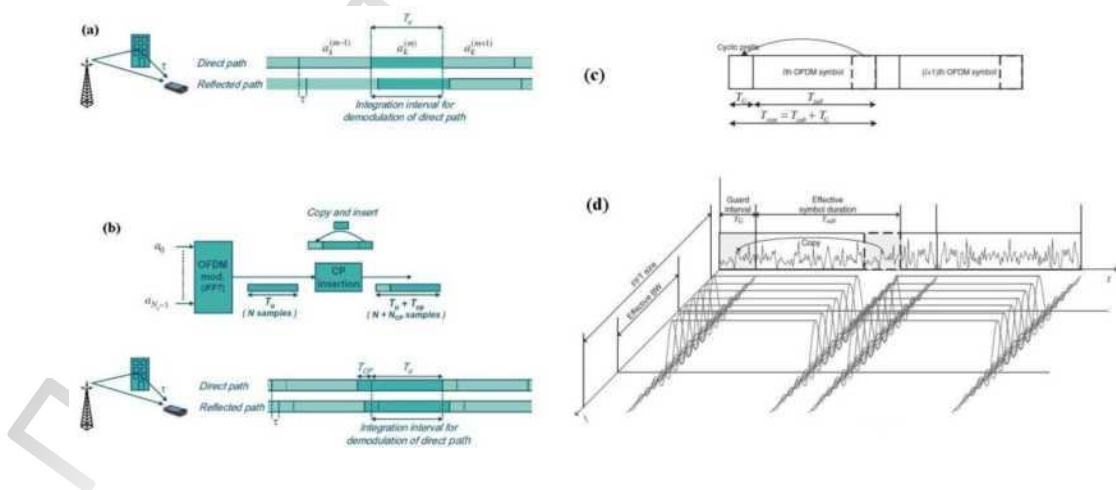
Επειδή όταν αυτό το σήμα περνάει από ένα time-dispersive κανάλι, υπάρχει η πιθανότητα εμφάνισης ISI μεταξύ των OFDM συμβόλων, με αποτέλεσμα να χαθεί η ορθογωνικότητα μεταξύ των subcarriers.

Όταν αυτό το σήμα περνάει από ένα time-dispersive κανάλι, η ορθογωνικότητα μεταξύ των subcarriers θα χαθεί μερικώς. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι το χρονικό διάστημα του ολοκληρωτή, στην πλευρά του αποδιαμορφωτή, θα επικαλύπτει ένα διάστημα του διπλανού συμβόλου σε ένα διαφορετικό path, όπως στο Σχήμα 2.6a. Καθώς τα γειτονικά σύμβολα δεν είναι απαραίτητα ίδια μεταξύ τους, το διάστημα της ολοκλήρωσης δε θα ανταποκρίνεται απαραίτητα σε ένα ακέραιο αριθμό από μιγαδικά εκθετικά αυτού του path. Αποτέλεσμα των παραπάνω, είναι η εμφάνιση όχι μόνο ISI σε ένα subcarrier, αλλά και παρεμβολή μεταξύ των subcarriers (ICI).

Για την αντιμετώπιση αυτής της παρεμβολής και τη διατήρηση της ορθογωνικότητας γίνεται χρήση του Cyclic Prefix (CP). Το CP αποτελεί μία κυκλική επέκταση του OFDM συμβόλου. Πιο συγκεκριμένα, ένα τμήμα από το τέλος του OFDM συμβόλου προστίθεται σαν κυκλικό πρόθεμα στην αρχή του σήματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.11(b+c). Έτσι, το CP αυξάνει το μήκος του OFDM συμβόλου από  $T_{sym}$  σε  $T_{cp} + T_{sym}$ , όπου  $T_{CP}$  είναι το μήκος του CP. Το CP προστατεύει το OFDM σύμβολο από ISI και ICI καθώς στην ολοκλήρωση διαστήματος ενός συμβόλου  $T_{sym}$  δε θα υπάρχει επικάλυψη με γειτονικά σύμβολα, όσο το  $T_{CP}$  είναι μεγαλύτερο από το μέγιστο delay spread.

Μειονεκτήματα της χρήσης CP είναι η μείωση του OFDM symbol rate. Παράλληλα, εμφανίζεται μία απώλεια ισχύος στην πλευρά του αποδιαμορφωτή καθώς από το λαμβανόμενο σήμα χρησιμοποιείται ένα μέρος του ίσο με  $T_{sym}/(T_{cp} + T_{sym})$ .

Για τους παραπάνω λόγους η επιλογή του μήκους του δε θα πρέπει να υπερβαίνει πολύ το μέγιστο delay spread, γιατί από ένα σημείο και μετά δε θα υπάρχει επιπλέον κέρδος στο δέκτη.



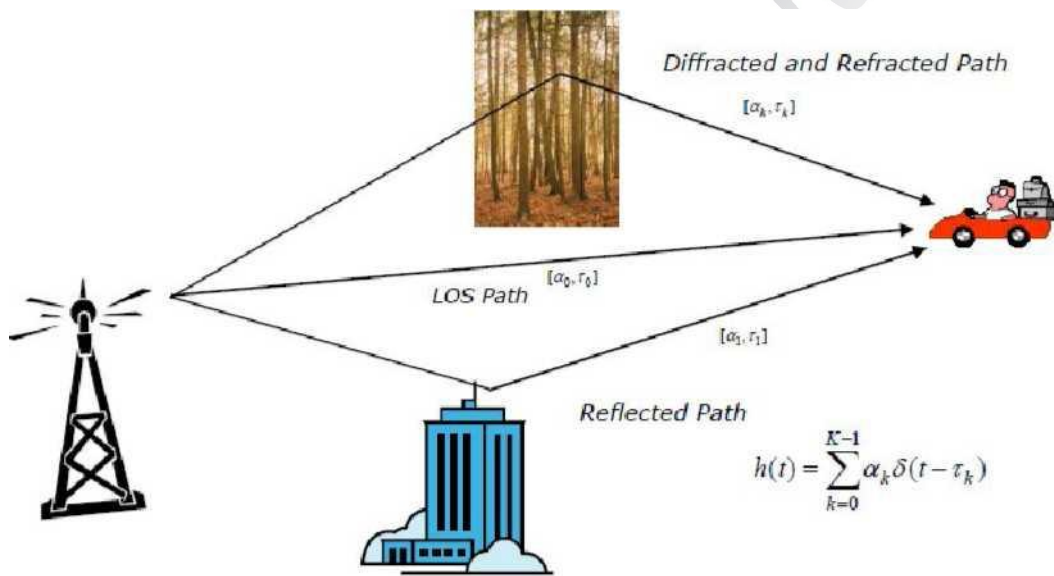
Σχήμα 2.12 Cyclic Prefix

Το σήμα πλέον είναι έτοιμο να αποσταλεί από τον πομπό. Αφού διέλθει από το κανάλι το

λαμβανόμενο σήμα θα πρέπει περάσει από την OFDM αποδιαμόρφωση. Πρόκειται για την αντίστροφη διαδικασία. Από το σήμα θα αφαιρεθεί το κυκλικό πρόθεμα. Στη συνέχεια θα υποστεί μία διαδικασία S/P, για να μετασχηματισθεί στο πεδίο της συχνότητας με ένα μήκους  $N$  DFT. Με την αφαίρεση των virtual carriers, προκύπτει πλέον το επιθυμητό σήμα το οποίο μετατρέπεται σε ένα σειριακό stream συμβόλων για τη συμβατική QPSK/QAM αποδιαμόρφωσή τους. [29],[30]

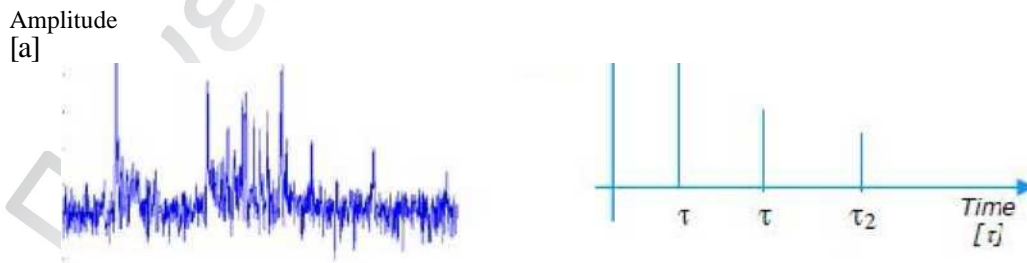
### 2.1.3. Επίδραση ασύρματου καναλιού

Ένα ασύρματο κανάλι εισάγει εξασθενήσεις στο σήμα, κυρίως εξαιτίας της πολυόδευσης κατά τη μετάδοση, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13: Multipath κανάλι

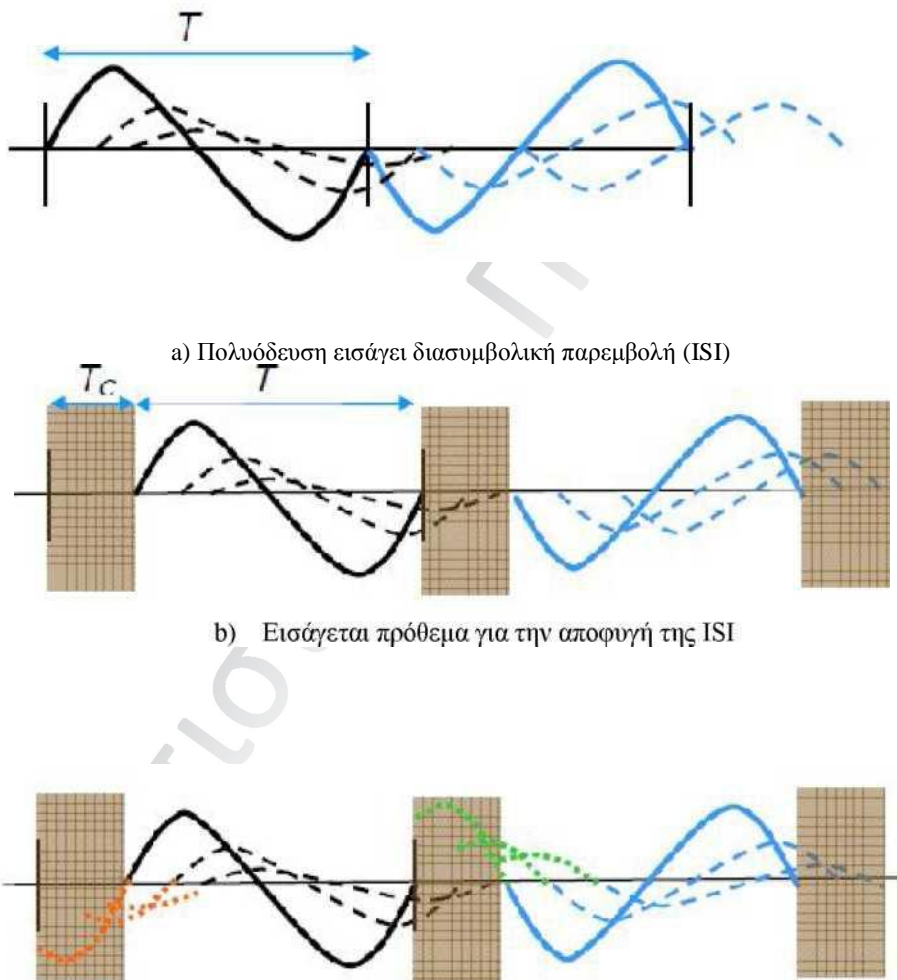
Το σχήμα 2.13 δείχνει την απόκριση του μετρούμενου καναλιού, για την μιας κατεύθυνσης και για την ανακλώμενη κατεύθυνση του σήματος.



Σχήμα 2.14: Απόκριση multipath καναλιού

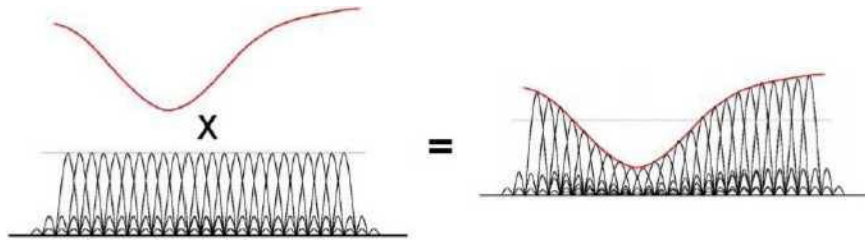
Η συνέπεια της πολυόδευσης είναι η διασπορά του χρόνου που εισάγεται στο σήμα. Το σχήμα 2.14 απεικονίζει το αποτέλεσμα στο πεδίο του χρόνου και το κυκλικό πρόθεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειώσει την επίδραση. Τα χρονικά γειτονικά σύμβολα

‘μπλέκονται’ μεταξύ τους και ενδο-διασυμβολική παρεμβολή εισάγεται Στο σχήμα 2.14 το σύμβολο επιμηκύνεται προσθέτοντας ένα διάστημα φύλαξης μεταξύ των συμβόλων, αλλά η απλή πρόσθεση ‘άδειου’ διαστήματος φύλαξης καταστρέφει την ορθογωνιότητα και εισάγει παρεμβολές μεταξύ των φορέων (inter-carrier interference ICI). Προκειμένου να αποφευχθεί αυτό και επομένως να διατηρηθεί η ορθογωνιότητα, το πρόθεμα γίνεται κυκλικό βάζοντας ένα αντίγραφο του τελευταίου μέρους του συμβόλου και τοποθετείται μπροστά. Το διάστημα προθέματος θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από τη μέγιστη καθυστέρηση που μπορεί να συμβεί στο κανάλι.



Σχήμα 2.15: Διασπορά του χρόνου ξαιτίας της multipath διάδοσης και εισαγωγή της εισαγωγής κυκλικού προθέματος

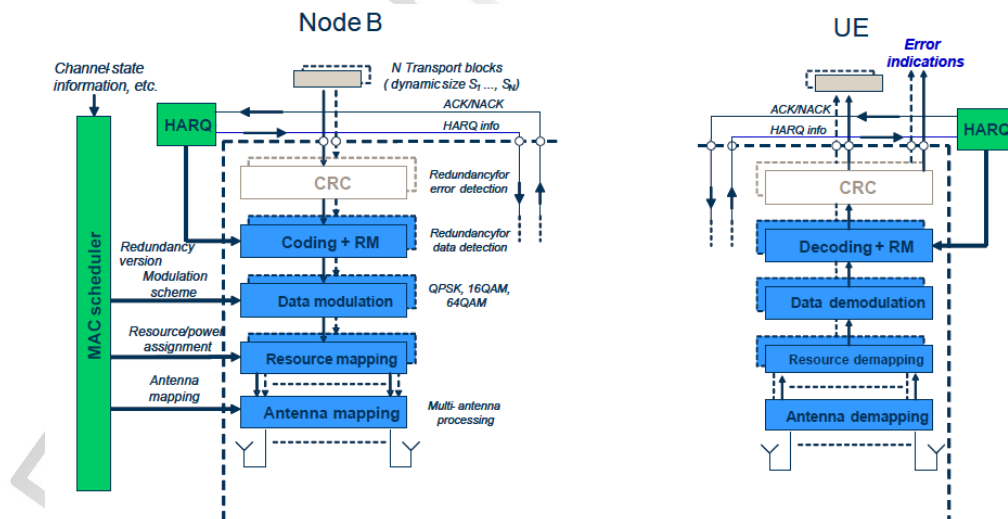
Εξαιτίας του μεγάλου εύρους ζώνης ενός OFDM σήματος, η επίδραση του της πολυδυσίας εξαρτάται από την εξασθένηση επιλεκτικής συχνότητας όπως φαίνεται στο σχήμα 2.16. [29],[30]



Σχήμα 2.16: Επιλεκτική συχνότητα fading ενός OFDM σήματος

## 2.2. LTE – LTE Advance

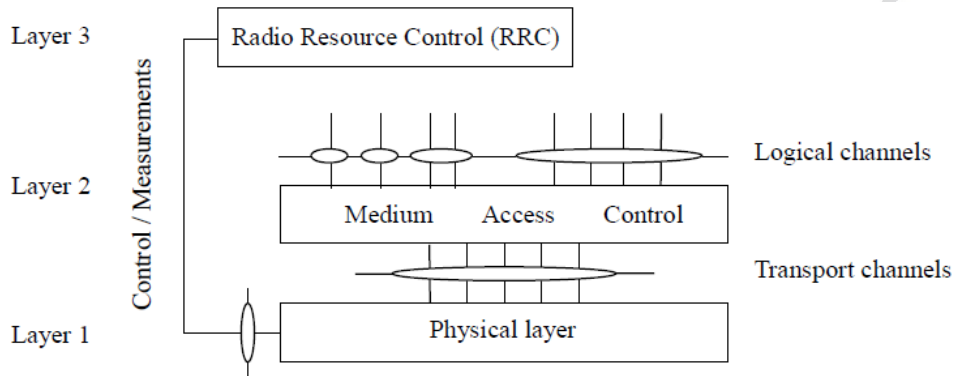
Στην ενότητα αυτή θα δοθεί μία επισκόπηση του φυσικού επιπέδου του LTE για το DL. Στη συνέχεια θα περιγραφεί η διαδικασία που ακολουθείται για την έκδοση φυσικού επιπέδου του DL-SCH καναλιού βασιζόμενοι στην διαδικασία επεξεργασίας φυσικού επιπέδου όπως αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.17. Η διαδικασία αυτή ξεκινάει με την επεξεργασία των transport blocks και τη μετατροπή τους σε κωδικολέξεις, οι οποίες στη συνέχεια επεξεργάζονται με βάση τα φυσικά κανάλια για να αποσταλούν στον εξοπλισμό χρήστη.[4],[5]



Σχήμα 2.17: Μοντέλο φυσικού επιπέδου για τη μετάδοση του DL-SCH

### 2.3. Γενική αρχιτεκτονική πρωτοκόλλου

Το radio interface στις προδιαγραφές του φυσικού επιπέδου του LTE καλύπτει το interface μεταξύ του σταθμού βάσης (Base Station – BS) και του εξοπλισμού του χρήστη (User Equipment – UE). Το φυσικό επίπεδο αποτελεί το πρώτο από τα τρία Layers που συνιστούν το radio interface και περιγράφεται από τη σειρά TS 36.200 των προδιαγραφών.



Σχήμα 2.18: Radio interface protocol architecture around the physical layer

Στο Σχήμα 2.18 δίνεται το Radio interface protocol architecture του E-UTRA. Παρουσιάζεται η διεπαφή του Layer 1 (PHY) με το Medium Access Control (MAC) sub-layer του Layer 2 και με το Radio Resource Control (RRC) Layer του Layer 3. Οι κύκλοι μεταξύ των layers και sub-layers υποδεικνύουν Service Access Points (SAPs). Το φυσικό επίπεδο παρέχει στο MAC κανάλια μεταφοράς. Τα κανάλια μεταφοράς χαρακτηρίζονται από τον τρόπο με τον οποίο η πληροφορία μεταφέρεται στο radio interface. Με τη σειρά του, το MAC προσφέρει λογικά κανάλια στο RLC sub-layer του Layer 2. Ένα λογικό κανάλι χαρακτηρίζεται από τον τύπο πληροφορίας που μεταφέρεται.

#### 2.3.1. Υπηρεσίες που προσφέρονται σε υψηλότερα επίπεδα

Όπως προαναφέρθηκε το φυσικό επίπεδο προσφέρει υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων στα υψηλότερα επίπεδα. Η πρόσβαση σε αυτές τις υπηρεσίες γίνεται με τη χρήση ενός καναλιού μεταφοράς μέσω του MAC sub-layer. Για να προσφέρει την υπηρεσία μεταφοράς δεδομένων, το φυσικό επίπεδο εκτελεί τις ακόλουθες λειτουργίες.

Αναφορικά με τα κανάλια μεταφοράς το φυσικό επίπεδο εκτελεί εντοπισμό σφαλμάτων και υπόδειξη (indication) στα υψηλότερα layers, FEC encoding/decoding, Rate matching και Mapping του κωδικοποιημένου καναλιού μεταφοράς στα φυσικά κανάλια. Για τα φυσικά κανάλια το φυσικό επίπεδο παρέχει Power weighting, καθώς και τη (απο)διαμόρφωση και τους. Οι υπόλοιπες λειτουργίες είναι Hybrid ARQ με soft-combining, συγχρονισμό στη συχνότητα και στο χρόνο, μετρήσεις χαρακτηριστικών του καναλιού και υπόδειξη στα υψηλότερα επίπεδα, multiple input multiple output (MIMO) antenna processing, transmit diversity (TX diversity), beamforming και RF processing.

### 2.3.2. Πολλαπλή πρόσβαση

Το σύστημα πολλαπλής πρόσβασης του φυσικού επιπέδου του LTE βασίζεται στο Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) με ένα κυκλικό πρόθεμα/cyclic prefix (CP) για το downlink και στο Single-Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) με ένα cyclic prefix για το uplink. Για τη μετάδοση και σε paired και unpaired spectrum, υποστηρίζονται δύο duplex modes. Αυτά είναι το Time Division Duplex (TDD) το Frequency Division Duplex (FDD), υποστηρίζοντας λειτουργία (και σε) full duplex και (σε) half duplex.

Το Layer 1 ορίζεται με ένα τρόπο ώστε να του είναι άγνωστο το εύρος ζώνης, βασίζεται σε resource blocks, επιτρέποντας το να προσαρμόζεται σε ένας εύρος κατανομών φάσματος (spectrum allocations). Ένα resource block αποτελείται είτε από 12 sub-carriers των 15KHz είτε από 24 sub-carriers των 7.5KHz. Και στις δύο περιπτώσεις εκτείνεται σε ένα slot διάρκειας 0.5ms.

Για το φυσικό επίπεδο του LTE έχουν καθοριστεί δύο τύποι radio frame structure με βάση το duplex mode που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε. Για το FDD – και για τις δύο λειτουργίες του – έχει οριστεί το radio frame structure type 1, το οποίο έχει διάρκεια 10ms και αποτελείται από 20 slots διάρκειας 0.5ms. Δύο γειτονικά slots συνιστούν ένα sub-frame διάρκειας 1ms. Για το TDD χρησιμοποιείται το radio frame structure type 2, το οποίο αποτελείται από δύο half-frames με διάρκεια 5ms έκαστο. Κάθε half-frame περιέχει 8 slots μήκους 0.5ms και τρία ειδικά πεδία (DwPTS, GP και UpPTS), τα οποία έχουν διαμορφώσιμα επιμέρους μήκη και ένα συνολικό μήκος 1ms. Ένα sub-frame συνίσταται από δύο γειτονικά slots, με εξαίρεση τα sub-frames 1 και 6, που αποτελούνται από τα ειδικά πεδία. Υποστηρίζεται switch-point periodicity και για 5ms και για 10ms.

Σημαντικό στοιχείο του φυσικού επιπέδου είναι η υποστήριξη πολλαπλών κεραιών στον πομπό και στο δέκτη (MIMO), περιλαμβάνοντας διατάξεις έως και 8 κεραιών εκπομπής και 8 κεραιών λήψης για το downlink. Αυτό καθιστά δυνατή τη multi-layer downlink μετάδοση μέχρι και 8 streams. Επίσης, η κατανομή διαφορετικών streams σε διαφορετικούς χρήστες – MU-MIMO – υποστηρίζεται και για το UL και για το DL.

Μία προσθήκη του Rel. 10 είναι και η υποστήριξη της πρόσθεσης πολλαπλών cells για το UL και το DL. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρι και 5 cells, με το καθένα να μπορεί να εξυπηρετήσει με ένα μέγιστο εύρος ζώνης μετάδοσης των 110 resource blocks.

### 2.3.3. Φυσικά κανάλια και διαμόρφωση

Το LTE air interface αποτελείται από φυσικά κανάλια και σήματα τα οποία καθορίζονται στο [5] και δημιουργούνται από το φυσικό επίπεδο του LTE. Τα φυσικά κανάλια μεταφέρουν δεδομένα ελέγχου, προγραμματισμού και user payload από υψηλότερα layers, ενώ τα φυσικά σήματα χρησιμοποιούνται για το συγχρονισμό του συστήματος, αναγνώριση κυψέλης και για την εκτίμηση του καναλιού.

Τα είδη των downlink φυσικών καναλιών είναι τα Physical Downlink Shared Channel (PDSCH), Physical Multicast Channel (PMCH), Physical Downlink Control Channel

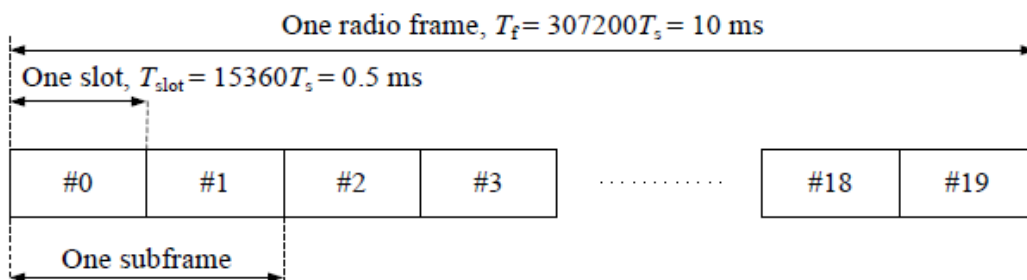
(PDCCH), Relay Physical Downlink Control Channel (R-PDCCH), Physical Broadcast Channel (PBCH), Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH) και το Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH).

Επιπρόσθετα, τα σήματα διαχωρίζονται σε σήματα αναφοράς, καθώς και σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα σήματα συγχρονισμού. Τα είδη διαμόρφωσης που υποστηρίζονται είναι τα QPSK, 16QAM και 64QAM.

#### 2.4. Δομή του DL frame και φυσικά resource elements

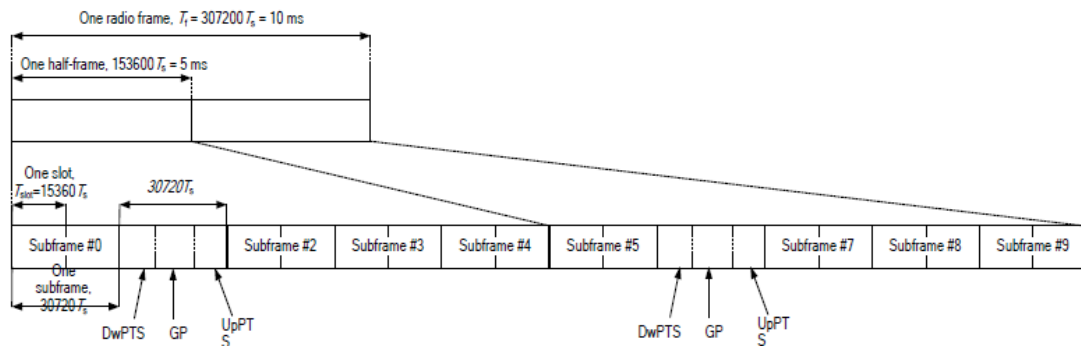
Στις προδιαγραφές του φυσικού επιπέδου του LTE, η περιγραφή των μεγεθών στο πεδίο του χρόνου δίνεται ως αριθμός μονάδων χρόνου  $T_s = 1/(15000 \cdot 2048) \text{ sec} = 32.55 \text{ nsec}$ . Το  $T_s$  αποτελεί τη μικρότερη μονάδα χρόνου στο LTE και μπορεί να θεωρηθεί ως ο χρόνος δειγματολήπτησης (sampling time) ενός συστήματος πομπού-δέκτη βασισμένο σε FFT υλοποίηση (βλέπε κεφάλαιο ...), με μήκος FFT ίσο με 2048.

Για το φυσικό επίπεδο του LTE έχουν καθοριστεί δύο τύποι radio frame structure με βάση το duplex mode που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε. Για το FDD – και για τις δύο λειτουργίες του – έχει οριστεί το radio frame structure type 1, ενώ για το TDD χρησιμοποιείται το radio frame structure type 2. Και οι δύο τύποι έχουν διάρκεια 10ms, αποτελούνται από 20 slots των 0.5ms, τα οποία ανά δύο γειτονικά συνιστούν ένα sub-frame. Η διάρκεια ενός sub-frame, 1ms, αποτελεί το ελάχιστο Transmit Time Interval (TTI).



Σχήμα 2.19: Frame structure type 1

Στο Σχήμα 2.19 παρουσιάζουμε το Frame structure type 1. Όπως προαναφέραμε έχει επιλεγεί για την FDD λειτουργία, χρησιμοποιώντας 10 sub-frames για το downlink και 10 για το uplink σε κάθε διάρκεια των 10ms. Στο πεδίο της συχνότητας οι μεταδόσεις UL και DL διαχωρίζονται μεταξύ τους. Πρέπει να πούμε πως στην περίπτωση half-duplex λειτουργίας, ο εξοπλισμός χρήστη δεν μπορεί να εκπέμψει και να δεχτεί την ίδια στιγμή, περιορισμός που δεν ισχύει για το full-duplex FDD.



Σχήμα 2.20: Frame structure type 2 (για 5ms switch-point periodicity)

Για την TDD λειτουργία έχει επιλεγεί το Frame structure type 2, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.20. Το radio frame αποτελείται από δύο half-frames των 5ms, με το καθένα να περιέχει 5 sub-frames διάρκειας 1ms. Έχουν οριστεί 7 διαμορφώσεις για τη δομή του radio frame, με βάση την switch-point periodicity και το είδος της μετάδοσης και τις παρουσιάζουμε στον Πίνακα 2.1. Για κάθε sub-frame σε ένα radio frame, το “D” υποδηλώνει πως το subframe έχει επιλεγεί για μεταδόσεις downlink, το “U” για μεταδόσεις uplink και το “S” για τη μετάδοση του special subframe με τα τρία πεδία DwPTS, GP και UpPTS.

Uplink-downlink configuration	Downlink-to-Uplink Switch-point periodicity	Subframe number									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 ms	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 ms	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 ms	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 ms	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 ms	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Πίνακας 2.1: Διαμορφώσεις Uplink – Downlink για το Frame structure type 2

### Δομή Slot και φυσικά resource elements

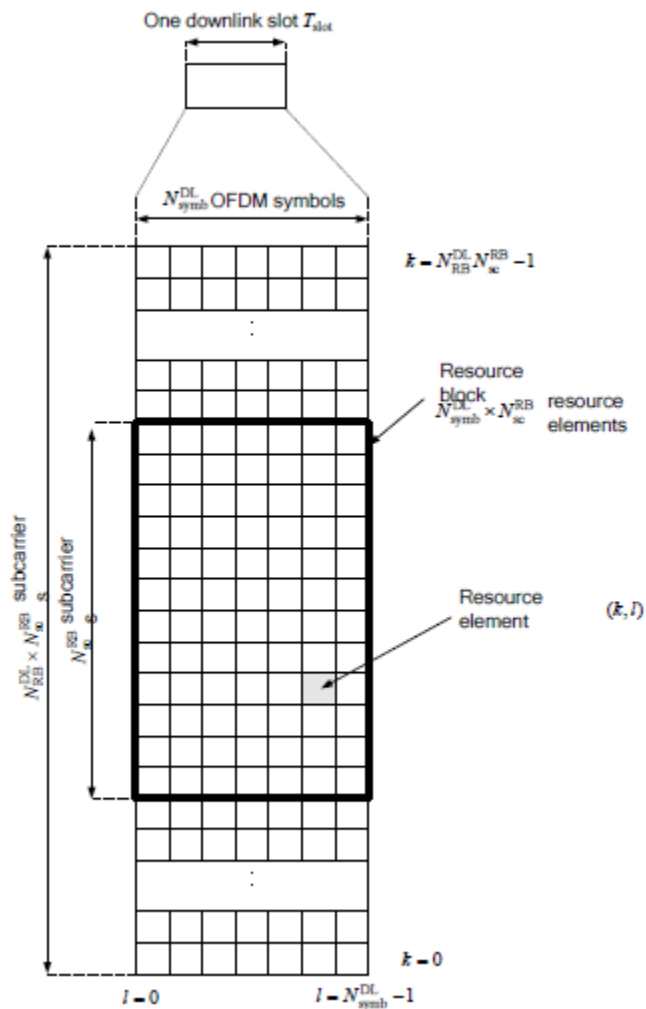
Το εκπεμπόμενο σήμα σε κάθε slot περιγράφεται από ένα ή περισσότερα resource grids που αποτελούνται από subcarriers και OFDM σύμβολα. Η δομή του resource grid δίνεται στο Σχήμα 2.21. Η ποσότητα συμβολίζει τον αριθμό των Resource Blocks (RB) και εξαρτάται από το εύρος ζώνης που έχει οριστεί για το downlink στο cell. Μπορεί να πάρει τιμές μεταξύ 6 και 110, σύμφωνα με τον Πίνακα 2.2. Ο αριθμός των OFDM συμβόλων σε ένα slot εξαρτάται από μήκος του CP και το subcarrier spacing με βάση τον Πίνακα 2.3.



Ένα antenna port καθορίζεται έτσι ώστε το κανάλι στο οποίο διαβιβάζεται ένα σύμβολο από το antenna port μπορεί να inferred από το κανάλι στο οποίο διαβιβάζεται άλλο σύμβολο από το ίδιο antenna port. Για κάθε antenna port υπάρχει ένα resource grid.

Το μικρότερο μέγεθος χρόνου – συχνότητας για το downlink καλείται resource element. Το resource element αποτελεί ένα στοιχείο στο resource grid για το antenna port  $p$ . Κάθε resource element ορίζεται μοναδικά σε ένα slot μέσω του ζεύγους δεικτών  $(k,l)$ . Η αντιστοίχιση των φυσικών καναλιών σε resource elements γίνεται με τη χρήση των Resource Blocks (RBs). Οι προδιαγραφές ορίζουν physical και virtual RBs. Ένα PRB ορίζεται ως συνεχόμενα OFDM σύμβολα στο πεδίο του χρόνου, ενώ στο πεδίο της συχνότητας ορίζεται ως συνεχόμενα subcarriers.

Το φυσικό επίπεδο του LTE έχει ορίσει ένα εναλλακτικό τρόπο για την επίτευξη frequency diversity πέρα από τη χρήση OFDM. Το επιτυγχάνει με τα resource allocation types 0 και 1, τα οποία διανέμουν συχνοτικά τη downlink μετάδοση, εκχωρώντας μη συνεχόμενα στη συχνότητα RBs σε ένα δέκτη. Για την υλοποίηση των resource allocation types δημιουργήθηκε η έννοια του Virtual Resource Block (VRB), με την κατανομή να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη ζεύγη VRBs. Υπάρχουν δύο τύποι VRBs με βάση την αντιστοίχσή τους στα PRBs, τα localized και τα distributed. Τα localized VRB ζεύγη αντιστοιχίζονται απευθείας στα PRBs ζεύγη. Για τα distributed ζεύγη ισχύει ότι συνεχόμενα VRB ζεύγη δεν μπορούν να αντιστοιχηθούν σε συνεχόμενα στη συχνότητα PRB ζεύγη, καθώς και η δυνατότητα ένα μόνο VRB ζεύγος να διανεμηθεί συχνοτικά.[7]



Σχήμα 2.21: Δομή resource grid

Channel bandwidth $BW_{\text{Channel}}$ [MHz]	1.4	3	5	10	15	20
Transmission bandwidth configuration $N_{\text{RB}}$	6	15	25	50	75	100
Number of occupied subcarriers	72	180	300	600	900	1200
IFFT/FFT size	128	256	512	1024	1536	2048

Πίνακας 2.2: Transmission bandwidth configuration  $N_{\text{RB}}$  in E-UTRA channel bandwidths

Configuration		$N_{sc}^{RB}$	$N_{symb}^{DL}$	Cyclic prefix length $N_{CP,l}$	Cyclic Prefix length in ms
Normal cyclic prefix	$\Delta f = 15 \text{ kHz}$	12	7	160 for $l = 0$	5.2μs για το πρώτο σύμβολο
				144 for $l = 1, 2, \dots, 6$	4.7μs για τα επόμενα σύμβολα
Extended cyclic prefix	$\Delta f = 15 \text{ kHz}$	24	3	512 for $l = 0, 1, \dots, 5$	16.7μs
	$\Delta f = 7.5 \text{ kHz}$			1024 for $l = 0, 1, 2$	33.3μs

Πίνακας 2.3: Παράμετροι Physical resource blocks.

### 2.5. Επεξεργασία καναλιού μεταφοράς

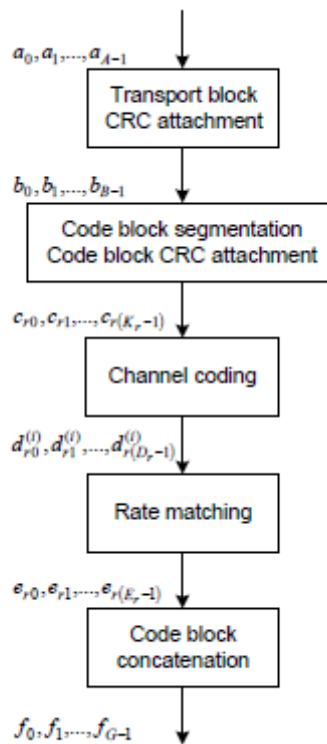
Τα streams δεδομένων και ελέγχου από το MAC layer κωδικοποιούνται για να προσφέρουν υπηρεσίες μεταφοράς και ελέγχου στη (ραδιο)ζεύξη μετάδοσης (radio transmission link). Το σύστημα κωδικοποίησης καναλιού αποτελεί ένα συνδυασμό εύρεσης και διόρθωσης σφαλμάτων, rate matching, αναδιάταξης και αντιστοίχισης των καναλιών μεταφοράς ή της πληροφορίας ελέγχου στα φυσικά κανάλια.

Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η δομή επεξεργασίας για κάθε transport block για τα DL-SCH, PCH και MCH κανάλια μεταφοράς. Τα δεδομένα φτάνουν στη μονάδα κωδικοποίησης με τη μορφή transport block (δύο τον αριθμό μέγιστο) σε κάθε transmission time interval (TTI=1ms) ανά DL cell. Η διαδικασία για κάθε transport block ενός DL cell έχει καθοριστεί με τα παρακάτω βήματα:

Πρόσθεση Cyclic Redundancy Check (CRC) στο transport block

- Καταμερισμός του code block και προσθήκη του CRC σε αυτό
- Κωδικοποίηση καναλιού
- Rate matching
- Ένωση των code blocks

Ακολουθεί η περιγραφή της παραπάνω διαδικασίας με βάση το Σχήμα 2.22.



Σχήμα 2.22: Transport block processing για DL-SCH, PCH και MCH

### 2.5.1. Προσθήκη CRC στο transport block

Το CRC είναι μία μέθοδος για τον εντοπισμό σφαλμάτων σε μία ακολουθία από bit. Η robustness του εξηγείται μέσω της μικρής πιθανότητας η ακολουθία μπορεί να έχει σφάλματα τα οποία δεν έχουν εντοπιστεί. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται συνήθως στις τηλεπικοινωνίες. [16]

Στο LTE χρησιμοποιείται για να παρέχει εντοπισμό σφαλμάτων στα transport blocks. Ολόκληρο το transport block χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των CRC parity bits. Θέτουμε ως  $a_0, a_1, a_2, a_3, \dots, a_{A-1}$  τα bits σε ένα transport block που παραδίδονται στο layer 1 και ως  $p_0, p_1, p_2, p_3, \dots, p_{L-1}$  τα parity bits.  $A$  είναι το μέγεθος του transport block και  $L$  είναι ο αριθμός των parity bits. Τα parity bits υπολογίζονται και τοποθετούνται στο transport block, θέτοντας το  $L$  ίσο με 24 και χρησιμοποιώντας τη γεννήτρια πολυωνύμων  $gCRC24A(D)[7]$ . Η ένδειξη σφάλματος αποστέλλεται στα υψηλότερα επίπεδα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αίτηση αναμετάδοσης μέσω του HARQ πρωτόκολλου.

### 2.5.2. Καταμερισμός του code block και προσθήκη του CRC σε αυτό

Σε περίπτωση που το μέγεθος του code block (transport + CRC) ξεπερνάει το μέγιστο μήκος που έχει οριστεί ως είσοδος στον Turbo κωδικοποιητή, θα διαμεριστεί σε μικρότερα blocks στα οποία προστίθεται εκ νέου 24 bit CRC.

Τα bits εισόδου στο code block segmentation ορίζονται ως  $b_0, b_1, b_2, b_3, \dots, b_{B-1}$ , όπου  $B$  ο αριθμός των bits στο transport block (με CRC). Τα bits στην έξοδο ορίζονται ως  $c_{r0}, c_{r1}, c_{r2}, c_{r3}, \dots, c_{r(K_r-1)}$ , όπου  $r$  είναι ο αριθμός του code block και  $K_r$  είναι ο αριθμός των bits στο code block  $r$ .

### 2.5.3. Κωδικοποίηση Καναλιού

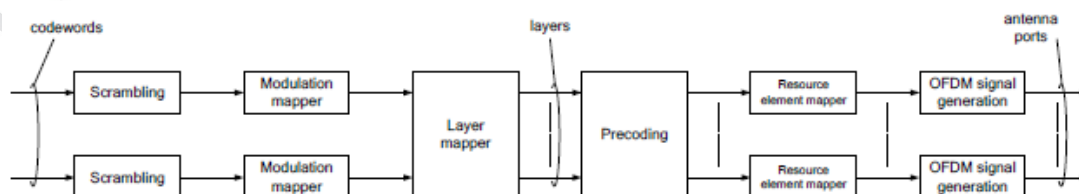
Η κωδικοποίηση καναλιού που έχει επιλεγεί για το LTE είναι η Turbo. Ο Turbo κωδικοποιητής του LTE κάνει χρήση δύο συνελκτικών κωδικοποιητών 8-καταστάσεων, ρυθμού  $1/2$ . Η είσοδος στο δεύτερο συστατικό κωδικοποιητή αναδιατάσσεται χρησιμοποιώντας ένα εσωτερικό αναδιατάκτη (αναλυτικά στο κεφάλαιο 2).

Τα code blocks, τα οποία ορίζονται ως  $c_{r0}, c_{r1}, c_{r2}, c_{r3}, \dots, c_{r(K_r-1)}$ , οδηγούνται στον Turbo κωδικοποιητή. Ο συνολικός αριθμός των code blocks είναι ίσος με  $C$  και κάθε block κωδικοποιείται ξεχωριστά. Στην έξοδο του κωδικοποιητή τα bits συμβολίζονται με  $D_{r(D_r-1)}$ , με  $i=0, 1, 2$  και  $D_r$  είναι ο αριθμός των bits στο  $i$ -οστό κωδικοποιημένο stream για το code block  $r$ .

### 2.6. Γενική δομή για τα DL φυσικά κανάλια

Όπως προαναφέραμε η επεξεργασία των καναλιών μεταφοράς μετατρέπει τα transport blocks από το Layer 2 σε κωδικολέξεις που αποτελούν την είσοδο στο Layer 1 για την επεξεργασία των φυσικών καναλιών. Η γενική δομή για την επεξεργασία του σήματος των φυσικών καναλιών στο DL δίνεται στο Σχήμα 2.23. Οι κωδικολέξεις που προέρχονται από την επεξεργασία των καναλιών μεταφοράς πρέπει να επεξεργαστούν σύμφωνα με τα παρακάτω βήματα για να μετατραπούν σε σήματα βασικής ζώνης που αναπαριστούν DL φυσικά κανάλια:

- Scrambling των bits των κωδικολέξεων που πρόκειται να μεταδοθούν σε ένα φυσικό κανάλι.
- Διαμόρφωση των scrambled bits για την παραγωγή μιγαδικών συμβόλων
- Αντιστοίχιση των συμβόλων σε ένα από τα επίπεδα μετάδοσης (transmission layers)
- Προκωδικοποίηση (precoding) των συμβόλων σε κάθε επίπεδο για μετάδοση στα antenna ports
- Αντιστοίχιση των συμβόλων για κάθε antenna port σε resource elements
- Δημιουργία μιγαδικού OFDM σήματος στο πεδίο του χρόνου για κάθε antenna port



Σχήμα 2.23: Επισκόπηση της επεξεργασίας των φυσικών καναλιών

### 2.6.1.Scrambling

Το scrambling αποτελεί πρακτικά μία αναδιάταξη της ακολουθίας των bits. Σκοπός της δεν είναι η δημιουργία ακολουθιών που θα δώσει καλύτερη απόδοση στο σύστημα όπως στην περίπτωση της αναδιάταξης σε ένα σύστημα κωδικοποίησης, αλλά να δώσει στο σύστημα κάποιες χρήσιμες ιδιότητες.

Στο LTE χρησιμοποιείται ένας additive (synchronous) scrambler, ο οποίος μετατρέπει το stream εισόδου χρησιμοποιώντας την modulo-2 πρόσθεση, της ακολουθίας εισόδου με ψευδοτυχαίες ακολουθίες. Σκοπός του είναι να καθιστά τυχαίες τις παρεμβολές (interference randomization) μεταξύ γειτονικών cells, καθώς αντιστοιχίζεται στο καθένα μία διαφορετική scrambling ακολουθία, με αποτέλεσμα την πλήρη εκμετάλλευση του κέρδους που προσφέρει η κωδικοποίηση καναλιού.

### 2.6.2.Διαμόρφωση

Μετά το scrambling, το σύνολο των bits της κωδικολέξης  $q$  θα διαμορφωθούν με βάση ένα από τα συμβατικά συστήματα διαμόρφωσης – QPSK, 16QAM, 64QAM –. Η διαμόρφωση θα δώσει με τη σειρά της ένα μπλοκ μιγαδικών διαμορφωμένων συμβόλων.

### 2.6.3.Αντιστοίχιση σε επίπεδα (Layer Mapping)

Τα διαμορφωμένα σύμβολα κάθε κωδικολέξης πρόκειται να αντιστοιχηθούν σε ένα ή πολλαπλά επίπεδα. Ανάλογα με το είδος της μετάδοσης ο αριθμός των κωδικολέξεων μπορεί να είναι μία ή δύο και ο αριθμός των επιπέδων από ένα μέχρι οκτώ. Σε κάθε περίπτωση ο αριθμός των επιπέδων  $v$  πρέπει να είναι μικρότερος ή ίσος από τον αριθμό των antenna ports  $P$  που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση των φυσικών καναλιών. Η αντιστοίχιση των διαμορφωμένων κωδικολέξεων στα διαθέσιμα antenna ports γίνεται μερικώς από τον MAC Scheduler.

### 2.6.4.Προκωδικοποίηση (Precoding)

Η προκωδικοποίηση μπορεί να περιγραφεί ως η εφαρμογή διαφορετικών μιγαδικών βαρών στα σήματα που πρόκειται να μεταδοθούν από τις κεραιές το πομπού. Μπορούμε να πούμε ότι το βήμα της προκωδικοποίησης καθορίζει κατά το μεγαλύτερο ποσοστό το είδος της μετάδοσης που θα ακολουθήσει. Αυτό προκύπτει από το γεγονός πως τα διανύσματα σήματος που πρόκειται να αποσταλούν από τα antenna ports προκύπτουν από τα διανύσματα της αντιστοίχισης επιπέδων με τον πολλαπλασιασμό τους με ένα πίνακα  $W(i)$ , για τη γενική περίπτωση. Δηλαδή, με βάση τον πίνακα  $W(i)$ , ο πομπός καθορίζει ποια σήματα θα εκπεμφθούν από ποιες κεραιές. Μέσα από ένα μεγάλο σύνολο πινάκων, ανάλογα με την τεχνική που επιλέγεται, προκύπτουν αρκετά υποσύνολα τεχνικών μετάδοσης με σκοπό τη βέλτιστη λήψη από το δέκτη και με γνώμονα τη γνώση του καναλιού.

### 2.6.5. Αντιστοίχιση σε resource elements

Στη συνέχεια τα διαμορφωμένα σύμβολα θα αντιστοιχηθούν σε στοιχεία στο resource grid. Η θέση κάθε στοιχείου εξαρτάται από το είδος του καναλιού και του σήματος (data, control, reference, synchronization) που πρόκειται να μεταδοθεί καθώς και από ποια antenna ports έχει προγραμματιστεί να γίνει η εκπομπή. Η διαδικασία αυτή ελέγχεται από το Layer 2.

### 2.6.6. Δημιουργία μιγαδικού OFDM σήματος

Οι προδιαγραφές δεν περιγράφουν και δεν επιβάλλουν μία συγκεκριμένη δομή για την παραγωγή του OFDM σήματος. Έχουν δώσει, όμως, τη μορφή που πρέπει να έχει το συνεχές στο χρόνο σήμα βασικής ζώνης στο antenna port  $p$  για το OFDM σύμβολο  $l$  σε ένα DL slot:

$$s_l^{(p)}(t) = \sum_{k=-\lfloor N_{RB}^{DL} N_{sc}^{RB} / 2 \rfloor}^{-1} a_{k^{(-)},l}^{(p)} \cdot e^{j2\pi k \Delta f (t - N_{CP,l} T_s)} + \sum_{k=1}^{\lfloor N_{RB}^{DL} N_{sc}^{RB} / 2 \rfloor} a_{k^{(+)},l}^{(p)} \cdot e^{j2\pi k \Delta f (t - N_{CP,l} T_s)}$$

### **3. IEEE 802.11 - WIFI**

#### **3.1. Εισαγωγή**

Τον Ιούνιο του 1997, το Ινστιτούτο των Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών - Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) κατέληξε στο αρχικό πρότυπο για ασύρματα δίκτυα Wireless Local Area Networks (WLANs), IEEE 802.11. Αυτό το πρότυπο προδιέγραφε ως συχνότητα λειτουργίας τα 2,4 GHz, με ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων 1 και 2 Mbps.

Αποτελεί το πρώτο πρότυπο για ασύρματη δικτύωση και ακολουθείται από τα περισσότερα ασύρματα δίκτυα μέχρι και σήμερα. Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα τα οποία είναι συμβατά με το πρότυπο IEEE 802.11 ονομάζονται και δίκτυα Wi-Fi «Wireless Fidelity» (Ψηφιακή Πιστότητα). [3]

#### **3.2. Αρχιτεκτονική - Τοπολογία Δικτύου**

Η διάρθρωση ενός ασύρματου IEEE 802.11 δικτύου μπορεί να είναι πολύ απλή ως και αρκετά σύνθετη, παρουσιάζοντας εξαιρετική δυνατότητα κλιμάκωσης. Ορίζονται δύο διαφορετικοί τρόποι διάρθρωσης δικτύου:

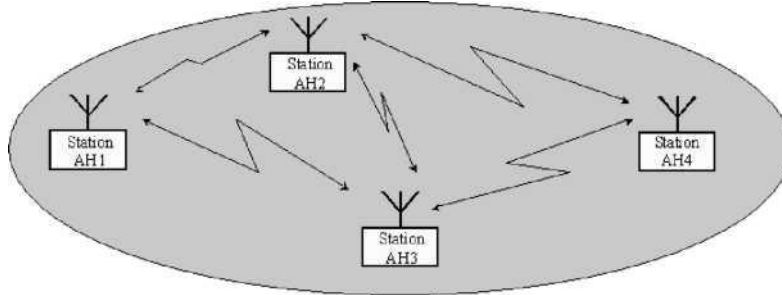
- τα ανεξάρτητα δίκτυα (independent networks)
- τα δίκτυα υποδομής (infrastructure networks)

##### **3.2.1. Ανεξάρτητα Δίκτυα**

Η πιο απλή διάρθρωση στην οποία το BSS (Basic Service Set - κυψέλη) αποτελείται από δύο ή περισσότερους ασύρματους κόμβους ή σταθμούς (STAs) και κάθε σταθμός επικοινωνεί απευθείας με όλους τους υπόλοιπους εφόσον βρίσκεται στη περιοχή ραδιοκάλυψής τους. Το BSS σε αυτή την περίπτωση αναφέρεται και ως IBSS (Independent Basic Service Set) ή ad-hoc BSS ή ad-hoc δίκτυο και είναι συνήθως προσωρινό, δηλαδή δημιουργείται για κάποιο σκοπό και στη συνέχεια διαλύεται. Πρόκειται για τον απλούστερο τύπο ασύρματου δικτύου.



IBSS



Σχήμα 3.1. Διάρθρωση Ανεξάρτητου Δικτύου

### 3.2.2. Δίκτυα Υποδομής

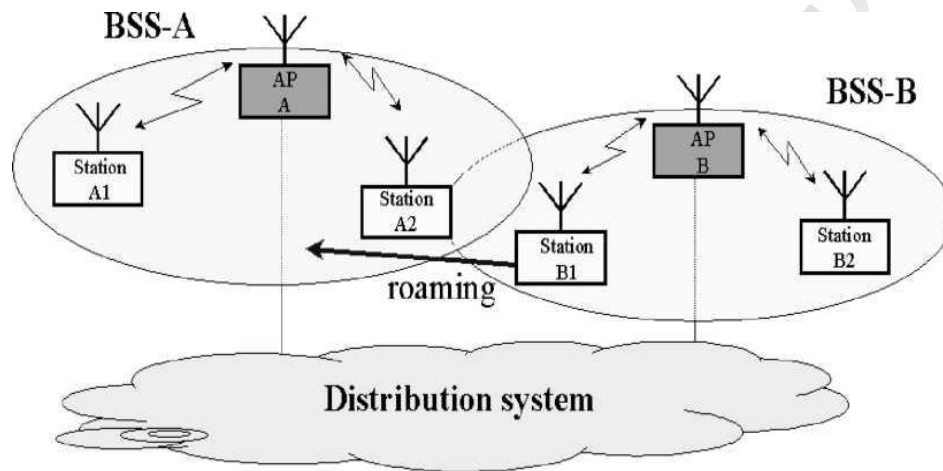
Ακολουθεί μια κυψελοειδή αρχιτεκτονική, όπου το δίκτυο χωρίζεται σε κυψέλες με κάθε κυψέλη να ονομάζεται BSS (Basic Service Set). Κάθε κυψέλη περιλαμβάνει ένα σταθμό βάσης AP (Access Point) και ένα αριθμό από ασύρματους σταθμούς. Το AP παρέχει τη λειτουργία της μεταγωγής στο BSS. Έτσι όλοι οι σταθμοί επικοινωνούν κατευθείαν μόνο με το AP και αυτό μετάγει τα πακέτα από τον ένα σταθμό στον άλλον.

Τα AP συνδέονται μεταξύ τους ή/και με άλλα δίκτυα μέσω ενός δικτύου μετάδοσης το οποίο ονομάζεται DS (Distribution System). Η IEEE δεν προδιαγράφει την υλοποίηση αυτού του δικτύου. Έτσι αυτό μπορεί να είναι Ethernet ενσύρματο, ασύρματο, ή και κάποια άλλη τεχνολογία. Το δίκτυο αυτό έχει τη μορφή ενός δικτύου κορμού (backbone). Έτσι τα AP παρέχουν την υπηρεσία της τοπικής πρόσβασης στους ασύρματους σταθμούς πελάτες, καλύπτοντας τα τελευταία εκατοντάδες μέτρα. Στην συνέχεια το δίκτυο κορμού μεταφέρει την πληροφορία από το ένα AP στο άλλο. Όλη η δομή δικτύου αυτή ονομάζεται ESS (Extended Service Set). [5][6][7]

### 3.3. Βασικές Υπηρεσίες του IEEE 802.11

Το ασύρματο δίκτυο 802.11 προσφέρει εννέα βασικές υπηρεσίες:

**Distribution:** Η υπηρεσία αυτή είναι απαραίτητη για την παράδοση ενός πλαισίου από το AP στον τελικό προορισμό του. Συνίσταται στον εντοπισμό του



παραλήπτη, ώστε να γίνει Σχήμα 3.2. Διάρθρωση Δικτύου Υποδομής

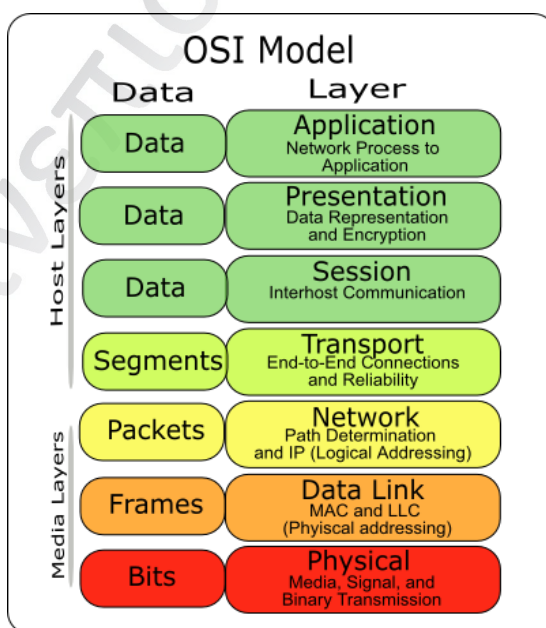
εφικτή η τελική παράδοση του πλαισίου .

- **Integration:** Η υπηρεσία αυτή παρέχεται από το σύστημα διανομής. Είναι υπεύθυνη για τη διασύνδεση του συστήματος διανομής DS σε ένα δίκτυο διαφορετικό του 802.11. Στην ουσία είναι υπεύθυνη για την μετάφραση των πλαισίων από τον ένα τύπο στον άλλο.
- **MSDU Delivery:** Η παράδοση των πλαισίων MAC (MAC Service Data Unit) στον τελικό προορισμό τους.
- **Association:** Απαραίτητη διαδικασία συσχετισμού ενός σταθμού με το AP, προκειμένου να είναι σε θέση να στείλει και να δεχτεί πλαίσια μέσω του ασυρμάτου δικτύου.

- Reassociation: Χρησιμοποιείται από τους κινητούς σταθμούς σε περίπτωση μετακίνησης από ένα BSS σε άλλο.
- Disassociation: Η διαδικασία αυτή αφαιρεί έναν σταθμό από το δίκτυο. Το MAC του 802.11 μπορεί να χειριστεί και σταθμούς που εγκαταλείπουν το δίκτυο χωρίς να κάνουν πρώτα disassociation.
- Authentication: Αν απαιτείται από το διαχειριστή του δικτύου, πρέπει κάθε χρήστης να πιστοποιεί την ταυτότητά του πριν να προχωρήσει στη διαδικασία του association.
- Deauthentication: Τερματισμός μιας ισχύουσας κατάστασης authentication. Τερματίζει επίσης και το association, εφόσον το authentication είναι προαπαιτούμενο αυτού.
- Privacy: Λόγω του ασύρματου περιβάλλοντος μετάδοσης έχει οριστεί από το 802.11 μία προαιρετική υπηρεσία κρυπτογράφησης των δεδομένων που ονομάζεται WEP (Wired Equivalent Privacy). [8]

### 3.4. Στοιβα Πρωτοκόλλων του IEEE 802.11

Καταρχήν για την καλύτερη κατανόηση των παρακάτω, θα παρουσιάσουμε εν συντομία το μοντέλο OSI (Open System Interconnection):



- Επίπεδο 1, Φυσικό (Physical). Μεταφέρει σήματα στο φυσικό μέσο.
- Επίπεδο 2, Σύνδεσης ή Ζεύξης (Data Link). Αναλαμβάνει τον συγχρονισμό και έλεγχο της σωστής μεταφοράς δεδομένων κατά μήκος της φυσικής σύνδεσης.
- Επίπεδο 3, Επίπεδο Δικτύου (Network). Αναλαμβάνει λειτουργίες δρομολόγησης και μεταγωγής.
- Επίπεδο 4, επίπεδο Μεταφοράς (Transport). Χρησιμοποιεί τα επίπεδα 1 έως 3 (επίπεδα δικτύου) για να προσφέρει μια διαφανή (transparent) μεταφορά δεδομένων διαμέσου του δικτύου από το ένα σύστημα στο άλλο.
- Επίπεδο 5, επίπεδο Συνόδου (Session). Ελέγχει την εγκαθίδρυση και τον τερματισμό των συνδέσεων μεταφοράς. Αποτελεί τη γέφυρα μεταξύ των στρωμάτων που έχουν σχέση με τη μεταφορά δεδομένων (επίπεδο 4) και αυτών που αφορούν τις εφαρμογές (επίπεδα 5-7).
- Επίπεδο 6, επίπεδο Παρουσίασης (Presentation). Αναλαμβάνει τον χειρισμό και τη μορφοποίηση των δεδομένων.
- Επίπεδο 7, επίπεδο Εφαρμογής (Application). Είναι το Ενδιάμεσο Επικοινωνίας (Interface) μεταξύ των εφαρμογών των τελικών χρηστών και των υπολοίπων επιπέδων. Τα επίπεδα 1 έως 4 είναι προσανατολισμένα στη μεταφορά των δεδομένων και τα επίπεδα 1 έως 3 αφορούν υπηρεσίες που προσφέρονται από ένα δίκτυο. Τέλος, τα επίπεδα 4 έως 7 αφορούν λειτουργίες του τελικού χρήστη.

Το κάθε επίπεδο προσθέτει κατά την αποστολή στα δεδομένα που του έδωσε το προηγούμενο επίπεδο ένα "περίβλημα" έτσι ώστε το περιεχόμενο να είναι αδιαφανές για το επίπεδο που παρέχει την υπηρεσία. Το "περίβλημα" χρησιμοποιείται για τη διαχείριση του πρωτοκόλλου του επιπέδου που το πρόσθεσε. Για παράδειγμα, σε ένα πακέτο που φεύγει από το επίπεδο 7 θα προστεθούν διαδοχικά πληροφορίες στην αρχή ή και στο τέλος και θα αφαιρεθούν διαδοχικά από το άλλο άκρο κατά την άφιξη, έτσι ώστε τα δεδομένα

να φτάσουν στο επίπεδο 7 όπως στάλθηκαν. Οι πληροφορίες αυτές είναι διαφόρων ειδών όπως χαρακτήρες ελέγχου σφαλμάτων, διευθύνσεις κ.λπ. Αυτή η πράξη λέγεται ενθυλάκωση και γίνεται σε όλα τα πακέτα είτε αυτά προέρχονται από το αμέσως υψηλότερο επίπεδο είτε είναι πακέτα που δημιουργούνται κατά τον τεμαχισμό μεγαλύτερου πακέτου στο επίπεδο.

Όπως όλα τα 802.x πρότυπα, έτσι και το 802.11 επικεντρώνεται στα δύο χαμηλότερα στρώματα του μοντέλου OSI (Open System Interconnection), δηλαδή στο φυσικό στρώμα (Physical Layer-PHY) και στο υπόστρωμα MAC (Medium Access Control - Ελέγχου προσπέλασης Μέσων) του στρώματος διασύνδεσης δεδομένων (Data Link Layer).

Το υπόστρωμα MAC ορίζει πώς γίνεται η εκχώρηση του καναλιού, δηλαδή ποιος θα μεταδώσει στη συνέχεια. Το υπόστρωμα LLC (Logical Link Control-Έλεγχος Λογικού Συνδέσμου) του στρώματος Data Link βρίσκεται πάνω από το υπόστρωμα MAC, έχει υλοποιηθεί ως IEEE 802.2 και δουλειά του είναι να κρύβει τις διαφορές ανάμεσα στις διαφορετικές παραλλαγές του 802, έτσι ώστε να κάνει τις παραλλαγές αυτές “αόρατες” όσον αφορά το επίπεδο δικτύου.

Το πρότυπο του 1997 καθορίζει τρεις επιτρεπόμενες τεχνικές μετάδοσης για το φυσικό στρώμα (PHY). Η μέθοδος των υπερύθρων και άλλες δύο μέθοδοι που χρησιμοποιούν ραδιοκύματα μικρής εμβέλειας χρησιμοποιώντας τεχνικές που ονομάζονται FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) και DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum). Και οι δύο χρησιμοποιούν ένα τμήμα του φάσματος στο οποίο δεν απαιτείται ειδική άδεια (τη ζώνη ISM στα 2,4 GHz). Το 1999 παρουσιάστηκαν δύο νέες τεχνικές για επίτευξη υψηλότερου εύρους ζώνης. Οι τεχνικές αυτές ονομάζονται OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) και KR-DSSS (High Rate DSSS) και λειτουργούν μέχρι τα 54 Mbps και τα 11 Mbps αντίστοιχα. Το 2001 παρουσιάστηκε και μια δεύτερη

τεχνική διαμόρφωσης OFDM, αλλά σε διαφορετική ζώνη συχνοτήτων από την πρώτη. [9][10]

### **3.5. Φυσικό στρώμα στο IEEE 802.11**

Το φυσικό επίπεδο αναλαμβάνει την μετάδοση των δεδομένων μεταξύ των κόμβων, αναλαμβάνοντας τις λειτουργίες όπως της διαμόρφωσης, λήψης και εκπομπής. Προδιαγράφονται τρεις τεχνικές διαμόρφωσης:

#### **3.5.1. Infrared (Υπέρυθρες Ακτίνες)**

Η τεχνική των υπέρυθρων ακτινών δεν χρησιμοποιείται ιδιαίτερα λόγω του χαμηλού εύρους ζώνης και του γεγονότος ότι το φως του ήλιου εξαφανίζει τα υπέρυθρα σήματα. Τα υπέρυθρα σήματα δεν μπορούν να διαπεράσουν τους τοίχους, έτσι οι κυψέλες (BSS) που βρίσκονται σε ξεχωριστά δωμάτια είναι καλά απομονωμένες η μία από την άλλη.

#### **3.5.2. Frequency Hopping Spread Spectrum - FHSS & Direct Sequence Spread Spectrum - DSSS**

Και η FHSS και η DSSS είναι τεχνικές εξάπλωσης απλωμένου φάσματος (spread spectrum). Και στις δύο υποστηρίζονται ρυθμοί μετάδοσης 1 και 2 Mbps στην ζώνη συχνοτήτων 2.4 - 2.4835 GHz. Αξίζει να σημειωθεί ότι και οι δύο τεχνικές έχουν τις ρίζες τους σε στρατιωτικές εφαρμογές, όπου η στιβαρότητα στη μετάδοση και η αντοχή σε παράσιτα είναι πρωταρχικοί στόχοι. Σήμερα έχουν παραδοθεί για εμπορική και βιομηχανική εκμετάλλευση.

FHSS: Η τεχνική Frequency Hopping Spread Spectrum στηρίζει τη λειτουργία της στη μεταπήδηση μεταξύ των συχνοτήτων ανά τακτά χρονικά διαστήματα, με αποτέλεσμα οι μη εξουσιοδοτημένοι χρήστες που δεν γνωρίζουν σε ποιες συχνοτήτες θα πρέπει να συντονιστούν, να αποκόπτονται από την επικοινωνία.

Μέσω της συγκεκριμένης μεθόδου το διατιθέμενο φάσμα διαχωρίζεται σε ξεχωριστά κανάλια, που στην περίπτωση των ασύρματων δικτύων που λειτουργούν στη συχνότητα των 2,4GHz ανέρχονται σε 79. Κατά την έναρξη της επικοινωνίας, ο πομπός και ο δέκτης "συμφωνούν" σε έναν συγκεκριμένο αλγόριθμο για τη μεταπήδηση των συχνοτήτων, με αποτέλεσμα να μπορούν να συντονίζονται ταυτόχρονα στη σωστή συχνότητα. Η τεχνική FHSS υλοποιήθηκε αρχικά από τον αμερικανικό στρατό, που αναζητούσε τρόπους προστασίας των ραδιοφωνικών εκπομπών του από υποκλοπές και ο αλγόριθμος στην αρχική μορφή του δεν ήταν τίποτε περισσότερο από διάτρητες καρτέλες που εισάγονταν στους πομπούς και στους δέκτες.

DSSS: Αργότερα, καθώς η ψηφιακή τεχνολογία αντικαθιστούσε τα αναλογικά συστήματα, αναπτύχθηκε μία νέα τεχνική που ονομάστηκε Direct Sequence Spread Spectrum. Με τη μέθοδο αυτή το σήμα δεν μεταπηδά από τη μία συχνότητα στην άλλη, αλλά αντίθετα διαμοιράζεται σε όλο το φάσμα των διατιθέμενων συχνοτήτων ταυτόχρονα. Για την ακρίβεια, η τεχνική DSSS χωρίζει το φάσμα συχνοτήτων σε 14 επικαλυπτόμενα κανάλια των 22ΜΗζ και χρησιμοποιεί ένα κανάλι κάθε φορά. Η συγκεκριμένη μέθοδος προσφέρει υψηλότερο ρυθμό διαμεταγωγής, επειδή ο πομπός και ο δέκτης δεν χρειάζεται να συντονίζονται συνεχώς.

Και οι δύο τεχνικές παρουσιάζουν ανθεκτικότητα στις παρεμβολές, αφού στην περίπτωση του FHSS το σήμα μεταπηδά μόνο σε ελεύθερες συχνότητες, ενώ στην περίπτωση του DSSS ο δέκτης μπορεί να λαμβάνει τη χρήσιμη πληροφορία διαχωρίζοντας τις παρεμβολές. Ο συνδυασμός και των δύο τεχνικών στον ίδιο περιβάλλοντα χώρο μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στο δίκτυο που χρησιμοποιεί το πρότυπο FHSS, αφού δεν θα μπορεί να ανιχνεύσει καμία ελεύθερη συχνότητα. Αντίθετα, η παρουσία πολλαπλών δικτύων FHSS συνήθως δεν προξενεί προβλήματα, αφού είναι λίγες οι περιπτώσεις όπου διαφορετικά

σήματα θα τύχει να πέσουν πάνω στην ίδια συχνότητα. [11] [12] [13][14]

### **3.6. Στρώμα Ελέγχου του Μέσου στο IEEE 802.11**

Πρόκειται για ένα αριθμό από πρωτόκολλα και σκοπό έχει να ελέγξει - ορίσει την χρήση του κοινόχρηστου μέσου διάδοσης (του ραδιοφωρέα) και την αξιόπιστη μετάδοση των δεδομένων. Οι λειτουργίες που προδιαγράφονται είναι οι ακόλουθες:

Πρόσβαση των σταθμών στο φυσικό δίαυλο

Ορίζονται δύο τρόποι πρόσβασης:

#### **3.6.1.DCF (Distribution Coordination Function)**

Αποτελείται βασικά από ένα μηχανισμό CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Σύμφωνα με αυτόν ένας σταθμός που επιθυμεί να εκπέμψει ανιχνεύει το ραδιοδίαυλο. Αν ο δίαυλος είναι ελεύθερος για ένα χρονικό διάστημα ο σταθμός εκπέμπει μετά από ένα τυχαίο χρονικό διάστημα. Αυτός ο τρόπος είναι ένας καλός συμβιβασμός ανάμεσα στην καθυστέρηση μετάδοσης και στην πιθανότητα συγκρούσεων των πακέτων. Ο δέκτης θα ελέγξει το λαμβανόμενο πακέτο και θα στείλει ένα μήνυμα επιβεβαίωσης ACK. Αν ο αποστολέας δεν δεχτεί το μήνυμα ACK θα υποθέσει ότι έγινε μία σύγκρουση πακέτων και θα γίνει επανεκπομπή του από το MAC επίπεδο.

Επειδή σε μία κυψέλη μπορεί ένας σταθμός να μην μπορεί να ακούσει τους υπόλοιπους αλλά μόνο το AP, ορίζεται ένας μηχανισμός ανίχνευσης ιδεατής φέρουσας (virtual carrier sense). Σύμφωνα με αυτόν, ο σταθμός που επιθυμεί να εκπέμψει στέλνει ένα μήνυμα RTS (Request To Send) στο AP και αυτό του απαντά με ένα μήνυμα CTS (Clear To Send) αν ο ραδιοδίαυλος είναι κενός. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε μία κράτηση του διαύλου για τον συγκεκριμένο σταθμό.



### **3.6.2.PCF (Point Coordination Function)**

Προαιρετικός τρόπος πρόσβασης, χρησιμοποιείται για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπου απαιτείται προνομιακή μεταχείριση έναντι της απλής μετάδοσης δεδομένων. Σε αυτό το AP ερωτά κάθε ένα σταθμό ξεχωριστά εάν έχει δεδομένα προς μετάδοση. Με αυτόν τον τρόπο ένας σταθμός μπορεί να αποκτήσει μεγαλύτερης προτεραιότητας πρόσβαση. Το AP μοιράζει τον χρόνο του ανάμεσα στους δύο τρόπους πρόσβασης. [4][15]

### **3.7. Ποιότητα Υπηρεσίας στο IEEE 802.11**

Η επιτροπή IEEE παρουσίασε το πρωτόκολλο 802.11 το οποίο χρησιμοποιεί εναλλακτικούς μηχανισμούς για την ικανοποίηση εφαρμογών πραγματικού χρόνου. Το PCF του 802.11 δεν προσέφερε ικανοποιητικό επίπεδο QoS λόγω του ότι παρουσίασε πολλά άλυτα προβλήματα, όπως οι απροσδόκητες καθυστερήσεις των πλαισίων beacon, άγνωστοι (μεταβλητοί) χρόνοι μετάδοσης.

#### **3.7.1.Μηχανισμοί Πρόσβασης: EDCF (Enhanced Distribution Function)**

Το EDCF (Enhanced Distribution Function) είναι ένας από τους μηχανισμούς που χρησιμοποιεί το 802.11 για να προσφέρει αξιόπιστο Quality of Service (QoS). Το EDCF είναι η προτεινόμενη επέκταση στο DCF είναι το EDCF (Enhanced Distribution Function) το οποίο εισάγει την έννοια των "κατηγοριών κυκλοφορίας". Κάθε σταθμός που ανήκει στο BSS διαθέτει 8 κατηγορίες κυκλοφορίας δηλαδή επίπεδα προτεραιότητας. Χρησιμοποιώντας το EDCF οι σταθμοί προσπαθούν να μεταδώσουν δεδομένα μόλις ανιχνεύσουν ότι το μέσο είναι ανενεργό μετά από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα που ορίζεται από το αντίστοιχο επίπεδο προτεραιότητας και ονομάζεται AIFS (Arbitrary Inter Frame Space). Μία υπηρεσία υψηλότερης προτεραιότητας θα έχει μικρότερο AIFS από μία κατηγορία μικρότερης προτεραιότητας. Επομένως οι σταθμοί οι

οποίοι μεταδίδουν δεδομένα υπηρεσίας που έχουν προτεραιότητα μικρότερη από κάποια άλλη πρέπει να περιμένουν περισσότερο χρόνο από ότι αυτή για αποκτήσουν τον έλεγχο του μέσου.

Για να αποφευχθούν συγκρούσεις μεταξύ σταθμών που εξυπηρετούν ίδιες υπηρεσίες (και άρα ίδιες προτεραιότητες), ο κάθε σταθμός περιμένει για ένα τυχαίο αριθμό χρονοσχημάτων πριν μεταδώσει δεδομένα (που ονομάζεται παράθυρο ανταγωνισμού - contention window). Αν κάποιος σταθμός B μεταδώσει πριν ολοκληρωθεί η αντίστροφη μέτρηση του A, τότε ο A θα πρέπει να περιμένει για να μηδενιστεί το παράθυρο ανταγωνισμού για να μεταδώσει στην επόμενη διαθέσιμη χρονική σχισμή.

### **3.7.2.HCF (Hybrid Coordination Function)**

Η υβριδική λειτουργία συντονισμού (Hybrid Coordination Function) αντικαθιστά τα παραδοσιακά DCF και PCF σε σταθμούς οι οποίοι υλοποιούν το πρωτόκολλο 802.11e. Οι σταθμοί αυτοί ονομάζονται QSTA (QoS STations) και ο μηχανισμός είναι υποχρεωτικός σε αυτούς (και όχι προαιρετικός όπως ο PCF στο κλασικό 802.11). Μέσα στο HCF υπάρχουν δύο διαφορετικοί μηχανισμοί πρόσβασης, η Ενισχυμένη Διανεμημένη Πρόσβαση Καναλιών (Enhanced Distribution Channel Access - EDCA) και η Ελεγχόμενη Πρόσβαση Καναλιών (HCF Controlled Channel Access - HCCA). Σε αντίθεση με το PCF το οποίο χρησιμοποιούσε δύο διαφορετικές ακολουθίες ανταλλαγής πλαισίων την περίοδο με και χωρίς ανταγωνισμό, το HCF ορίζει ένα ενιαίο τρόπο ανταλλαγής πλαισίων. Το HCF δίνει στους σταθμούς (QSTAs) του δικτύου το δικαίωμα μετάδοσης μέσω των πλαισίων TXOP (Transmit Opportunities - "ευκαιρίες μετάδοσης"). Οι σταθμοί μπορούν να λάβουν τέτοια πακέτα από τους 2 μηχανισμούς πρόσβασης (EDCA - HCCA). Ένα TXOP δίνει την δυνατότητα σε ένα σταθμό να αποκτήσει τον έλεγχο του μέσου για καθορισμένο χρονικό σημείο στο μέλλον και για μία μέγιστη διάρκεια. [16][17]

### **3.8. Ασφάλεια στο IEEE 802.11**

Τα πρωτόκολλα 802.11 περιλαμβάνουν έναν προαιρετικό μηχανισμό πιστοποίησης κόμβων (μόνο για δομημένα δίκτυα) και κρυπτογράφησης δεδομένων, ονόματι WEP (Wired Equivalent Privacy), ο οποίος λειτουργεί ως εξής: μετά τη συσχέτιση ενός σταθμού σε ένα BSS ο κόμβος στέλνει στο AP ένα αίτημα πιστοποίησης ταυτότητας. Το AP απαντά στέλνοντας του ένα τυχαίο κείμενο το οποίο ο κόμβος κρυπτογραφεί, χρησιμοποιώντας ένα κλειδί που έχει ρυθμιστεί από τους χρήστες του τοπικού δικτύου και είναι κοινό σε όλους τους κόμβους, και στέλνει πίσω στο σημείο πρόσβασης. Το AP επιβεβαιώνει ότι το κείμενο που έλαβε είναι η ορθά κρυπτογραφημένη, σύμφωνα με το σωστό κλειδί, εκδοχή αυτού που έστειλε και απαντά με μια επιβεβαίωση πιστοποίησης η οποία αναθέτει μία ταυτότητα στον κόμβο (η οποία γίνεται γνωστή και στους άλλους κόμβους). Από εκείνη τη στιγμή κι έπειτα ο σταθμός μπορεί να ανταλλάσει δεδομένα στο WLAN με την ταυτότητα αυτή. Όταν ο κόμβος επιθυμεί να αποχωρήσει από το δίκτυο στέλνει ένα αίτημα αποπιστοποίησης πριν την αποσυσχέτιση. Για την αποφυγή υποκλοπών τα δεδομένα που διακινούνται στο δίκτυο κρυπτογραφούνται με ένα κρυφό κλειδί 40-bit (το ίδιο με αυτό της πιστοποίησης). Στον παραλήπτη ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία. [18][19]

### **3.9. Υποπρότυπα του IEEE 802.11**

- IEEE 802.11a

Χρησιμοποιεί τη ζώνη των 5 GHz και OFDM. Ταχύτητα μικρότερη των 54 Wbps.

- IEEE 802.11b (Χρησιμοποιείται στην Ελλάδα)

Χρησιμοποιεί τη ζώνη των 2.4 GHz και DSSS. Ταχύτητα μικρότερη των 11 Wbps.

- IEEE 802.11e

Παρέχει εγγυήσεις για ποιότητα υπηρεσίας.

- IEEE 802.11f

Κινητικότητα των σταθμών μέσα σε ένα IP δίκτυο (Intra-network Handover).

- IEEE 802.11g

Επεκτείνει το 802.11b ώστε να προσεγγίζει ταχύτητες υψηλότερες από 11 Mbps.

- IEEE 802.11i

Πρότυπο το οποίο μελετά θέματα ασφάλειας στα WLANs.

- IEEE 802.11h

Η ομάδα αυτή θα προσπαθήσει να εισάγει στο 802.11a την δυνατότητα για καλύτερο έλεγχο συγκρούσεων, καθώς και την λειτουργία Transmit Power Control (TPC) - Δυναμική Λειτουργία Καναλιών και Dynamic Frequency Selection (DFS) - Δυναμική Επιλογή Καναλιών. Μια συσκευή θα επιλέγει αυτόματα την ελάχιστη αναγκαία ισχύ εκπομπής πριν ξεκινήσει οποιαδήποτε ανταλλαγή δεδομένων. [10]

#### **4. OFFLOADING – HANDOVER ON OFDM BASED SYSTEMS**

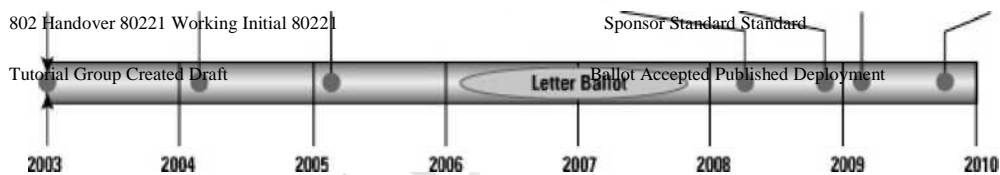
Σήμερα υπάρχουν στον κόσμο διάφορα ασύρματα συστήματα. Χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες εκπομπής και έχουν διαφορετικά πρωτόκολλα και αρχιτεκτονικές. Είναι σχεδιασμένα για την ικανοποίηση των αναγκών συγκεκριμένων υπηρεσιών και ποικίλουν πολύ όσον αφορά το bandwidth, την περιοχή κάλυψης, το κόστος καθώς και την ποιότητα της υπηρεσίας που προσφέρουν. Παρόλα αυτά, κανένα από αυτά δεν ικανοποιεί ταυτόχρονα την χαμηλή καθυστέρηση (low latency), το υψηλό bandwidth, και τις διάφορες ανάγκες των χρηστών σχετικά με την περιοχή κάλυψης με ταυτόχρονο χαμηλό κόστος. Αφού τα διαφορετικά συστήματα αυτά ικανοποιεί το καθένα τις ανάγκες για τις οποίες είναι σχεδιασμένο, είναι συμπληρωματικά μεταξύ τους, μπορούν δηλαδή να λειτουργήσουν σε συνεργασία ώστε να προσφέρουν στους χρήστες πάντα το καλύτερο δυνατό. Για να γίνει όμως δυνατή αυτή η συνεργασία πρέπει

να επιτευχθεί η ικανοποιητική διασύνδεση των υπαρχόντων ασύρματων συστημάτων, ώστε οι χρήστες να λαμβάνουν τις υπηρεσίες τους μέσω του καταλληλότερου ασύρματου δικτύου σε κάθε στιγμή.

Οι στόχοι της διαδικτύωσης διαφορετικών ασύρματων συστημάτων είναι η εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων της κάθε τεχνολογίας, με ταυτόχρονη εξάλειψη των πιθανών μειονεκτημάτων της. Επίσης πρέπει να διασφαλίζει ότι ο χρήστης σε κάθε χρονική στιγμή θα χρησιμοποιεί την καλύτερη δυνατή τεχνολογία, ενώ επίσης πρέπει να διαθέτει μηχανισμούς που θα παρέχουν τη μέγιστη ποιότητα ασφάλειας και ιδιωτικότητας. Η ύπαρξη πρωτοκόλλων και μεθόδων για την σωστή φορητότητα μεταξύ των συστημάτων είναι αναγκαία.

#### 4.1. IEEE 802.21 – OFDM BASED Πρότυπο

Η λύση που εξετάστηκε για την επιλογή πρόσβασης για τη διαπομπή σε ετερογενή δίκτυα είναι μέσα από τις προτάσεις της IEEE. Η IEEE έχει ορίσει μια ομάδα εργασίας (working group), η οποία ασχολείται με τον ορισμό προτύπων (standards) για την επίτευξη διαπομπής και συμβατότητας μεταξύ δικτύων με διαφορετικό τύπο τεχνολογίας που μπορεί να ανήκει τόσο στο σύνολο των 802 προτύπων της IEEE όσο και σε άλλα πρότυπα (π.χ. κυψελωτά). Η κατεύθυνση στην οποία κινείται η ομάδα αυτή αναφέρεται ως Διαπομπή Ανεξάρτητη του Μέσου MIH (Media Independent Handover), ενώ το σύνολο των σχετικών προτύπων είναι γνωστά ως IEEE 802.21. Το IEEE 802.21 ορίζει ένα πλαίσιο που βελτιώνει κάθετη διαπομπή παρέχοντας πληροφορίες για τις τεχνολογίες του στρώματος σύνδεσης προς τα υψηλότερα στρώματα.



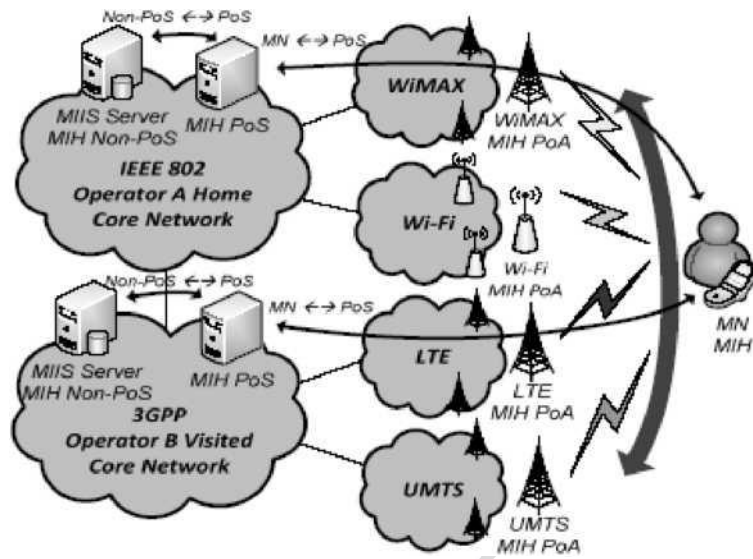
Σχήμα 4.1 Υπόδειξη ως προς το χρόνο για τη προσπάθεια προτυποποίησης του IEEE 802.21

Το OFDM έχει ως σκοπό να εντοπίσει (Initiate), ετοιμάσει (Prepare) και εκτελέσει (Execute) το handover. Η φάση Initiation Handover εκτιμά τις παρούσες συνθήκες του δικτύου, με σκοπό να αποφασίσει αν απαιτείται διαπομπή. Αν οι συνθήκες είναι ικανοποιητικές δεν υπάρχει λόγος για την ανεύρεση νέων διαθέσιμων δικτύων. Στην περίπτωση που το τερματικό βρίσκεται σε περιοχή επικαλυπτόμενων δικτύων διευκολύνει την ανακάλυψη δικτύου και τις διαδικασίες επιλογής, ανταλλάσσοντας πληροφορίες δικτύων που βοηθούν τις κινητές συσκευές να καθορίζουν ποιο δίκτυο είναι γειτονικό τους.

Αυτές οι πληροφορίες δικτύου περιλαμβάνουν πληροφορίες για τον τύπο σύνδεσης, αναγνώριση σύνδεσης, διαθεσιμότητα σύνδεσης και ποιότητα σύνδεσης. Αυτή η διαδικασία ανακάλυψης και επιλογής δικτύου επιτρέπει σε ένα κινητό να επικοινωνεί με τα πιο κατάλληλα δίκτυα. Ουσιαστικά πρόκειται για μια διαδικασία αξιολόγησης υπαρχόντων δικτύων σύμφωνα με τα κριτήρια που ορίζουν οι προτιμήσεις του χρήστη, στα πλαίσια της γενικότερης προσπάθειας για βέλτιστη σύνδεση (Always Best Connected). Στη φάση Handover Preparation έχουμε την εγκαθίδρυση της νέας σύνδεσης όπου το τερματικό ζητάει μια σύνδεση IP εφόσον υπάρχει αλλαγή πρόσβασης AP. Τέλος, στη φάση Handover Execution αφού έχει γίνει η εγκαθίδρυση της σύνδεσης αρχίζει η μεταφορά των πακέτων με το τερματικό να λαμβάνει δεδομένα από τη νέα σύνδεση.

Η πιο απλή μέθοδος διαπομπής είναι η σκληρή διαπομπή (hard handover). Ονομάζεται έτσι λόγω του γεγονότος πως το τερματικό για να αποκτήσει ένα νέο σημείο πρόσβασης θα πρέπει να εγκαταλείψει το AP που χρησιμοποιούσε μέχρι την στιγμή αυτή, έτσι ώστε να διατηρεί μόνο μία σύνδεση ανά πάσα στιγμή (break before make). Δεδομένης της διακοπής της σύνδεσης θα υπάρχει και απώλεια πακέτων, η οποία εξαρτάται από το χρόνο που απαιτείται μέχρι να εγκατασταθεί σύνδεση με το νέο AP, το εύρος ζώνης και τις διάφορες καθυστερήσεις.

Ένα ετερογενές περιβάλλον παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Ένα δίκτυο με τεχνολογίες όπως WiFi, OFDM Based Cellular περιλαμβάνοντας το Point of Attachment (PoA) και Point of Service (PoS). Το PoA είναι το σημείο σύνδεσης της τεχνολογίας πρόσβασης, ενώ το PoS είναι η MHN οντότητα που επικοινωνεί με το τερματικό.



Σχήμα 4.2 MIH σε ετερογενή δίκτυο πρόσβασης

#### 4.2. Media Independent Handover Function (MIHF)

Η καρδιά του 802.21 είναι το Media Independent Handover Function (MIHF) το οποίο υποκρύπτει τις ιδιομορφίες των διαφορετικών τεχνολογιών στρωμάτων σύνδεσης από τις υψηλότερες οντότητες στρώματος κινητικότητας. Οι οντότητες υψηλότερου στρώματος, γνωστές ως MIH Users (MIUs) μπορούν να λαμβάνουν πλεονεκτήματα των MIH πλαισίων, περιλαμβάνοντας πρωτόκολλα διαχείρισης κινητικότητας, όπως για παράδειγμα Mobile IPv4, Mobile IPv6, Session Initiation Protocol (SIP) καθώς και άλλους αλγορίθμους απόφασης κινητικότητας.

Το εκάστοτε πρωτόκολλο κινητικότητας έχει ως κύριο στόχο να διατηρεί το ρυθμό της ροής πληροφοριών κατά τη διάρκεια διαπομπής, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται συνεχή και πανταχού παρούσα πρόσβαση στους χρήστες, ανάλογα με το είδος της κίνησης, η μπορούμε να χειριστούμε την κινητικότητα σε ένα από τα επίπεδα της ζεύξης δεδομένων, του δικτύου ή του επιπέδου



εφαρμογής. Δεδομένου ότι η κινητικότητα στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων καθορίζεται από την τεχνολογία πρόσβασης και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση των δυσκολιών που συνεπάγεται το ετερογενές περιβάλλον θα συζητήσουμε την κινητικότητα μόνο στα δυο ανώτερα επίπεδα. Στο επίπεδο δικτύου έχουμε την έκδοση 4 και 6 του πρωτόκολλου MobileIP. Το πρωτόκολλο κινητικότητας είναι αυτό που αποδίδει IP διεύθυνση σε έναν κινητό κόμβο, όταν αλλάζει το σημείο σύνδεσης του στο δίκτυο. Το Mobile IPv4 (MIPv4) που ανέπτυξε η IETF (Internet Engineering Task Force) επιτρέπει στους κινητούς κόμβους να μετακινούνται μεταξύ υποδικτύων. Θεωρείται κατάλληλο για διαχείριση κινητικότητας μεταξύ ετερογενών δικτύων. Το πρωτόκολλο Mobile IPv6 αποτελεί την εξέλιξη του Mobile IPv4 στο πλαίσιο της γενικότερης μετάβασης από το IPv4 στο IPv6, με σκοπό την δημιουργία περισσότερων διαθέσιμων IP διευθύνσεων. Έτσι το νέο δίκτυο IPv6 εμφανίζει ως πλεονεκτήματα τον τετραπλάσιο χώρο διευθύνσεων (128 bits αντί για 32). Στο επίπεδο εφαρμογής έχουμε τη χρήση του πρωτοκόλλου SIP (Session Initiation Protocol).

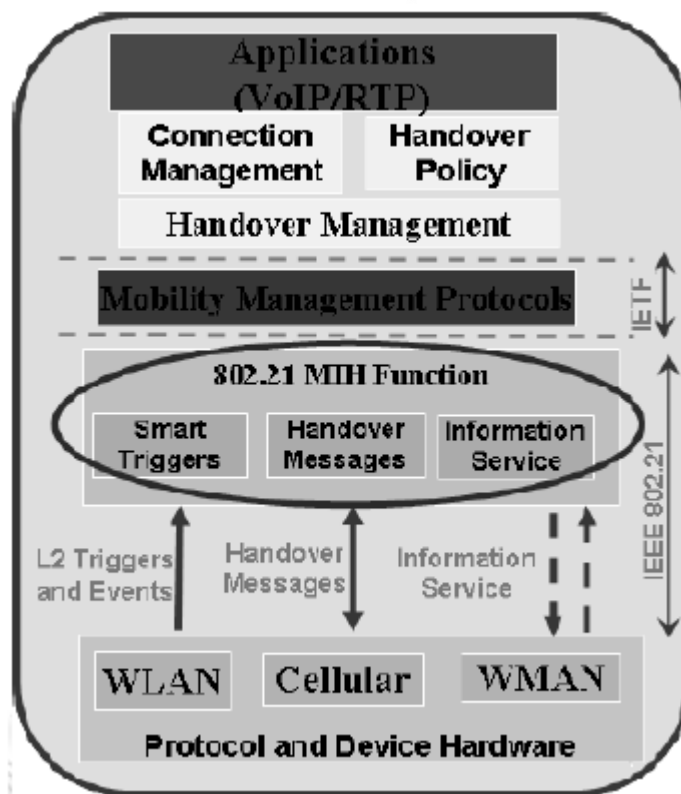
Η MIHF πλατφόρμα παρέχει τρεις διαφορετικές υπηρεσίες με σκοπό να εντοπίσει, ετοιμάσει και εκτελέσει το handover. Αυτές είναι:

- Media Independent Event Services (MIES): Η MIES υπηρεσία παρέχει αναφορές γεγονότων, όπως δυναμικές αλλαγές σε συνθήκες σύνδεση, κατάσταση σύνδεσης και ποιότητα σύνδεσης, που πραγματοποιούνται στον πελάτη (τοπικά) και στο δίκτυο (μακρινά). Μερικά από τα πιο συνηθισμένα γεγονότα έχουν να κάνουν με την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση μιας ζεύξης (Link Up, Link Down), η σταδιακή ενίσχυση ή απώλεια σήματος μιας ζεύξης (Link Going Up, Link Going Down)
- Media Independent Command Services (MICS): Χρησιμοποιείται από τα

το υψηλότερο στρώματα ώστε να ελέγχει τα χαμηλότερα στρώματα και για να αποφασίσουν για την κατάσταση σύνδεσης και τον έλεγχο

πρόσβασης σε διαφορετικά δίκτυα. Καθιστούν ικανούς τους MIH χρήστες να διαχειρίζονται και να ελέγχουν τη σύνδεση διαπομπής.

Media Independent Information Services (MIIS): Παρέχει πληροφορίες για ετερογενή δίκτυα σε μια περιοχή. Κρατάει λίστα με τα γειτονικά δίκτυα ώστε να παρέχει ομαλή διαπομπή για έναν ασύρματο κόμβο. Ο σκοπός είναι να πετύχει μια σφαιρική άποψη από όλα τα ετερογενή δίκτυα στην περιοχή με σκοπό να βελτιστοποιήσει το handover καθώς γίνεται περιπλάνηση μεταξύ των ετερογενών δικτύων.



Σχήμα 4.3 Πρότυπο IEEE802.21

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, παρατηρεί κανείς ότι το IEEE 802.21 προσπαθεί να προτυποποιήσει την κάθετη διαπομπή προκειμένου να καταστεί αυτή εφικτή ανεξαρτήτως τεχνολογιών, υπηρεσιών και πρωτοκόλλων κινητικότητας.

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

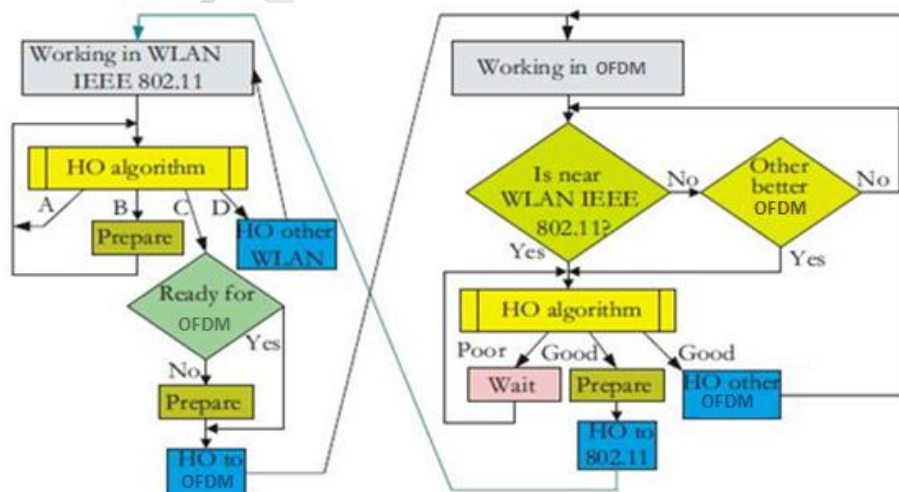
## 5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 5.1. Το περιβάλλον του Network Simulator 2

Για την προσομοίωση και την εξαγωγή στατιστικών στοιχείων της προτεινόμενης μεθόδου χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο προσομοιώσεων δικτύων ns-2 (network simulator). Η ανάπτυξη του κώδικα έγινε σε γλώσσα προγραμματισμού C++ και βασίστηκε σε τροποποίηση της έκδοσης 2.30 καθώς και την τροποποίηση των πρόσθετων αρχείων που είχαν δημιουργηθεί. Τα αρχεία για τη δήλωση της τοπολογίας, τους χρόνους των μετρήσεων και της προσομοίωσης, αλλά και άλλων παραμέτρων, έγιναν σε γλώσσα Otcl (Otcl scripts). Το περιβάλλον εγκατάστασης ήταν η διανομή 10.04 Ubuntu. Λόγω της παλαιότητας της έκδοσης 2.30 του NS2 έπρεπε να γίνουν ορισμένες αλλαγές στη βιβλιοθήκη του προγράμματος και να προσθέσουμε το patch για το OFDM.

### 5.2. Προσομοίωση

Χρησιμοποιώντας το εργαλείο προσομοίωσης NS2 τρέξαμε προσομοιώσεις για να αξιολογήσουμε την απόδοση του συστήματος (data offloading) με τη χρήση πολλαπλών interfaces. Συγκρίναμε την απόδοση του αλγόριθμου χωρίς παρεμβάσεις στη διαδικασία του Hand Over και με παρεμβάσεις. Η διαδικασία που γίνεται η μετάβαση από το WLAN στο OFDM based cellular δίνεται από την παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 5.1 : Διαδικασία HO μεταξύ WLAN και OFDM

Παρακάτω παραθέτουμε σε ψευδοκώδικα τον αλγόριθμο για το HO:

w\_Distance : from 0 to 1

w\_BandWidth : from 0 to 1

w\_RSSI : from 0 to 1

m = + w\_Distance(Distance)

+ w\_Band Width(BW\_user)

+ w\_RSSI(RSII)

if m\_NA > m\_VA

    Then HO

else stay at the BS

Όπου:

BW : το Bandwidth του κόμβου (MN) – αισθητήρα

Distance: Απόσταση από το Base Station

RSSI: strength indicator from the received signal

Ανάλογα με τις τιμές που έχει το BW , RSSI και Distance θέτουμε διάφορες τιμές. Για παράδειγμα αν το RSSI είναι -72dBm τότε το m\_RSSI παίρνει την τιμή 0,7. Παρακάτω παραθέτουμε τα πινακάκια με τις τιμές που χρησιμοποιήσαμε.

Under 72dBm	0.7
72dBm – 79dBm	0.6
79dBm – 82dBm	0.5
82dBm – 85dBm	0.4
85dBm – 90dBm	0.3
90dBm – 95dBm	0.2
95+dBm	0.1

Πίνακας 5.1: Παράμετροι RSSI

Under 100m	0.8
100m – 200m	0.7
200m – 300m	0.6
300m – 400m	0.5

400m – 500m	0.4
500m – 700m	0.3
700m – 1000m	0.2
1000m – 2000m	0.1

Πίνακας 5.2: Παράμετροι Distance

Under 1Mbps	0.1
1Mbps – 1.5 Mbps	0.2
1.5Mbps – 2Mbps	0.3
2Mbps – 2.5Mbps	0.4
2.5Mbps – 3Mbps	0.5
3+Mbps	0.6

Πίνακας 5.2: Παράμετροι BandWidth

Κατά τη διάρκεια ενός προκαθορισμένου χρόνου κατακράτησης (Dwell\_timer) ο νέος Agent  $m\_NA$  μείων το περιθώριο υστέρησης πρέπει να είναι μεγαλύτερος από τον προηγούμενο Agent  $m\_VA$ . Επίσης ο  $m\_VA$  πρέπει να είναι μικρότερος από το προκαθορισμένο threshold ( $Um$ ) δηλαδή :  $m\_NA - Hm > m\_VA < Um$ . Για την αποφυγή επιλογής χρήστη με πολύ χαμηλό power καθορίζουμε ένα RSSI\_Threshold όπου ο Agent ( $m\_NA$  ή  $m\_VA$ ) πρέπει να πάρει την τιμή μηδέν όταν η ισχύς του είναι κάτω από αυτό το κατώφλι: [33][34][35]

```
if RSSI ≤ RSSI_Threshold
    then m=0
```

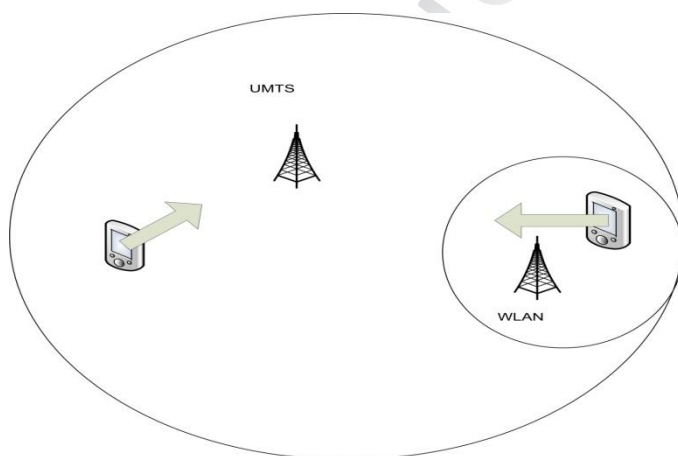
Αρχικά παραθέτονται τα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας τον απλό αλγόριθμο για HO, ο οποίος βασίζεται μόνο στις τιμές του RSSI για την εκτέλεση της διαπομπής. Έπειτα παραθέτουμε τα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας τον "έξυπνο" αλγόριθμο για το HO. Οι μετρήσεις έγιναν για συγκεκριμένο αριθμό κινούμενων κόμβων ( 5 MN) και για το ίδιο χρονικό διάστημα (10 λεπτά).

Πριν αρχίσουμε την ανάλυση των σεναρίων μας, αξίζει να αναφέρουμε ότι για την διαπομπή στα ετερογενή δίκτυα χρησιμοποιήθηκε το Media Independent Handover (MIH) και το Neighbour Discovery (ND). Ο Neighbour Discovery (ND) είναι ένας μηχανισμός που χρησιμοποιείται για εντοπισμό γειτονικών δικτύων από τους ασύρματους κόμβους. Τόσο το MIH όσο και το ND αποτελούν

προσθήκες του National Institute of Standards and Technology (NIST) τα οποία επιδιορθώθηκαν ώστε να δουλεύουν στον ns-2.30. [33]

### 5.2.1. Σενάριο: Διαπομπή κινητού τερματικού μεταξύ ετερογενών δικτύων OFDM και WiFi

Το σενάριο αυτό αποτελείται από ένα WiFi δίκτυο το οποίο είναι ολοκληρωτικά επικαλυπτόμενο από ένα OFDM δίκτυο. Επιπροσθέτως, υπάρχει και ένας ασύρματος κόμβος, ο οποίος συνδέεται με 2 interfaces και δεν επικοινωνεί με άλλους κόμβους του δικτύου, παρά μόνο έμμεσα μέσω των δύο interfaces. Για τη λύση του προβλήματος της δρομολόγησης εισάγουμε τους Base Stations, ένα για κάθε δίκτυο. Οι σταθμοί βάσης είναι υπεύθυνοι για την αποστολή πακέτων προς την ασύρματη περιοχή. Αρχικά ο ασύρματος κόμβος βρίσκεται μέσα στο OFDM δίκτυο και είναι συνδεδεμένος με τον σταθμό βάσης αυτού του δικτύου. Καθώς κινείται εντοπίζει το WiFi δίκτυο αρχίζει η διαδικασία της μεταπομπής. Με τη βοήθεια των δυο παραπάνω μηχανισμών ο ασύρματος κόμβος ανταλλάσει πληροφορίες δικτύου με σκοπό να εντοπίσει το γειτονικό δίκτυο. Στη συνέχεια έχουμε την εγκαθίδρυση νέας σύνδεσης και τέλος αρχίζει η μεταφορά δεδομένων με το τερματικό να λαμβάνει δεδομένα από τη νέα σύνδεση.



Σχήμα 5.1 Παρουσίαση μετακίνησης τερματικών μεταξύ ετερογενών δικτύων

Όπως είναι γνωστό, απαραίτητο στοιχείο για ένα σενάριο προσομοίωσης στον ns είναι η σωστά ορισμένοι παράμετροι για ιεραρχική δρομολόγηση σε επίπεδο δικτύου. Η ιεραρχική δρομολόγηση χρησιμοποιείται για τη μείωση της απαίτησης για μνήμη μίας μεγάλης τοπολογίας. Η τοπολογία διασπάται σε επίπεδα ιεραρχίας, με αποτέλεσμα τη μείωση του μεγέθους του πίνακα δρομολόγησης. Τα βέλτιστα αποτελέσματα βρέθηκαν ότι εμφανίζονται για 3 επίπεδα ιεραρχίας. Τα

επίπεδα ιεραρχίας της τοπολογίας του σεναρίου μας αποτελούνται από 5 domains, με ένα cluster στο κάθε domain και αριθμός κόμβων 3 (OFDM: MN+RNC+BS), 1 (router 0), 1 (router 1), 2 (802.11: MN+BS), 1 (MULTIFACE node) για κάθε cluster αντίστοιχα. Για να είναι δυνατή η χρήση της ιεραρχικής δρομολόγησης στην προσομοίωση μας, ορίστηκε η ιεραρχία της τοπολογίας και δόθηκε σε κάθε κόμβο μία ιεραρχική διεύθυνση. Συγκεκριμένα, δημιουργούνται δυο δρομολογητές router0 και router1 με διευθύνσεις (1.0.0) και (2.0.0) αντίστοιχα για να εξυπηρετήσουν τη δρομολόγηση. Επιπλέον, έχουμε δυο σταθμούς βάσης (bstation802\_11 και bstationOFDM ) για το δίκτυο 802.11 και OFDM με διευθύνσεις (3.0.0) και (0.0.1) αντίστοιχα. Τα interfaces (iface1, iface2) με διευθύνσεις (3.0.1) και (0.0.2). Τον RNC (όπου αποτελεί τον ελεγκτή ασύρματης πρόσβασης στο utran) με διεύθυνση (0.0.0) και τέλος τον MutiFaceNode με διεύθυνση (4.0.0) στον οποίο προσαρτώνται τα δύο interfaces.

Είναι γνωστό ότι σε προσομοιώσεις του ns - 2 ο κάθε κόμβος έχει κάποιες συντεταγμένες. Στο σενάριο μας οι σταθμοί βάσης των ετερογενών δικτύων OFDM και WiFi είναι τοποθετημένες στις διαστάσεις (50, 100) και (90, 100) αντίστοιχα. Ο ασύρματος κόμβος βρίσκεται αρχικά στη θέση (40, 100) και από το δεύτερο λεπτό της προσομοίωσης αρχίζει την κίνηση του μεταξύ των δύο σταθμών βάσεις με σταθερή ταχύτητα 3m/sec και καταλήγει στην θέση με συντεταγμένες (110,100).

Επιπλέον, υπάρχουν ασύρματα μοντέλα διάδοσης τα οποία χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της λαμβανόμενης ισχύς του σήματος του κάθε πακέτου. Στο φυσικό στρώμα του κάθε ασύρματου κόμβου, υπάρχει ένα λαμβανόμενο κατώφλι (threshold). Όταν ένα πακέτο λαμβάνεται, αν η ισχύς του σήματος είναι χαμηλότερη από το κατώφλι αυτό, τότε το πακέτο μαρκάρεται ως λανθασμένο και απορρίπτεται από το MAC στρώμα. Το μοντέλο ασύρματης διάδοσης που χρησιμοποιούμε στην προσομοίωση μας είναι το two-ray ground reflection model (τέλειας επίπεδης ανάκλασης) και καλύπτουμε μια εμβέλεια της τάξεως των 20 μέτρων μεταξύ πομπού και δέκτη στο ασύρματο δίκτυο WiFi. Το ίδιο μοντέλο χρησιμοποιούμε και για το δίκτυο του OFDM και καλύπτουμε εμβέλεια της τάξεως των 750 περίπου μέτρων.

Η προσομοίωση λαμβάνει χώρα σε διάστημα 10 min. Η περιοχή κίνησης του ασύρματου κόμβου είναι επίπεδη διαστάσεων 500X500m για το συνδυασμό των ετερογενών δικτύων OFDM - WiFi.

Αφού δημιουργήσαμε την τοπολογία, αξίζει να αναφέρουμε ότι ως παρεχόμενη υπηρεσία στο τερματικό, χρησιμοποιείται μια κίνηση UDP. Στη διαδικασία αυτή δημιουργείτε και ένας CBR δημιουργός κίνησης (traffic generator), ο οποίος στέλνει πακέτο μεγέθους 1000 bytes (χωρίς τις επιπλέον επικεφαλίδες των



κατωτέρων στρωμάτων) με το διάστημα (interval) μεταξύ των πακέτων να ανέρχεται στα 0.2 sec. Η παραγωγή κίνησης από τον traffic generator ξεκινά από τα πρώτα 20 sec της προσομοίωσης και τελειώνει τη χρονική στιγμή που τελειώσει και η προσομοίωση.

### 5.2.2. Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Μετά την εκτέλεση της προσομοίωσης έχουμε τη συγκέντρωση και την ανάλυση των αποτελεσμάτων για το OFDM και το WLAN. Οι μετρήσεις που πήραμε είναι οι εξής:

- Throughput: το μέσο πλήθος των πακέτων που μπορεί να δεχθεί και να μεταδώσει το δίκτυο στη μονάδα του χρόνου ανάλογα με την ταχύτητα του κόμβου.
- Packet Loss: ο αριθμός των πακέτων που χάνονται κατά τη μετάδοση ανάλογα με την ταχύτητα του κόμβου.

Παράμετροι	Τιμές
Net - Interface	WirelessPHY/OFDM
MAC πρωτόκολλο επιπέδου	MAC/802_11
Πρωτόκολλο δρομολόγησης	NOAH
Τύπος διασύνδεσης στρώμα	LL
Antenna μοντέλο	Antenna/OmniAntenna
Interface Queue type	Queue/DropTail/ PriQueue
Μέγιστο πακέτο σε ifq	50
Κανάλι τύπου	WirelessChannel
Propagation μοντέλο	TwoRayGround
Συνολικός Χρόνος Προσομοίωσης	10 min
Μέγεθος Τ οπولوجίας/Περιβάλλοντος	2000X2000
Traffic Patern	UDP πράκτορας με την κίνηση CBR

Μέγεθος πακέτου	1000 bytes
-----------------	------------

Πίνακας 5.4: Παράμετροι WLAN

Παράμετροι	Τιμές
Propagation μοντέλο	TwoRayGround
Συνολικός Χρόνος Προσομοίωσης	10 min
Μέγεθος Τ οπولوجίας/Περιβάλλοντος	200X200
Traffic Patern	UDP πράκτορας με την κίνηση CBR
Μέγεθος πακέτου	1000 bytes

Πίνακας 5.5: Παράμετροι OFDM

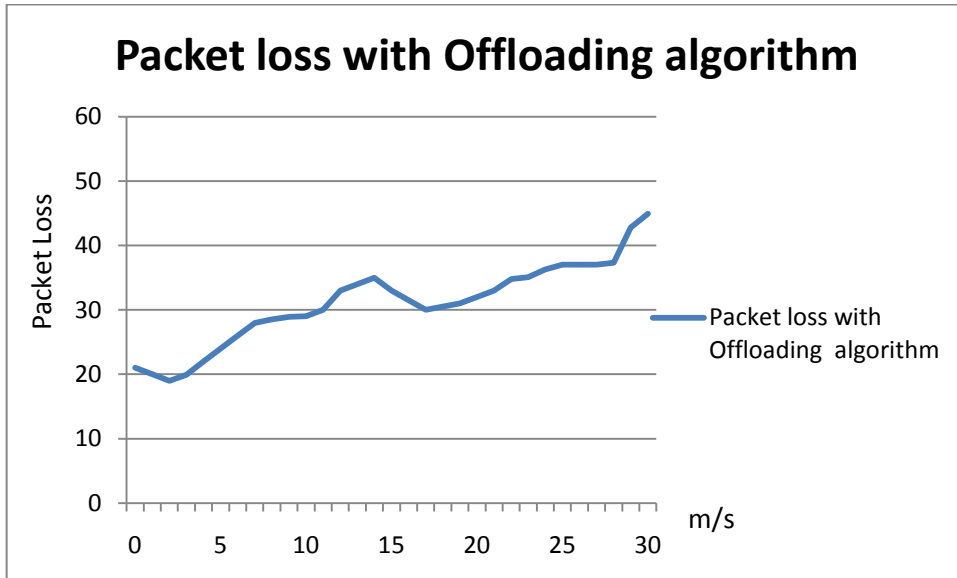
Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, πρέπει να γίνει εκτίμηση βασιζόμενοι στο θεωρητικό υπόβαθρο που διαθέτουμε. Αρχικά πρέπει να αναφέρουμε ότι το OFDM προσπαθεί να προτυποποιήσει την κάθετη διαπομπή προκειμένου να καταστεί εφικτή ανεξαρτήτων τεχνολογιών υπηρεσιών και πρωτοκόλλων κινητικότητας. Η κάθετη όμως διαπομπή ονομάζεται έτσι λόγω του γεγονότος πως το τερματικό για να αποκτήσει ένα νέο σημείο πρόσβασης θα πρέπει να εγκαταλείψει το AP που χρησιμοποιούσε μέχρι την στιγμή αυτή, έτσι ώστε να διατηρεί μόνο μία σύνδεση ανά πάσα στιγμή. Δεδομένης της διακοπής της σύνδεσης θα υπάρχει και απώλεια πακέτων, η οποία εξαρτάται από το χρόνο που απαιτείται μέχρι να εγκατασταθεί σύνδεση με το νέο AP, το εύρος ζώνης και τις διάφορες καθυστερήσεις. Άρα αναμενόμενο αποτέλεσμα από τις προσομοιώσεις μας θα είναι να υπάρχει απώλεια σύνδεσης και κατ' επέκταση και απώλεια

πακέτων τη στιγμή που εγκαταλείπει το σταθμό βάσης του ενός δικτύου και μέχρι να γίνει επανασύνδεση με το επόμενο.

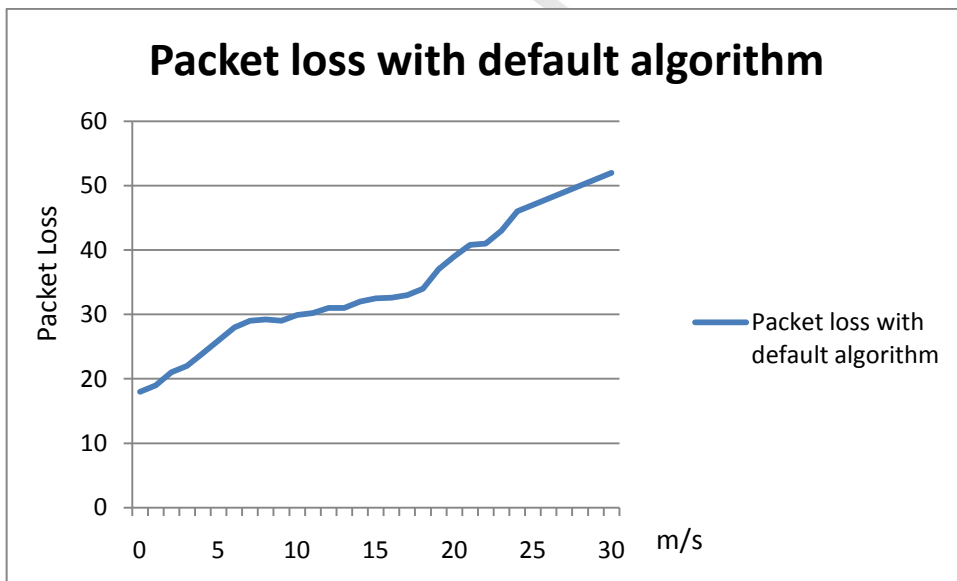
Επιπλέον, από τα αποτελέσματα του μέσου Throughput και Packet Loss ς θα εξάγουμε συμπεράσματα για το κατά πόσο αξίζει η διαπομπή μεταξύ των ετερογενών δικτύων. Όπως γνωρίζουμε το OFDM εκτιμά τις συνθήκες του δικτύου στο οποίο βρίσκεται και αν οι συνθήκες δεν είναι ικανοποιητικές απαιτεί ανεύρεση νέων διαθέσιμων δικτύων. Απώτερο θεμιτό αποτέλεσμα λοιπόν είναι να έχουμε αύξηση του ρυθμού μετάδοσης και μείωση της καθυστέρησης καθώς μεταβαίνει το κινητό τερματικό από το OFDM δίκτυο στο Wifi δίκτυο.

Σε ότι έχει να κάνει με την αύξηση των της ταχύτητας τον κόμβων αναμένουμε παράλληλη μείωση του Throughput στο εκάστοτε δίκτυο καθότι αυξάνοντα οι μεταπομπές ανάμεσα στα δύο δίκτυα OFDM – WLAN. Για τον ίδιο λόγο έχουμε αύξηση του Packet Loss.

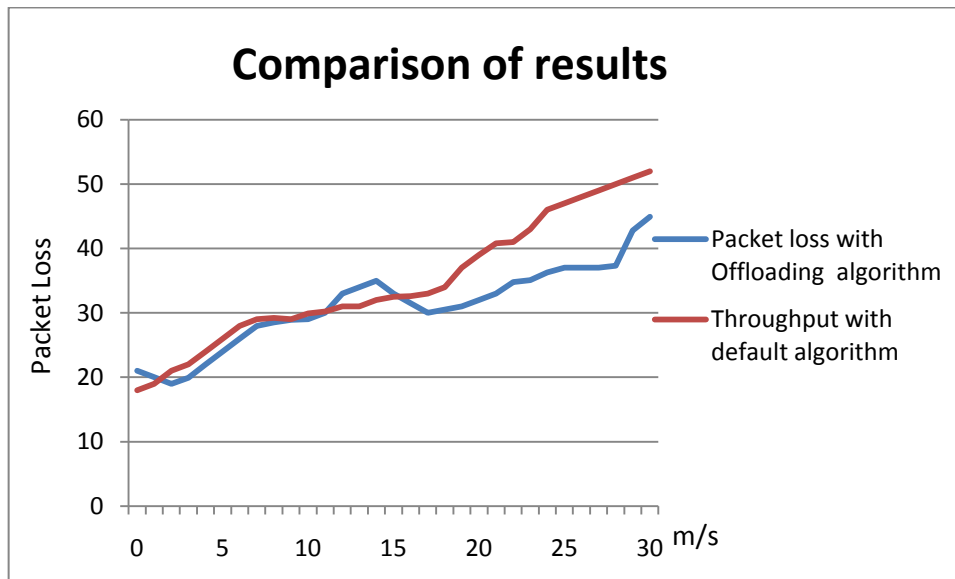
Στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το Packet Loss. Στην εικόνα 5.2 παρουσιάζεται η απώλεια πακέτων σε συνάρτηση με την αύξηση της ταχύτητας χρησιμοποιώντας τον έξυπνο αλγόριθμο για το HO. Αρχικά παρατηρούμε ότι μέχρι τα 15 m/s είναι σταθερή αλλά μετά η ταχύτητα αυξάνεται κατακόρυφα και φτάνει τα 70 pck/s. Στην εικόνα 5.3 έχουμε το ίδιο δίκτυο αλλά έχουμε απενεργοποιήσει τον έξυπνο αλγόριθμο και το HO γίνεται βασισμένοι μόνο στο RSSI. Παρόλο που ξεκινάει χαμηλά για μικρές ταχύτητες όσο αυξάνεται η ταχύτητα παρουσιάζει μια σχεδόν γραμμική αύξηση των απωλειών. Τέλος στην εικόνα 5.3 συγκρίνουμε τα αποτελέσματα μεταξύ τους. Παρόλο που το δίκτυο χωρίς το έξυπνο HO για μικρές ταχύτητες συμπεριφέρεται καλύτερα μετά τα 10m/s, το δίκτυο με έξυπνο αλγόριθμο παρουσιάζει καλύτερη και πιο σταθερή συμπεριφορά.



Εικόνα 5.2: Packet Loss with HO algorithm

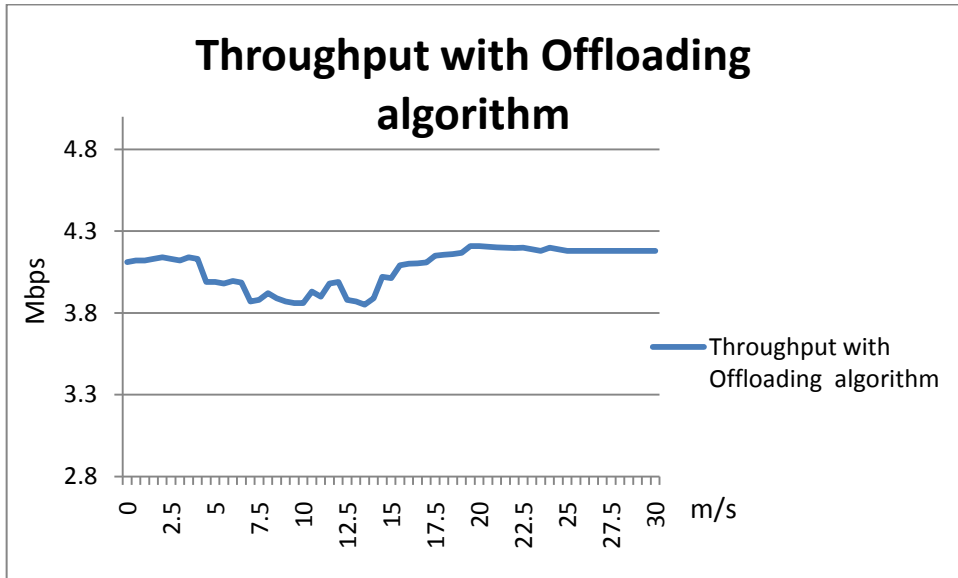


Εικόνα 5.3: Packet Loss with default algorithm

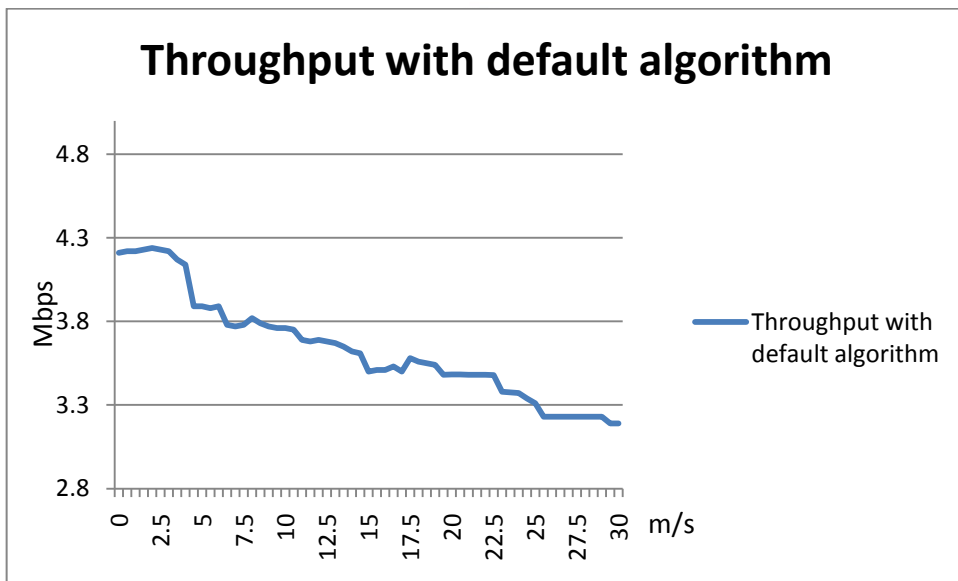


Εικόνα 5.4: Comparison of results ( Packet Loss)

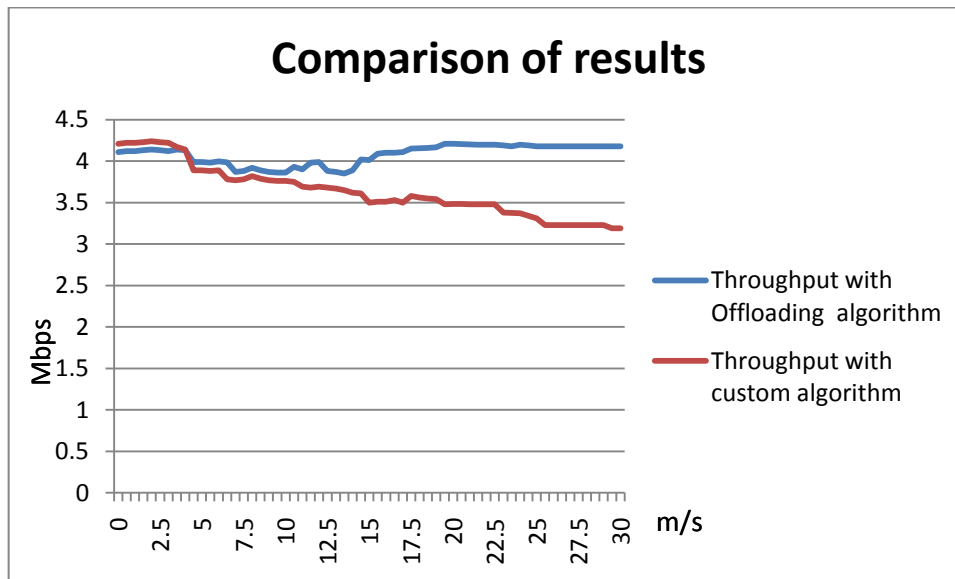
Στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το Throughput. Στην εικόνα 5.5 παρουσιάζεται η απώλεια πακέτων σε συνάρτηση με την αύξηση της ταχύτητας χρησιμοποιώντας τον έξυπνο αλγόριθμο για το HO. Παρατηρούμε ότι μέχρι τα 20m/s παρουσιάζει μια σταθερή αύξηση με μέγιστη τιμή τα 4.3 Mbps, ενώ μέχρι τα 30m/s ελαττώνεται και πλησιάζει τα 4 Mbps . Στην εικόνα 5.6 έχουμε το ίδιο δίκτυο αλλά έχουμε απενεργοποιήσει τον έξυπνο αλγόριθμο και το HO γίνεται βασισμένοι μόνο στο RSSI. Η τιμή του Throughput ξεκινάει στα 3.7 Mbps αλλά όσο αυξάνεται η ταχύτητα παρατηρείται ραγδαία πτώση. Τέλος στην εικόνα 5.7 συγκρίνουμε τα αποτελέσματα μεταξύ τους. Παρόλο που το δίκτυο χωρίς το έξυπνο HO για μικρές ταχύτητες συμπεριφέρεται καλύτερα στη αρχή, με το δίκτυο με έξυπνο αλγόριθμο παρουσιάζει καλύτερη και πιο σταθερή συμπεριφορά.



Εικόνα 5.5: Throughput with HO algorithm

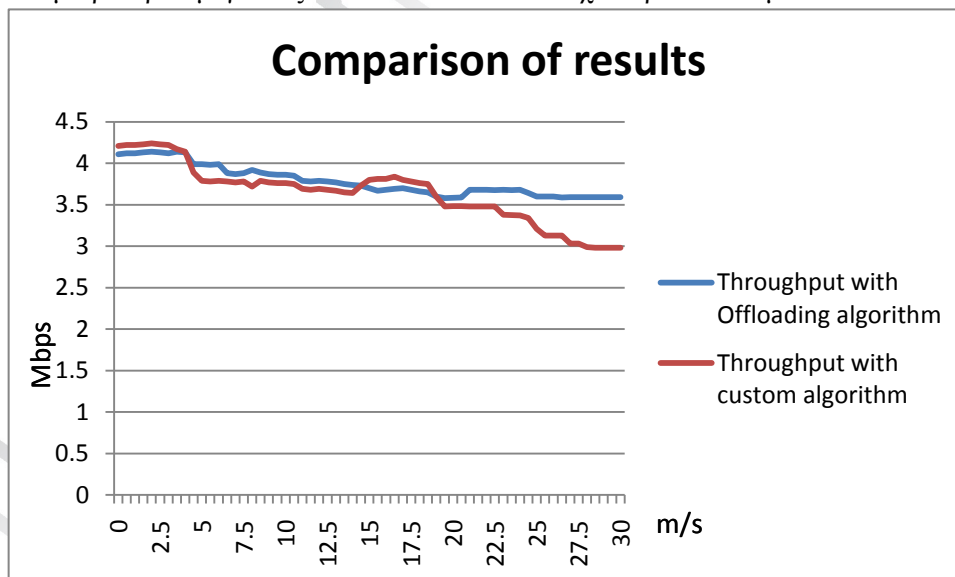


Εικόνα 5.6: Throughput with default algorithm

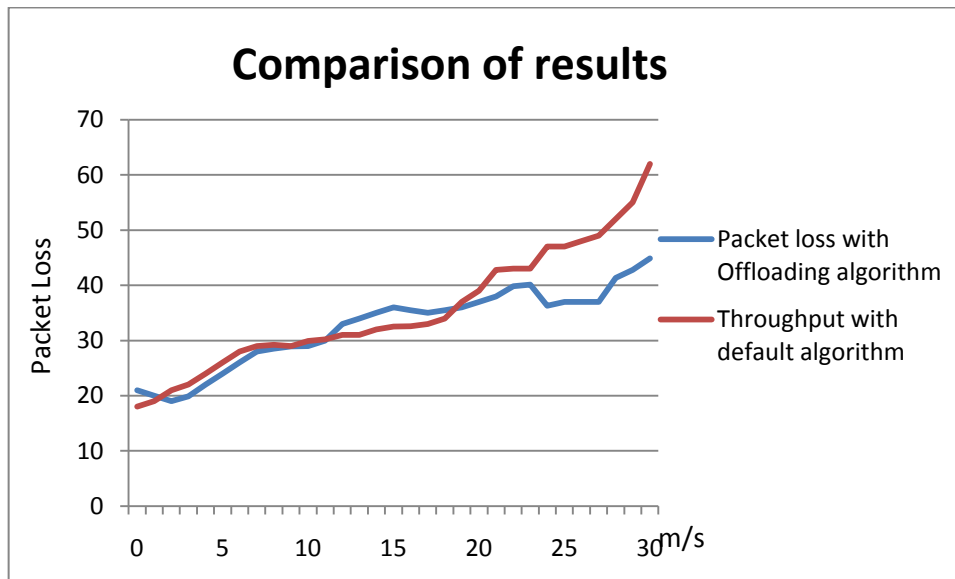


Εικόνα 5.7: Comparison of results (Throughput)

Στις παρακάτω εικόνες εκτελέσαμε τους παραπάνω αλγορίθμους για μικρότερη τοπολογία, από 2000 x 2000 σε 1500 x 1500 για το OFDM διατηρώντας την τοπολογία του Wi-Fi σταθερή. Όπως ήταν αναμενόμενο τα αποτελέσματα ήταν παρόμοια με μικρότερο throughput και αισθητά μεγαλύτερο Packet Loss λόγω του μικρότερου μεγέθους του OFDM και των συχνότερων διαπομπών .



Εικόνα 5.8: Comparison of results with smaller topology (Throughput)

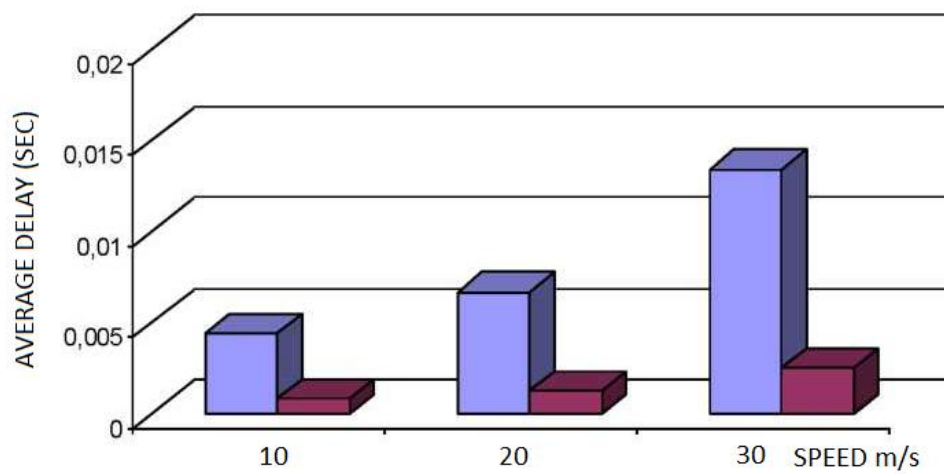


Εικόνα 5.9: Comparison of results with smaller topology ( Packet Loss)

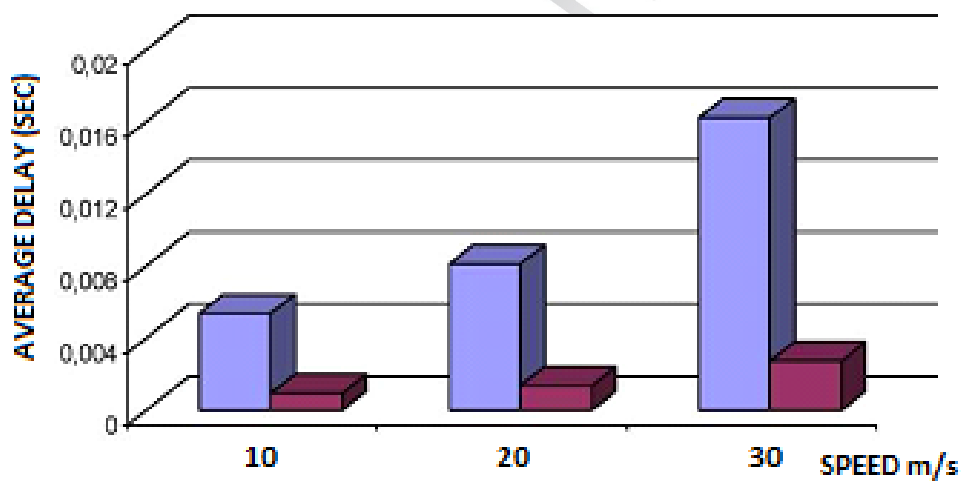
Στις επόμενες δύο γραφικές παραστάσεις (Εικόνα 5,10, Εικόνα 5,11) δίνεται κατά κύριο λόγο για σύγκριση της μέσης καθυστέρησης ως προς την ταχύτητα. Με μπλε χρώμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το OFDM δίκτυο, ενώ με μοβ χρώμα τα αποτελέσματα για το Wi-Fi δίκτυο. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα

έχουμε και αύξηση της μέσης καθυστέρησης. Για την αρχική τοπολογία οι τιμές στο OFDM ξεκινάνε από 0,004 και φτάνουν έως 0,013 ενώ για το Wi-Fi από 0,00015 μέχρι 0,0035. Παρατηρούμε επίσης ότι η μείωση της τοπολογία είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της μέσης καθυστέρησης. Οι τιμές στο OFDM ξεκινάνε από 0,0045 και φτάνουν έως 0,015 ενώ για το Wi-Fi από 0,0002 μέχρι 0,035 όπου το delay overhead είναι από 40 μέχρι 192  $\mu$ s.





Εικόνα 5.10: Average Delay normal topology



Εικόνα 5.11: Average Delay smaller topology

## 6. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στο ζήτημα της αποτελεσματικής εκφόρτωσης δεδομένων (data offloading) σε ετερογενή δίκτυα. Η εργασία ξεκίνησε με μια βιβλιογραφική έρευνα η οποία εξοικείωσε το αναγνώστη σχετικά με τα δίκτυα OFDM , WLAN και παρουσίασε δημοφιλείς προσεγγίσεις σε παρόμοια ζητήματα. Στη συνέχεια αναλύθηκε η λειτουργία των αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν και παρουσιάστηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα .

Κατά τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας τροποποιήθηκε ο αλγόριθμος για το HO με σκοπό την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Παρατηρούμε ότι ανάλογα με την ταχύτητα των κόμβων και τα δύο δίκτυα είχαν προτερήματα και ελαττώματα.

Τέλος καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι λόγω των αυξημένων αναγκών για μετάδοση δεδομένων η χρήση ετερογενών ασύρματων συστημάτων είναι αναγκαία και χρήσιμη. Επίσης, οι μηχανισμοί του OFDM βοηθούν ώστε η διατομή μεταξύ διαδίκτυωμένων ετερογενών δικτύων να γίνεται σε αμελητέο χρόνο και έτσι να έχουμε σχεδόν συνεχή μεταφορά δεδομένων και με την δυνατότητα τους να εκτιμούν συνεχώς τις συνθήκες του κάθε δικτύου και να προχωράνε στην ανεύρεση νέων καλύτερων δικτύων προσφέρουν το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα στους χρήστες.

## Βιβλιογραφία

- [1] Perez Sarah (February 11, 2010). "[Mobile data traffic surge: 40 exabytes by 2014](#)". *Read Write web blog*. Retrieved August 25, 2011.
- [2] Aruna Balasubramanian, Ratul Mahajan, Arun Venkataramani. [Augmenting Mobile 3G using WiFi](#) Proc. [MobiSys](#) 2010
- [3] Kyunghan Lee, Joohyun Lee, Yung Yi, Injong Rhee and Song Chong. [Mobile Data Offloading: How Much Can WiFi Deliver?](#) Proc. [CoNEXT](#) 2010
- [4] 3GPP TS 36.201 V10.0.0 - LTE physical layer; General Description (Release 10)
- [5] 3GPP TS 36.104 V10.3.0 (2011-06) - Base Station (BS) radio transmission and reception
- [6] I.A Akylidiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks", IEEE Communications Magazine vol. 40, Issue 8, pp. 102—114, August 2002.
- [7] «IEEE 802.11 Architecture», <http://www.scribd.com/doc/3864389/802-11-Architecture>
- [8] «Introduction to IEEE 802.11», <http://www.intellgraphics.com/introduction-ieee-80211>
- [9] «IEEE 802.11 Architecture», [http://www.tutorial-reports.com/wireless/wlanWiFi/WiFi\\_architecture.php](http://www.tutorial-reports.com/wireless/wlanWiFi/WiFi_architecture.php)

- [10] «Υπηρεσίες IEEE802.11»  
[http://www.patraswireless.net/tutorial/basic%20tutorial/tutorial/ieee\\_802\\_11b.htm](http://www.patraswireless.net/tutorial/basic%20tutorial/tutorial/ieee_802_11b.htm)
- [11] «OSI Model»,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/OSI\\_model](http://en.wikipedia.org/wiki/OSI_model)
- [12] «How 802.11 Wireless Works»,[http://technet.microsoft.com/en-us/library/cc757419\(W.S.10\).aspx](http://technet.microsoft.com/en-us/library/cc757419(W.S.10).aspx)
- [13] «IEEE 802.11 Overview», <http://www.eecs.berkeley.edu/ergen/docs/IEEE-802.11overview.ppt#257>
- [14] «Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)»,  
<http://www.qsl.net/n9zia/wireless/dsss.html>
- [15] «Frequency Hopped Spread Spectrum (FHSS)»,  
<http://www.qsl.net/n9zia/wireless/fhss.html>
- [16] «MAC Layer Introduction & the IEEE802.11 standard»,  
<http://www.ecse.rpi.edu/homepages/abouzeid/6962-05/monet05.pdf>
- [17] «Παροχή Στοχαστικών Εγγυήσεων (QoS) σε IEEE 802.11 δίκτυα», [http://www.iit.demokritos.gr/IIT\\_S/Presentations/on\\_off\\_802.11MAC.pdf](http://www.iit.demokritos.gr/IIT_S/Presentations/on_off_802.11MAC.pdf)
- [18] Stefan Mangold, Sunghyun Choi, Peter May, Ole Klein, Guido Hiertz, Lothar Stibor, «IEEE 802.11e Wireless LAN for Quality of Service»,  
<http://www.mwnl.snu.ac.kr/~schoi/publication/Conferences/02-EW.pdf>

- [19] «Overview of IEEE 802.11 Security»,  
<http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/2001/Mar01/01154r0P802->
- [20] [15\\_TG3-Overview-of-8Q2-11-Security.ppt#332,2.Acknowledgements](#)
- [21] «Wired Equivalent Privacy»,[http://en.wikipedia.org/wiki/Wired Equivalent Privacy](http://en.wikipedia.org/wiki/Wired_Equivalent_Privacy)
- [22] 3GPP TS 36.211 V10.2.0 (2011-06) - Physical Channels and Modulation
- [23] «3GPP»,<http://www.3gpp.org/article/OFDM>
- [24] «The OFDM Architecture»,  
<http://www.scribd.com/doc/17298925/the-OFDM-Architecture>
- [25] «A look at PDP Context in OFDM networks»,  
[http://www.3g4g.co.uk/Tutorial/ZG/zg\\_pdp](http://www.3g4g.co.uk/Tutorial/ZG/zg_pdp)
- [26] «OFDM Architecture Description» <http://www.wireless-center.net/Wireless-Internet-Technologies-and-Applications/1855.html>
- [27] «Ευρυζωνικά δίκτυα»
- [28] «OFDM network architecture»,  
[http://www.tek.com/Masurement/App\\_Notes/2F\\_14251/eng/architecture.pdf](http://www.tek.com/Masurement/App_Notes/2F_14251/eng/architecture.pdf)
- [29] «OFDM/WCDMA Logical, Transport and Physical

Channels»,

<http://www.networkdictionary.com/Wireless/OFDM-WCDMA-Logical.php>

[30] «OFDM / WCDMA Channels», <http://www.radio-electronics.com/info/cellularcomms/OFDM/OFDM-wcdma-channels.php>

[31] K. Boman, G. Horn, P. Howard, and V. Niemi, «OFDM Security», IEEE Communications Magazine, October 2002

[32] «ns-2, Contributed\_Code», [http://nslam.isi.edu/nslam/index.php/Contributed\\_Code](http://nslam.isi.edu/nslam/index.php/Contributed_Code)

[33] «Network Simulation», [http://en.wikipedia.org/wiki/Network\\_simulation](http://en.wikipedia.org/wiki/Network_simulation)

[34] «NS (Simulator)», [http://en.wikipedia.org/wiki/Ns\\_\(simulator\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Ns_(simulator))

[35] RIIT Vol.X. Num.2. 2009 167-184, ISSN1405-7743  
FI-UNAM (artículo arbitrado)  
<http://www.ejournal.unam.mx/ict/vol1002/ICT001000208.pdf>

[36] IEEE TRANSACTIONS ON MOBILE  
COMPUTING, VOL. 11, NO. 5, MAY 2012

[37] International Journal of Computer Applications (0975  
– 8887) Volume 62– No.21, January 2013

### *Συντομογραφίες*

Ακρόνυμο	Επεξήγηση
3GPP	3 <sup>rd</sup> Generation Partnership Project
AIFS	Arbitrary Inter Frame Space
AK	Authorization Key
AP	Access Point
API	Application Programming Interfaces
ARQ	Automatic Repeat Request
BCCH	Broadcast Control Channel
BE	Best Effort
BER	Bit Error Rate
BM-SC	Broadcast/Multicast Service Center
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BS	Base Station
BSA	Basic Service Area
BSS	Base Service Set
CBR	Constant Bit Rate
CCCH	Common Control Channel
CP	Cyclic Prefix
CPS	Common Part Sublayer
CS	Convergence Sublayer
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CTCH	Common Traffic Channel
CTS	Clear To Send
DCCH	Dedicated Control Channel
DCF	Distribution Coordination Function
DCH	Dedicated Channel
DES	Data Encryption Data
DFS	Dynamic Frequency Selection
DS	Distribution System
DSCH	Downlink Shared Channel

MIH	Media Independent Handover
MIHF	Media Independent Handover Function
MIHU	MISH User
MIIS	Media Independent Information Services
NAM	Network Animator
ND	Neighbour Discovery
NLOS	Non Line Of Sight
NRTPS	Non Real-Time Polling Service
NS	Network Simulator
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSI	Open System Interconnection
PCCH	Padding Control Channel
PCF	Point Coordination Function
PDN	Public Data Network
PDP	Packet Data Protocol
PHY	Physical Layer
PKM	Private Key Management
PLCD	Physical Layer Convergence Procedure
PMD	Physical Medium Dependent
PoA	Point of Attachment
PoS	Point of Service
PS	Packet-Switched
PSTN	Public Switched Telephone Network
PTM	Point To Multipoint
PTP	Point To Point
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
QSTA	QoS STATION
RA	Router Advertisements
RAB	Radio Access Bearer



DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
DTCH	Dedicated Traffic Channel
EDCA	Enhanced Distribution Channel Access
ertPS	Enhanced Real-Time Polling Service
ESS	Extend Service Set
FACH	Forward Access Channel
FDD	Frequency Division Duplexing
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transform
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FTP	File Transfer Protocol
GFSK	Gaussian FSK
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GTP	GPRS tunneling protocol
HCCA	HCF Controlled Channel Access
HCF	Hybrid Coordination Function
HMAC	Hashed Message Authentication Code
HR-DSSS	High Rate DSSS
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HS-DSCH	High - Speed DSCH
HSPDA	High-Speed Downlink Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
IBSS	Independent Basic Service Set
ICI	Inter-Carrier Interference
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IEFT	Internet Engineering Task Force
ISDN	Integrated Services Digital Network
LAC	Link Access Control
LLC	Logic Link Control

LOS	Line Of Size
MAC	Medium Access Control
MICS	Media Independent Command Services
MIES	Media Independent Event Services

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

## Παράρτημα

Παρακάτω αναλύουμε σε τρία (3) στάδια την εγκατάσταση του λογισμικού προσομοίωσης:

### Προετοιμασία πριν την εγκατάσταση

Εφόσον έχουμε εγκαταστήσει επιτυχώς της διανομή 10.04 Ubuntu στο Terminal γράφουμε τις παρακάτω εντολές:

- Sudo apt get-install build-essentials
- Sudo apt-get install autoconfig automake
- Sudo apt-get install xorg-dev g++ xgraph

### Εγκατάσταση προγράμματος προσομοίωσης NS-2.30-allinone

Πριν την εγκατάσταση πρέπει να κάνουμε μια σειρά από αλλαγές στις βιβλιοθήκες του συστήματος που είναι οι εξής :

- Στο φάκελο ns-allinone-2.30/otcl-1.12 ανοίγουμε το αρχείο Makefile.in στο CC=@CC@ το αλλάζουμε με CC= gcc-4.3 (την έκδοση που έχουμε στον υπολογιστή).
- Στο φάκελο ns-allinone-2.30/ tclcl-1.18 ανοίγουμε το αρχείο Tcl.cc και στη γραμμή 566 αλλάζουμε το char \*p = strchr(localName, '('); με char \*p = const\_cast<char\*>(strchr(localName, '('));
- Στο φάκελο ns-allinone-2.30/ns-2.30/queue ανοίγουμε το αρχείο red.cc και στις γραμμές 876 – 879 βάζουμε (char\*)strstr(v->name())
- Στο φάκελο ns-allinone-2.30/ns-2.30/queue ανοίγουμε το αρχείο rio.cc και στις γραμμές 316 – 317 βάζουμε (char\*)strstr(v->name())
- Στο φάκελο ns-allinone-2.30/ns-2.30/queue ανοίγουμε το αρχείο vq.cc και στη γραμμή 333 βάζουμε (char\*)strstr(v->name())
- Στο φάκελο ns-allinone-2.30/ns-2.30/queue ανοίγουμε το αρχείο rem.cc και στις γραμμές 335 – 337 βάζουμε (char\*)strstr(v->name())
- Στο φάκελο ns-allinone-2.30/ns-2.30/queue ανοίγουμε το αρχείο gk.cc και στη γραμμή 207 βάζουμε (char\*)strstr(v->name())
- Μετά τις αλλαγές, μέσα από το τερματικό, μπαίνουμε στο φάκελο ns-allinone-2.30 και γράφουμε ./install.
- Μόλις τελειώσει η εγκατάσταση πρέπει να ορίσουμε τα paths. Στο τερματικό δίνουμε την εντολή gedit ~/.bashrc και στο τέλος του αρχείου προσθέτουμε τα παρακάτω με τα

στοιχεία που μας δίνει το πρόγραμμα:

```
# LD_LIBRARY_PATH
OTCL_LIB=/home/laptop/Desktop/ns-allinone-2.30/otcl-1.12
NS2_LIB=/home/laptop/Desktop/ns-allinone-2.30/lib
X11_LIB=/usr/X11R6/lib
USR_LOCAL_LIB=/usr/local/lib
export LD_LIBRARY_PATH=$LD_LIBRARY_PATH:$OTCL_LIB:$NS2_LIB
:$X11_LIB:$USR_LOCAL_LIB
# TCL_LIBRARY
TCL_LIB=/home/laptop/Desktop/ns-allinone-2.30/tcl8.4.18/library
USR_LIB=/usr/lib
export TCL_LIBRARY=$TCL_LIB:$USR_LIB

# PATH
XGRAPH=/home/laptop/Desktop/ns-allinone-2.30/bin:/home/laptop/Desktop/ns-allinone-
2.30/tcl8.4.13/unix:/home/laptop/Desktop/ns-allinone-2.30/tk8.4.13/unix
NS=/home/laptop/Desktop/ns-allinone-2.30/ns-2.30/
NAM=/home/laptop/Desktop/ns-allinone-2.30/nam-1.13/
export PATH=$PATH:$XGRAPH:$NS:$NAM
```

- Μετά την εγκατάσταση πάμε στο φάκελο του προγράμματος ns-2.30 και δίνουμε την εντολή ./validate. Μόλις τελειώσει το validate η εγκατάσταση του προγράμματος είναι επιτυχής.

#### Πατσάρισμα του NS2 για να υποστηρίζει OFDM αρχιτεκτονικές

Μετά την εγκατάσταση του λογισμικού προσομοίωσης πρέπει να προσθέσουμε το OFDM . Το λογισμικό το βρίσκουμε στην ιστοσελίδα [http://www.nist.gov/itl/antd/emntg/ssm\\_tools.cfm](http://www.nist.gov/itl/antd/emntg/ssm_tools.cfm) . Μόλις κατεβάσουμε τα αρχεία τα αποσυμπιέζουμε στο φάκελο ns-2.30 και στο τερματικό τρέχουμε την εντολή patch -p0 <patch-ns-2.31-041707. Μετά πληκτρολογούμε make clean; και make.

Λόγω της ιδιαιτερότητας της των δικτύων πολλαπλών interfaces πρέπει να χρησιμοποιήσουμε το NOAH ( Non Ad -Hoc Routing Protocol) πρωτόκολλο. Στη σελίδα <http://icapeople.epfl.ch/widmer/uwb/ns-2/noah/> δίνονται τα αρχεία που πρέπει να προσθέσουμε καθώς και οδηγίες εγκατάστασης.

Τέλος μετά την ολοκλήρωση όλων των παραπάνω βημάτων είμαστε σε θέση να έχουμε το λογισμικό προσομοίωσης με όλες τις απαραίτητες παραμέτρους που χρειάζονται για τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.[30][31][32]

Στο παράρτημα έχουμε τους κώδικες που χρησιμοποιήσαμε για την υλοποίηση της προσομοίωσης.

Κώδικας προσομοίωσης:

```
# Scenario: Create a multi-interface node using different technologies
#   There is a TCP connection between the router0 and MultiFaceNode.
#   We first use the OFDM interface, then we switch the traffic
#   to the 802.11 interface when it becomes available. Then the Ethernet
#   link is connected and we switch to that interface.
#   To test disconnection, we disconnect Ethernet to switch to 802.11, then
#   the node leaving the coverage area of 802.11 creates a link going down
#   event to redirect to OFDM.
#
# Topology scenario:
#
#           bstation802.11(2.0.0)->
#           /
#           /
#
# router0(0.0.0)---router1(1.0.0)---+-----+
#           \           + iface1:802.11(2.0.1)|           |
#           \           +-----+ MutiFaceNode |
#           bstation802.16(3.0.0)-> + iface2:802.16(3.0.1)| (4.0.0) |
#           \           +-----+
#
#
```

```

#
#

global ns

#set debug attributes
Agent/ND set debug_ 1
Agent/MIH set debug_ 1
Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6 set debug_ 1
Mac/802_16 set debug_ 1
Mac/802_11 set debug_ 1

Mac/802_16 set dcd_interval_ 5 ;#max 10s
Mac/802_16 set ucd_interval_ 5 ;#max 10s
set default_modulation OFDM_16QAM_3_4 ;#OFDM_BPSK_1_2
set contention_size 5 ;#for initial ranging and bw
Mac/802_16 set t21_timeout_ 0.02 ;#max 10s, to replace the timer for looking at preamble
Mac/802_16 set client_timeout_ 50

#random used in movement of MN
set seed [lindex $argv 0]
set move [new RandomVariable/Uniform]
$move set min_ 1
$move set max_ 1
for {set j 0} {$j < $seed} {incr j} {

```

```

    set departure [$move value]
}

#defines function for flushing and closing files
proc finish {} {
    global ns f
    $ns flush-trace
    close $f
    puts " Simulation ended."
    exit 0
}

#$defaultRNG seed [lindex $argv 0]
Mac/802_11 set pr_limit_ [lindex $argv 1] ;#1.0 for link down only
Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6/Handover/Handover2 set shutdown_on_ack_ [lindex $argv 2]

# set global variables
set output_dir .
set traffic_start 5
set traffic_stop 180
set simulation_stop 180

#create the simulator
set ns [new Simulator]
$ns use-newtrace

```

```

#open file for trace
set f [open out.res w]

$ns trace-all $f

# set up for hierarchical routing (needed for routing over a basestation)
$ns node-config -addressType hierarchical

AddrParams set domain_num_ 5           ;# domain number
AddrParams set cluster_num_ {1 1 1 1}  ;# cluster number for each domain
AddrParams set nodes_num_ {1 1 2 2 1}  ;# number of nodes for each cluster

# Node address for router0 and router1 are 4 and 5, respectively.
set router0 [$ns node 0.0.0]
puts "router0: tcl=$router0; id=[$router0 id]; addr=[$router0 node-addr]"
set router1 [$ns node 1.0.0]
puts "router1: tcl=$router1; id=[$router1 id]; addr=[$router1 node-addr]"

# connect links
$ns duplex-link $router1 $router0 100MBit 30ms DropTail 1000

# creation of the MutiFaceNodes. It MUST be done before the 802.11
$ns node-config -multiIf ON           ;#to create MultiFaceNode
set multiFaceNode [$ns node 4.0.0]    ;# node id is 6
$ns node-config -multiIf OFF          ;#reset attribute

puts "multiFaceNode: tcl=$multiFaceNode; id=[$multiFaceNode id]; addr=[$multiFaceNode node-addr]"

#

```



```

# Now we add 802.11 nodes

#

# parameter for wireless nodes

set opt(chan)      Channel/WirelessChannel  ;# channel type for 802.11
set opt(prop)      Propagation/TwoRayGround  ;# radio-propagation model 802.11
set opt(netif)     Phy/WirelessPhy          ;# network interface type 802.11
set opt(mac)       Mac/802_11              ;# MAC type 802.11
set opt(ifq)       Queue/DropTail/PriQueue  ;# interface queue type 802.11
set opt(ll)        LL                       ;# link layer type 802.11
set opt(ant)       Antenna/OmniAntenna      ;# antenna model 802.11
set opt(ifqlen)    50                      ;# max packet in ifq 802.11
set opt(adhocRouting) NOAH                  ;# routing protocol 802.11
set opt(OFDMRouting) ""                    ;# routing for OFDM (to reset node config)

set opt(x)         2000                    ;# X dimension of the topography
set opt(y)         2000                    ;# Y dimension of the topography

# configure rate for 802.11
Mac/802_11 set basicRate_ 1Mb
Mac/802_11 set dataRate_ 11Mb
Mac/802_11 set bandwidth_ 11Mb

#create the topography
set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid $opt(x) $opt(y)

#puts "Topology created"

```

```

set chan [new $opt(chan)]

# create God

create-god 11 ;# give the number of nodes

#configure for 20m radius 2.4Ghz

Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.025

Phy/WirelessPhy set freq_ 2412e+6

Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 6.12277e-09

Phy/WirelessPhy set CStresh_ [expr 0.9*[Phy/WirelessPhy set RXThresh_]]

# configure Access Points

$ns node-config -adhocRouting $opt(adhocRouting) \
    -llType $opt(ll) \
    -macType $opt(mac) \
    -channel $chan \
    -ifqType $opt(ifq) \
    -ifqLen $opt(ifqlen) \
    -antType $opt(ant) \
    -propType $opt(prop) \
    -phyType $opt(netif) \
    -topoInstance $topo \
    -wiredRouting ON \
    -agentTrace ON \
    -routerTrace OFF \
    -macTrace ON \
    -movementTrace OFF

```

```

# configure Base station 802.11
set bstation802 [$ns node 2.0.0] ;
$bstation802 set X_ 500.0
$bstation802 set Y_ 1000.0
$bstation802 set Z_ 0.0

puts "bstation802: tcl=$bstation802; id=[$bstation802 id]; addr=[$bstation802 node-addr]"

# we need to set the BSS for the base station
set bstationMac [$bstation802 getMac 0]
set AP_ADDR_0 [$bstationMac id]
puts "bss_id for bstation 1=$AP_ADDR_0"
$bstationMac bss_id $AP_ADDR_0
$bstationMac enable-beacon

# creation of the wireless interface 802.11
$ns node-config -wiredRouting OFF \
    -macTrace ON
set iface1 [$ns node 2.0.1] ;# node id is 8.
$iface1 random-motion 0 ;# disable random motion
$iface1 base-station [AddrParams addr2id [$bstation802 node-addr]] ;#attach mn to basestation
$iface1 set X_ 470.0
$iface1 set Y_ 1000.0
$iface1 set Z_ 0.0

# define node movement. We start from outside the coverage, cross it and leave.
$ns at $departure "$iface1 setdest 540.0 1000.0 25.0"
puts "iface1: tcl=$iface1; id=[$iface1 id]; addr=[$iface1 node-addr]"

```

```

# add link to backbone

$ns duplex-link $station802 $router1 100MBit 15ms DropTail 1000

# add Wimax nodes

set opt(netif)    Phy/WirelessPhy/OFDM    ;# network interface type 802.16
set opt(mac)      Mac/802_16             ;# MAC type 802.16

# radius =

Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.025

#Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 7.91016e-15 ;#500m:2.025e-12

Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 1.26562e-13 ;#1000m radius

Phy/WirelessPhy set CStresh_ [expr 0.8*[Phy/WirelessPhy set RXThresh_]]

# configure Access Points

$ns node-config -adhocRouting $opt(adhocRouting) \
    -llType $opt(ll) \
    -macType $opt(mac) \
    -channel $chan \
    -ifqType $opt(ifq) \
    -ifqLen $opt(ifqlen) \
    -antType $opt(ant) \
    -propType $opt(prop) \
    -phyType $opt(netif) \
    -topoInstance $topo \
    -wiredRouting ON \
    -agentTrace ON \
    -routerTrace ON \

```

```

-macTrace ON \
-movementTrace OFF

# configure Base station 802.16
set bstation802_16 [$ns node 3.0.0] ;

$bstation802_16 set X_ 1000

$bstation802_16 set Y_ 1000

$bstation802_16 set Z_ 0.0

puts "bstation802_16: tcl=$bstation802_16; id=[$bstation802_16 id]; addr=[$bstation802_16 node-addr]"

set clas [new SDUClassifier/Dest]

[$bstation802_16 set mac_(0)] add-classifier $clas

#set the scheduler for the node. Must be changed to -shed [new $opt(sched)]

set bs_sched [new WimaxScheduler/BS]

$bs_sched set-default-modulation $default_modulation

[$bstation802_16 set mac_(0)] set-scheduler $bs_sched

[$bstation802_16 set mac_(0)] set-channel 1

# creation of the wireless interface 802.11

$ns node-config -wiredRouting OFF \
    -macTrace ON

set iface2 [$ns node 3.0.1] ;# node id is 8.

$iface2 random-motion 0 ;# disable random motion

$iface2 base-station [AddrParams addr2id [$bstation802_16 node-addr]] ;#attach mn to basestation

$iface2 set X_ 470.0

$iface2 set Y_ 1000.0

$iface2 set Z_ 0.0

```

```

set clas [new SDUClassifier/Dest]
[$iface2 set mac_(0)] add-classifier $clas

#set the scheduler for the node. Must be changed to -shed [new $opt(sched)]

set ss_sched [new WimaxScheduler/SS]

[$iface2 set mac_(0)] set-scheduler $ss_sched

[$iface2 set mac_(0)] set-channel 0

# define node movement. We start from outside the coverage, cross it and leave.
$ns at $departure "$iface2 setdest 540.0 1000.0 1.0"

puts "iface2: tcl=$iface2; id=[$iface2 id]; addr=[$iface2 node-addr]"

# add link to backbone

$ns duplex-link $bstation802_16 $router1 100MBit 15ms DropTail 1000

# add interfaces to MultiFaceNode
$multiFaceNode add-interface-node $iface1
$multiFaceNode add-interface-node $iface2

# install ND modules

# now WLAN
set nd_bs [$bstation802 install-nd]
$nd_bs set-router TRUE
$nd_bs router-lifetime 1800

set nd_mn [$iface1 install-nd]

```

```

# now WIMAX

set nd_bs2 [$bstation802_16 install-nd]

$nd_bs2 set-router TRUE

$nd_bs2 router-lifetime 20 ;#just enough to expire while we are connected to wlan.

set nd_mn2 [$iface2 install-nd]

# install interface manager into multi-interface node and CN
Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6/Handover/Handover2 set debug_1
set handover [new Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6/Handover/Handover2]
$multiFaceNode install-ifmanager $handover
$nd_mn set-ifmanager $handover
$handover nd_mac $nd_mn [$iface1 set mac_(0)] ;#to know how to send RS
$nd_mn2 set-ifmanager $handover
$handover nd_mac $nd_mn2 [$iface2 set mac_(0)] ;#to know how to send RS

set ifmgmt_cn [$router0 install-default-ifmanager]

# install MIH in multi-interface node
set mih [$multiFaceNode install-mih]

$handover connect-mih $mih ;#create connection between MIH and iface management

# install MIH on AP/BS
set mih_bs [$bstation802 install-mih]
set tmp_bs [$bstation802 set mac_(0)]

```

```

$tmp_bs mih $mih_bs
$mih_bs add-mac $tmp_bs

set mih_bs [$bstation802_16 install-mih]
set tmp_bs [$bstation802_16 set mac_(0)]
$tmp_bs mih $mih_bs
$mih_bs add-mac $tmp_bs

# Now we can register the MIH module with all the MACs
set tmp2 [$iface1 set mac_(0)] ;#in 802.11 one interface is created
$tmp2 mih $mih
$mih add-mac $tmp2 ;#inform the MIH about the local MAC
set tmp2 [$iface2 set mac_(0)] ;#in 802.16 one interface is created
$tmp2 mih $mih
$mih add-mac $tmp2 ;#inform the MIH about the local MAC

# set the starting time for Router Advertisements
$ns at 2 "$nd_bs start-ra"
$ns at 2 "$nd_bs2 start-ra"

#traffic
##configure traffic
set i 0
set udpvideo_($i) [new Agent/UDP]
$udpvideo_($i) set packetSize_ 1240

```



```
#create video traffic

set cbrvideo_($i) [new Application/Traffic/CBR]

$cbrvideo_($i) set packetSize_ 4960

$cbrvideo_($i) set interval_ 0.1

$cbrvideo_($i) attach-agent $udpvideo_($i)

set nullvideo_($i) [new Agent/Null]

#sinkNode is transmitter

$ns attach-agent $router0 $udpvideo_($i)

$ns attach-agent $multiFaceNode $nullvideo_($i)

$handover add-flow $nullvideo_($i) $udpvideo_($i) $iface2 1

$ns at $traffic_start "$cbrvideo_($i) start"

$ns at $traffic_stop "$cbrvideo_($i) stop"

$ns at $simulation_stop "finish"

puts " Simulation is running ... please wait ..."

$ns run
```

Κώδικας για το HO:

# Scenario: Communication between MN and Sink Node with MN attached to BS.

#

# Topology scenario:

#

#

# |----|

# | MN0 | ; 1.0.1

# |----|

#

#

# (^)

# |

# |-----|

# | Base Station | ; 1.0.0

# |-----|

# |

# |

# |-----|

# | Sink node | ; 0.0.0

# |-----|

#

```

#read arguments

set seed                [index $argv 0]

Mac/802_16 set scan_iteration_  [index $argv 1]

set use_going_down      [index $argv 2]

set other_node          [index $argv 3]

if {$use_going_down == 1} {
    Mac/802_16 set lgd_factor_    1.1
} else {
    Mac/802_16 set lgd_factor_    1.0
}

Mac/802_16 set scan_duration_    50
Mac/802_16 set interleaving_interval_ 40
Agent/WimaxCtrl set adv_interval_ 1.0
Agent/WimaxCtrl set default_association_level_ 0
Agent/WimaxCtrl set synch_frame_delay_ 0.5
Agent/WimaxCtrl set debug_ 1

set simulation_time      200 ;#30

set nb_mn                1

Mac/802_16 set dcd_interval_    5 ;#max 10s
Mac/802_16 set ucd_interval_    5 ;#max 10s

set default_modulation    OFDM_16QAM_3_4 ;#OFDM_BPSK_1_2

```

```
set contention_size          5 ;#for initial ranging and bw
Mac/802_16 set t21_timeout_  0.02 ;#max 10s, to replace the timer for looking at preamble
Mac/802_16 set client_timeout_ 50

#random used in movement of MN
set move [new RandomVariable/Uniform]
$move set min_ 0
$move set max_ 10

# set global variables
set packet_size 250                ;# packet size in bytes at CBR applications
set gap_size 0.05 ;#compute gap size between packets
set output_dir .
set traffic_start 10
set traffic_stop 150

set simulation_stop $simulation_time

set use_voice 0
set use_video 1

#define debug values
Agent/ND set debug_ 1
Agent/MIH set debug_ 1
Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6/Handover/Handover1 set debug_ 1
Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6/Handover/Handover1 set case_ 3
```

```
Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6 set debug_ 1
```

```
Mac/802_16 set debug_ 1
```

```
#define coverage area for base station:
```

```
Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.025
```

```
#Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 6.12277e-09 ;#20m coverage
```

```
#Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 2.90781e-09 ;#500m coverage
```

```
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 1.26562e-13 ;#1000m radius
```

```
Phy/WirelessPhy set CStresh_ [expr 0.8 *[Phy/WirelessPhy set RXThresh_]]
```

```
# Parameter for wireless nodes
```

```
set opt(chan) Channel/WirelessChannel ;# channel type
```

```
set opt(prop) Propagation/TwoRayGround ;# radio-propagation model
```

```
set opt(netif) Phy/WirelessPhy/OFDM ;# network interface type
```

```
set opt(mac) Mac/802_16 ;# MAC type
```

```
set opt(ifq) Queue/DropTail/PriQueue ;# interface queue type
```

```
set opt(ll) LL ;# link layer type
```

```
set opt(ant) Antenna/OmniAntenna ;# antenna model
```

```
set opt(ifqlen) 50 ;# max packet in ifq
```

```
set opt(adhocRouting) NOAH ;# routing protocol
```

```
set opt(x) 4000 ;# X dimension of the topography
```

```
set opt(y) 2000 ;# Y dimension of the topography
```

```
#defines function for flushing and closing files
```

```
proc finish {} {
```

```
    global ns tf output_dir nb_mn
```

```

    $ns flush-trace
    close $tf
    exit 0
}

#create the simulator
set ns [new Simulator]

$ns use-newtrace

#open file for trace
set f [open out.res w]
$ns trace-all $f

#create the topography
set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid $opt(x) $opt(y)
#puts "Topology created"

#open file for trace
set tf [open $output_dir/out.res w]
$ns trace-all $tf
#puts "Output file configured"

# set up for hierarchical routing (needed for routing over a basestation)
#puts "start hierarchical addressing"
$ns node-config -addressType hierarchical

AddrParams set domain_num_3                ;# domain number

```

```

lappend cluster_num 1 1 1                                ;# cluster number for each domain

AddrParams set cluster_num_ $cluster_num

lappend eilastlevel 2 [expr ($nb_mn+2)] [expr ($nb_mn+2)];# number of nodes for each cluster (1 for
sink and one for mobile nodes + base station

AddrParams set nodes_num_ $eilastlevel

puts "Configuration of hierarchical addressing done"

# Create God
create-god [expr ($nb_mn + 2)]                          ;# nb_mn + 2 (base station and sink node)
#puts "God node created"

#creates the sink node in first addressing space.
set sinkNode [$ns node 0.0.0]

#provide some co-ord (fixed) to base station node
$sinkNode set X_ 50.0
$sinkNode set Y_ 10.0
$sinkNode set Z_ 0.0
#puts "sink node created"

set router [$ns node 0.0.1]

#creates the Access Point (Base station)
$ns node-config -adhocRouting $opt(adhocRouting) \
    -llType $opt(ll) \
    -macType $opt(mac) \
    -ifqType $opt(ifq) \
    -ifqLen $opt(ifqlen) \

```

```

-antType $opt(ant) \
-propType $opt(prop) \
-phyType $opt(netif) \
-channel [new $opt(chan)] \
-topoInstance $topo \
-wiredRouting ON \
-agentTrace ON \
-routerTrace ON \
-macTrace ON \
-movementTrace OFF

#puts "Configuration of base station"

Mac/802_16 set debug_1
set bstation [$ns node 1.0.0]
$bstation random-motion 0
#puts "Base-Station node created"
#provide some co-ord (fixed) to base station node
$bstation set X_ 1100.0
$bstation set Y_ 1000.0
$bstation set Z_ 0.0
set clas [new SDUClassifier/Dest]
[$bstation set mac_(0)] add-classifier $clas
#set the scheduler for the node. Must be changed to -shed [new $opt(sched)]
set bs_sched [new WimaxScheduler/BS]
$bs_sched set-default-modulation $default_modulation
$bs_sched set-contention-size 5
[$bstation set mac_(0)] set-scheduler $bs_sched

```



```
[$bstation set mac_(0)] set-channel 0
set wimaxctrl [new Agent/WimaxCtrl]
$wimaxctrl set-mac [$bstation set mac_(0)]
$ns attach-agent $bstation $wimaxctrl
```

```
Mac/802_16 set debug_ 1
set bstation2 [$ns node 2.0.0]
$bstation2 random-motion 0
puts "Base-Station node created"
#provide some co-ord (fixed) to base station node
$bstation2 set X_ 3000.0
$bstation2 set Y_ 1000.0
$bstation2 set Z_ 0.0
set clas2 [new SDUClassifier/Dest]
[$bstation2 set mac_(0)] add-classifier $clas2
#set the scheduler for the node. Must be changed to -shed [new $opt(sched)]
set bs_sched2 [new WimaxScheduler/BS]
$bs_sched2 set-default-modulation $default_modulation
#$bs_sched2 set-contention-size [expr $contention_size]
[$bstation2 set mac_(0)] set-scheduler $bs_sched2
[$bstation2 set mac_(0)] set-channel 2
set wimaxctrl2 [new Agent/WimaxCtrl]
$wimaxctrl2 set-mac [$bstation2 set mac_(0)]
$ns attach-agent $bstation2 $wimaxctrl2
```

```
#Add neighbor information to the BSs
```

```
$wimaxctrl add-neighbor [$bstation2 set mac_(0)] $bstation2
```

```
$wimaxctrl2 add-neighbor [$bstation set mac_(0)] $bstation
```

```
# creation of the mobile nodes
```

```
$ns node-config -wiredRouting OFF \
```

```
    -macTrace ON                                ;# Mobile nodes cannot do routing.
```

```
#create 1 node in each cell to init cells
```

```
if {$other_node == 1} {
```

```
Mac/802_16 set debug_ 1
```

```
set m_node_(0) [$ns node 1.0.1]                ;# create the node with given @.
```

```
$m_node_(0) random-motion 0                    ;# disable random motion
```

```
$m_node_(0) base-station [AddrParams addr2id [$bstation node-addr]] ;#attach mn to basestation
```

```
$m_node_(0) set X_ [expr 1000.0]
```

```
$m_node_(0) set Y_ 1000.0
```

```
$m_node_(0) set Z_ 0.0
```

```
set clas [new SDUClassifier/Dest]
```

```
[$m_node_(0) set mac_(0)] add-classifier $clas
```

```
#set the scheduler for the node. Must be changed to -shed [new $opt(sched)]
```

```
set ss_sched [new WimaxScheduler/SS]
```

```
[$m_node_(0) set mac_(0)] set-scheduler $ss_sched
```

```
[$m_node_(0) set mac_(0)] set-channel 0
```

```
set nd_mn [$m_node_(0) install-nd]
```

```
Mac/802_16 set debug_ 1
```

```
set m_node_(1) [$ns node 2.0.1]                ;# create the node with given @.
```

```

$m_node_(1) random-motion 0                ;# disable random motion

$m_node_(1) base-station [AddrParams addr2id [$bstation2 node-addr]] ;#attach mn to basestation

$m_node_(1) set X_ [expr 3100.0]

$m_node_(1) set Y_ 1000.0

$m_node_(1) set Z_ 0.0

set clas [new SDUClassifier/Dest]

[$m_node_(1) set mac_(0)] add-classifier $clas

#set the scheduler for the node. Must be changed to -shed [new $opt(sched)]

set ss_sched [new WimaxScheduler/SS]

[$m_node_(1) set mac_(0)] set-scheduler $ss_sched

[$m_node_(1) set mac_(0)] set-channel 2

set nd_mn [$m_node_(1) install-nd]

}

Mac/802_16 set debug_ 1

for {set i 0} {$i < $nb_mn} {incr i} {
    set wl_node_($i) [$ns node 1.0.[expr $i + 2]] ;# create the node with given @.
    $wl_node_($i) random-motion 0                ;# disable random motion
    $wl_node_($i) base-station [AddrParams addr2id [$bstation node-addr]] ;#attach mn to basestation
    #compute position of the nod
    if {$i == 0} {
        set tmp [$move value]
        for {set j 0} {$j < $seed} {incr j} {
            set tmp [$move value]
        }
        #puts "start at $tmp"
    }
}

```

```

$wl_node_($i) set X_ [expr 1900.0]

$ns at $tmp "$wl_node_($i) setdest 2200.0 1000.0 20.0" ;#100 to get out of cell 2
} else {
    $wl_node_($i) set X_ [expr 55.0]
}
$wl_node_($i) set Y_ 1000.0
$wl_node_($i) set Z_ 0.0
puts "wireless node $i created ..." ;# debug info

set clas [new SDUClassifier/Dest]
[$wl_node_($i) set mac_(0)] add-classifier $clas
#set the scheduler for the node. Must be changed to -shed [new $opt(sched)]
set ss_sched [new WimaxScheduler/SS]
[$wl_node_($i) set mac_(0)] set-scheduler $ss_sched
[$wl_node_($i) set mac_(0)] set-channel 0
if {$i == 0} {
    #ns at $scan_time "$ss_sched send-scan"
}

set nd_mn [$wl_node_($i) install-nd]
# install interface manager into multi-interface node and CN
set handover [new Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6/Handover/Handover1]
$wl_node_($i) install-ifmanager $handover
$nd_mn set-ifmanager $handover
$nd_mn set-ifmanager $handover
$handover nd_mac $nd_mn [$wl_node_($i) set mac_(0)] ;#to know how to send RS

```

```

# install MIH in mobile node

set mih [$w1_node_($i) install-mih]

$handover connect-mih $mih ;#create connection between MIH and iface management

set tmp2 [$w1_node_($i) set mac_(0)]

$tmp2 mih $mih

$mih add-mac $tmp2

##configure traffic

set udpvideo_($i) [new Agent/UDP]
$udpvideo_($i) set packetSize_ 1240

set udpvoice1_($i) [new Agent/UDP]
$udpvoice1_($i) set packetSize_ 1500
set udpvoice2_($i) [new Agent/UDP]
$udpvoice2_($i) set packetSize_ 1500

#create video traffic

set cbrvideo_($i) [new Application/Traffic/CBR]
$cbrvideo_($i) set packetSize_ 4960
$cbrvideo_($i) set interval_ 0.1
$cbrvideo_($i) attach-agent $udpvideo_($i)
set nullvideo_($i) [new Agent/Null]

#sinkNode is transmitter

$ns attach-agent $sinkNode $udpvideo_($i)

```

```

$ns attach-agent $w1_node_($i) $nullvideo_($i)

if {$use_video == 1} {
    $handover add-flow $nullvideo_($i) $sudpvideo_($i) $w1_node_($i) 1 20.
}

#create voice traffic

set cbrvoice1_($i) [new Application/Traffic/CBR]
$cbrvoice1_($i) set packetSize_ 160
$cbrvoice1_($i) set interval_ 0.02
$cbrvoice1_($i) attach-agent $sudpvoice1_($i)
set nullvoice1_($i) [new Agent/Null]
$ns attach-agent $sinkNode $sudpvoice1_($i)
$ns attach-agent $w1_node_($i) $nullvoice1_($i)
# $ifmgmt add-flow $nullvoice1_($i) $sudpvoice1_($i) $w1_node_($i) 1 ;#2000.

#second voice flow
set cbrvoice2_($i) [new Application/Traffic/CBR]
$cbrvoice2_($i) set packetSize_ 160
$cbrvoice2_($i) set interval_ 0.02
$cbrvoice2_($i) attach-agent $sudpvoice2_($i)
set nullvoice2_($i) [new Agent/Null]
$ns attach-agent $sinkNode $nullvoice2_($i)
$ns attach-agent $w1_node_($i) $sudpvoice2_($i)
if {$use_voice == 1} {
    $handover add-flow $sudpvoice2_($i) $nullvoice2_($i) $w1_node_($i) 1 ;#2000.
}

```

```

}

# install MIH in BS
set mih [$bstation install-mih]
set tmp_bs [$bstation set mac_(0)]
$tmp_bs mih $mih
$mih add-mac $tmp_bs

set mih [$bstation2 install-mih]
set tmp_bs [$bstation2 set mac_(0)]
$tmp_bs mih $mih
$mih add-mac $tmp_bs

# create the link between sink node and base station
$ns duplex-link $sinkNode $router 100Mb 30ms DropTail
$ns duplex-link $router $bstation 100Mb 15ms DropTail
$ns duplex-link $router $bstation2 100Mb 15ms DropTail

# ND in wireless lan
set nd_bs [$bstation install-nd]
$nd_bs set-router TRUE
$nd_bs router-lifetime 1800
$ns at 1 "$nd_bs start-ra"
set nd_bs [$bstation2 install-nd]
$nd_bs set-router TRUE
$nd_bs router-lifetime 1800
$ns at 1 "$nd_bs start-ra"

```

```

# Interface manager in sink node

set ifmgmt_cn [$sinkNode install-default-ifmanager]

# Traffic scenario: here the all start talking at the same time
for {set i 0} {$i < $nb_mn} {incr i} {
  if {$use_video == 1} {
    $ns at $traffic_start "$cbrvideo_($i) start"
    $ns at $traffic_stop "$cbrvideo_($i) stop"
  }
  if {$use_voice == 1} {
    $ns at $traffic_start "$cbrvoice1_($i) start"
    $ns at $traffic_stop "$cbrvoice1_($i) stop"
    $ns at $traffic_start "$cbrvoice2_($i) start"
    $ns at $traffic_stop "$cbrvoice2_($i) stop"
  }
}

$ns at $simulation_stop "finish"

puts "Running simulation for $nb_mn mobile nodes..."
$ns run
puts "Simulation done."

```

Throughput



```

BEGIN {
fromNode1=1; toNode1=5;
fromNode2=0; toNode2=1;
src1 = "0.0.0.0"; dst1 = "3.0.1.0";
src2 = "0.0.0.0"; dst2 = "3.0.1.0";
lineCount1 = 0;totalBits1 = 0;
lineCount2 = 0;totalBits2 = 0;
}
/^r/ && $3==fromNode1 && $4==toNode1 && $9==src1 && $10==dst1 {
    totalBits1 += 8*$6;
if ( lineCount1==0 ) {
timeBegin1 = $2; lineCount1++;
} else {
timeEnd1 = $2;
};
};
/^r/ && $3==fromNode2 && $4==toNode2 && $9==src2 && $10==dst2 {
    totalBits2 += 8*$6;
if ( lineCount2==0 ) {
timeBegin2 = $2; lineCount2++;
} else {
timeEnd2 = $2;
};
};
END{
duration = timeEnd1-timeBegin1;
print "Transmission: source" src1 "->Destination" dst1;
}

```

```

print " - Total transmitted bits =" totalBits1 " bits";
print " - duration =" duration "s" ;
print " - Throughput =" totalBits1/duration/1e3 " kbps.";

duration = timeEnd2-timeBegin2;
print "Transmission: source" src2 "->Destination" dst2;
print " - Total transmitted bits =" totalBits2 " bits";
print " - duration =" duration " s";
print " - Throughput =" totalBits2/duration/1e3 "kbps.";
};

```

Packet Loss

```
#!/bin/bash
```

```
#global variables
```

```
NB_RUN=10
```

```
run_packet_loss()
```

```
{
```

```
    RECV=`grep "cbr" out.res | grep ^r | grep "MAC" | grep "Hs 6" | awk
'BEGIN{i=0}{i++}END{print i}'`
```

```
    echo $RECV
```

```
    RECV2=`grep "cbr" out.res | grep ^r | grep "MAC" | grep "Hs 4" | awk
'BEGIN{i=0}{i++}END{print i}'`
```

```
    echo $RECV2
```

```
RECV3=`echo $RECV + $RECV2 | bc`
```

```
SEND=`grep "0 1 cbr" out.res | grep ^+ | awk 'BEGIN{i=0}{i++}END{print i}'`
```

```
echo $SEND
```

```
LOST=`echo $LOST $RECV3 $SEND | awk '{print $1+$3-$2}'`
```

```
TMP=`echo $RECV3 $SEND | awk '{print $2-$1}'`
```

```
echo "lost=" $TMP
```

```
}
```

Πανεπιστήμιο Πειραιώς