



# Τμήμα Πληροφορικής

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα  
«Προηγμένα Συστήματα Πληροφορικής»

## Μεταπτυχιακή Διατριβή

Τίτλος μεταπτυχιακής διατριβής	Κάθετη διαπομπή στο LTE, LTE Vertical Handover
Όνοματεπώνυμο φοιτητή	Αχιλλέας Κωφός
Πατρώνυμο	Νικόλαος
Αριθμός Μητρώου	ΜΠΣΠ12035
Επιβλέπων	κ. Χρήστος Δουληγέρης

Ιούλιος 2017

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση της σηματοδότησης της κάθετης διαπομπής στο LTE. Στην κάθετη διαπομπή έχουμε εναλλαγή μεταξύ ετερογενών τεχνολογιών πρόσβασης ασύρματου δικτύου, στην συγκεκριμένη περίπτωση αφορά το WLAN και το WiMAX.

Αναλύονται για το LTE, το WiMAX και το WLAN τα χαρακτηριστικά τους, η αρχιτεκτονική και τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν. Αναλύεται η διαδικασία του handover, παρουσιάζονται οι κατηγορίες του handover και όλες οι φάσεις που πρέπει να διανυθούν μέχρι την ολοκλήρωσή του. Εξετάζονται δύο διαδικασίες κάθετης διαπομπής αυτή μέσω του Evolved Packet Core (EPC) και αυτή μέσω Media Independent Handover (MIH).

Ακολουθεί η λεπτομερής περιγραφή της ροής των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται σε επίπεδο σηματοδότησης για την επίτευξη της κάθετης διαπομπής LTE-WLAN και LTE-WiMAX και για τις δύο τεχνικές. Τέλος, παρατίθενται προτάσεις μελλοντικών επεκτάσεων.

## ABSTRACT

Thesis in hand aims to present and analyze vertical handover signaling to LTE. In vertical handover we switch between heterogeneous wireless network access technologies, in this case it concerns WLAN and WiMAX.

An extensive analysis is written for LTE, WiMAX and WLAN, their features, the architecture and the protocols they use. The handover process is analyzed, also the handover categories and all phases of handover procedure are presented. Two vertical handover procedures are examined, one is through the Evolved Packet Core (EPC) and the other is Media Independent Handover (MIH).

The main objective is to present, and analyze the flow of messages that are exchanged at signaling level to achieve vertical handover between LTE-WLAN and LTE-WiMAX for both EPC and MIH handover techniques. Finally, proposals on future evolution are brought forward.

## Περιεχόμενα

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	3
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ.....	4
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
2. LTE.....	8
2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ LTE .....	11
2.2 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ .....	20
2.2.1 Evolved Packet Core.....	21
2.2.2 Αρχιτεκτονική Evolved 3GPP Network.....	23
2.2.3 Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) .....	25
3. WIMAX .....	26
3.1 Χαρακτηριστικά του WiMAX.....	28
3.2 Αρχιτεκτονική του WiMAX.....	30
4. WLAN .....	35
4.1 Αρχιτεκτονική για τη διασύνδεση WLAN με LTE .....	36
5. Διαπομπή (Handover).....	40
5.1 Κατηγορίες Διαπομπής.....	41
5.2 Φάσεις Διαπομπής.....	45
6. EPC Vertical Handover .....	46
6.1 Βελτιστοποιημένη Αρχιτεκτονική VHO μεταξύ WiMAX και 3GPP Access .....	49
6.2 Vertical Handover Signaling μέσω EPC.....	51
6.2.1 VHO signaling μεταξύ LTE και WiMAX με χρήση FPMIP.....	51
6.2.2 VHO signaling μεταξύ LTE και WLAN Access Networks .....	54
7. MIH Vertical Handover.....	59
7.1. Mobile IP .....	60
7.2 Αρχιτεκτονική MIH Vertical Handover.....	63
7.3 MIH Vertical Handover Signaling .....	69
7.3.1 MIH Vertical Handover Signaling μεταξύ LTE και WiMAX .....	70
7.3.2 MIH Vertical Handover Signaling μεταξύ LTE και WLAN .....	72
8. Συμπεράσματα.....	76

Αναφορές.....	77
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Κώδικας Προσομοίωσης NS3 .....	79

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 : Εξέλιξη του LTE.....	8
Εικόνα 2: FDD και TDD.....	12
Εικόνα 3 : Συνάθροιση φορέα – FDD.....	14
Εικόνα 4 : Συνάθροιση φορέα στην ίδια και σε διαφορετική ζώνη συχνοτήτων.....	15
Εικόνα 5 : Συνάθροιση φορέα με κυψέλες εξυπηρέτησης.....	15
Εικόνα 6 : MIMO.....	16
Εικόνα 7 : Σύνδεση του Relay Node με το DeNB.....	17
Εικόνα 8 : Downlink Comp α) Μεικτή μετάδοση β) Δυναμική επιλογή σημείων.....	18
Εικόνα 9 : Μοντέλο αναφοράς του LTE.....	19
Εικόνα 10 : Core-network (EPC) architecture.....	20
Εικόνα 11 : Αρχιτεκτονική του 3GPP Evolved Packet Core.....	22
Εικόνα 12 : Αρχιτεκτονική του E-UTRAN.....	24
Εικόνα 13 : Point-to-multipoint WiMAX εφαρμογές.....	25
Εικόνα 14 : Αρχιτεκτονική δικτύου του Mobile WiMAX.....	29
Εικόνα 15 : Mobile WiMAX authentication framework.....	30
Εικόνα 16 : Mobile WiMAX PCC Αρχιτεκτονική.....	31
Εικόνα 17 : Ενοποιημένη αρχιτεκτονική δικτύου για mobile WiMAX και 3GPP.....	32
Εικόνα 18: Αρχιτεκτονική διασύνδεσης με μη αξιόπιστο WLAN.....	35
Εικόνα 19 : Αρχιτεκτονική για πρόσβαση του Trusted WLAN στο EPC.....	36
Εικόνα 20 : Trusted WLAN Access Network.....	37
Εικόνα 21 : Vertical και Horizontal Handover.....	39
Εικόνα 22 : Upward και Downward handover.....	40
Εικόνα 23 : Hard και Soft handover.....	41
Εικόνα 24 : Αρχιτεκτονική για την ενσωμάτωση του WiMAX στο EPC.....	43
Εικόνα 25 : WiMAX αρχική είσοδος στο δίκτυο μέσω EPC.....	45
Εικόνα 26: Διασύνδεση δικτύου μεταξύ mobile WiMAX και 3GPP UTRAN.....	47
Εικόνα 27: Ροή σηματοδότησης VHO από LTE σε WiMAX.....	50
Εικόνα 28 : Handover από WLAN σε LTE με PMIPv6.....	53
Εικόνα 29: Key mobility-enabling entities in IP.....	58
Εικόνα 30: Media independent handover operation.....	61
Εικόνα 31: Μοντέλο αναφοράς του MIHF.....	62
Εικόνα 32: Αρχιτεκτονική ετερογενούς δικτύου.....	63
Εικόνα 33: WI-Fi/WiMAX αρχιτεκτονική για την PoA/PoS προσέγγιση.....	67
Εικόνα 34: WI-Fi/WiMAX αρχιτεκτονική MIH.....	68
Εικόνα 35: MIH handover from LTE to WiMAX.....	69
Εικόνα 36: MIH handover from LTE to WLAN.....	72

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ

GSM	Global System for Mobile Communications
GPRS	General Packet Radio Service
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
CDMA	Code Division Multiple Access
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
OSI	Open System Interconnection
WLAN	Wireless Local Area Network
Wi-Fi	Wireless Fidelity
AP	Access Point
WAG	Wireless Access Gateway
BSS	Basic Service Set
IBSS	Independent Basic Service Set
DS	Distribution System
ESS	Extended Service Set
ePDG	Evolved Packet Data Gateway
LLC	Logical Link Control
MAC	Media Access Control
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
LOS	Line of Sight
NLOS	Non- Line of Sight
SS	Subscriber Stations
MS	Mobile Stations
ASN	Access Service Network
BS	Base Stations
ASN-GW	Access Service Network –Gateway
CSN	Connectivity Service Network
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
MIMO	Multiple Inputs Multiple Outputs
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
LTE	Long Term Evolution

EPS	Evolved Packet System
EPC	Evolved Packet Core
E-UTRAN	Evolved Urban Terrestrial Access Network
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
MN	Mobile Node
eNB	eNodeB
CN	Correspondent Node
HSS	Home Subscriber Server
PDN-GW	Packet Data Network Gateway
S-GW	Serving Gateway
MME	Mobility Management Entity
PCRF	Policy and Charging Rules Function
PCEF	Policy and Charging Event Function
BBERF	Bearer Binding and Event Reporting Function
TDF	Traffic Detection Function
UDR	User Data Repository
OCS	Online Charging System
OFCS	Offline Charging System
AF	Application Function
PCC	Policy and Charging Control
QoS	Quality of Service
MIH	Media Independent Handover
PoA	Point of Access
PoS	Point of Service
MIHF	MIH Function
MIES	Media Independent Event Service
MICS	Media Independent Command Service
MIIS	Media Independent Information Service

MIP	Mobile Internet Protocol
HA	Home Agent
CoA	Care of Address
FACoA	Foreign Agent Care of Address
HMIP	Hierarchical Mobile IP
LCoA	On Link Care of Address
RCoA	Regional Care of Address
PMIP	Proxy Mobile IP
MAG	Mobile Access Gateway
LMA	Local Mobility Anchor
FMIP	Fast Mobile IP
FPMIP	Fast Proxy Mobile IP
PBU	Proxy Binding Update
PBA	Proxy Binding Acknowledgement
ANDSF	Access Network Discovery and Selection Function
FAF	Forwarding Attachment Function

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη σύγχρονη εποχή οι χρήστες ασύρματων συσκευών έχουν αυξημένες απαιτήσεις για περισσότερη ευχρηστία, δυνατότητα κινητικότητας και μεγαλύτερες ταχύτητες. Έπρεπε να βρεθεί μια αξιόπιστη λύση που να επιτρέπει στις ασύρματες συσκευές να χρησιμοποιούν οποιοδήποτε δίκτυο ήταν στην εμβέλεια μιας συσκευής έτσι ώστε να υπάρχει επαρκής κάλυψη δικτύου και ποιοτικότερες υπηρεσίες. Το πρότυπο IEEE 802.21 είναι ένα σημαντικό βήμα που επιτρέπει σε κινητές συσκευές να κάνουν επιτυχημένη διαπομπή (handover) μεταξύ δικτύων διαφορετικών τεχνολογιών, όπως το **WiMAX**, το **Wi-Fi**, το **LTE**.

Η πιο συνηθισμένη μορφή handover είναι όταν ένα κινητό τηλέφωνο το οποίο μετακινείται, δρομολογείται από την τρέχουσα κυψέλη με την οποία επικοινωνεί σε μια καινούργια. Αυτό υπό κανονικές συνθήκες συμβαίνει όταν γίνει αντιληπτό ότι εξασθενεί το σήμα και χρειάζεται να γίνει η μετάβαση σε άλλη κεραία με ισχυρότερο σήμα στο συγκεκριμένο χώρο. Αν το handover εκτελείται μεταξύ της ίδιας τεχνολογίας για παράδειγμα σε ένα WLAN δίκτυο, τότε έχουμε το λεγόμενο horizontal handover. Αν συμπεριλαμβάνει διαφορετικές τεχνολογίες, για παράδειγμα, μεταξύ LTE και WiMAX τότε ονομάζεται vertical handover.

Σε αυτή την εργασία θα αναλυθεί η διαδικασία του LTE vertical handover signaling και θα αξιολογηθούν οι 2 κυριότερες τεχνικές που ακολουθούνται το EPC vertical handover και το MIH vertical handover.

Η δομή της εργασίας είναι η ακόλουθη. Στο κεφάλαιο 2 αναλύεται το LTE, τα χαρακτηριστικά του, η αρχιτεκτονική και τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιεί. Στο κεφάλαιο 3 γίνεται μια εκτενής αναφορά στο WiMAX και την αρχιτεκτονική του και στο κεφάλαιο 4 αναλύεται αντίστοιχα το WLAN και πως διασυνδέεται με το LTE. Στο κεφάλαιο 5 αναλύεται η διαδικασία του handover, παρουσιάζονται οι κατηγορίες του handover και όλες οι φάσεις που πρέπει να διανυθούν μέχρι την ολοκλήρωσή του. Το vertical handover μέσω EPC παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 6 στο οποίο αναλύεται μια βελτιστοποιημένη τεχνική handover μεταξύ WiMAX και 3GPP access και ακολούθως παρουσιάζεται όλη η αρχιτεκτονική και το signaling για handover LTE και WiMAX με χρήση FPMIP καθώς και LTE με WLAN Access Networks. Στο κεφάλαιο 7 που αφορά το vertical handover μέσω MIH, αναλύονται οι νεότερες εκδόσεις για mobile IP και στη συνέχεια ακολουθούν οι αρχιτεκτονικές και το signaling για MIH Vertical Handover Signaling μεταξύ LTE και WiMAX και MIH Vertical Handover Signaling μεταξύ LTE και WLAN. Ακολουθούν τα συμπεράσματα στο κεφάλαιο 8.



## 2. LTE

Το LTE [1] αποτελεί πρότυπο για την ασύρματη επικοινωνία και εξέλιξη του GSM/UMTS. Η πρώτη φάση της εξέλιξης του LTE από το 3GPP ήταν να ορίσει μια σειρά επιδόσεων και ικανοτήτων σαν στόχους για το LTE. Σε αυτό περιλαμβάνονταν στόχοι για τον ανώτατο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, τη φασματική απόδοση, τον έλεγχο της λανθάνουσας κατάστασης και την καλύτερη απόδοση για το σύστημα και τον χρήστη. Επιπλέον, καθορίστηκαν οι απαιτήσεις για την ευελιξία του ραδιοφάσματος, καθώς και για την αλληλεπίδραση / συμβατότητα με άλλες 3GPP τεχνολογίες ράδιο-πρόσβασης (GSM, WCDMA / HSPA και TD-SCDMA).

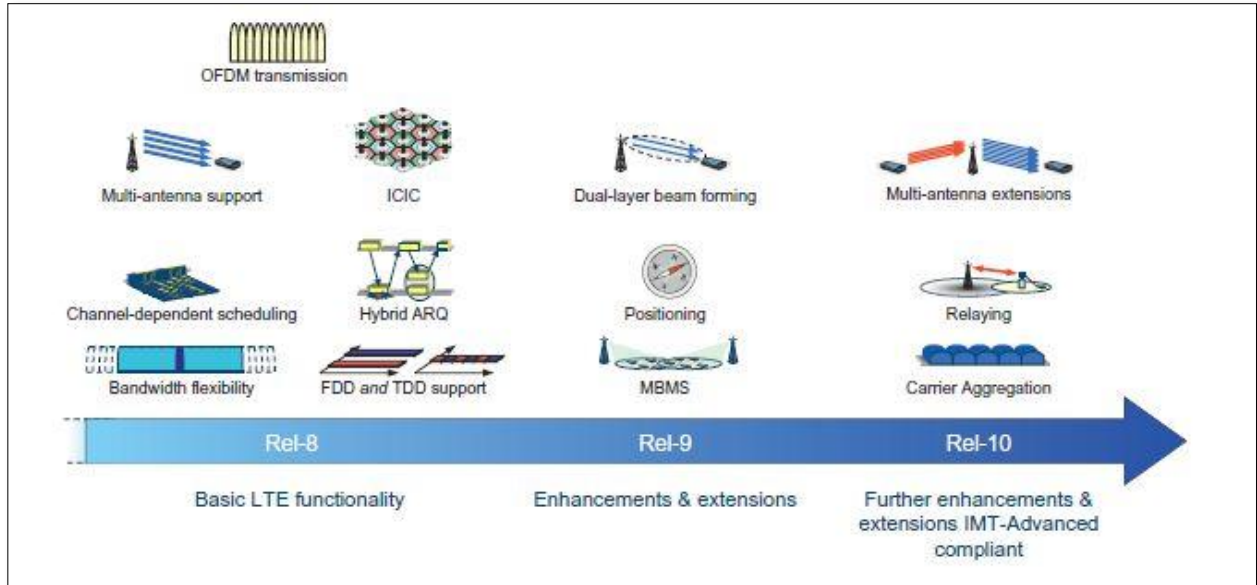
Ο στόχος του LTE είναι να αυξήσει τη χωρητικότητα και τη ταχύτητα των υφιστάμενων δικτύων με τη χρησιμοποίηση καινοτόμων τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας και διαμόρφωσης σήματος. Λειτουργεί σε διαφορετικό εύρος ζώνης συχνοτήτων καθώς η διεπαφή του δεν είναι συμβατή με τα υφιστάμενα δίκτυα 2ης και 3ης γενιάς.

Το LTE προτάθηκε για πρώτη φορά στην Ιαπωνία το 2004. Το πρότυπο οριστικοποιήθηκε το 2008 και τα πρώτα δίκτυα στο κόσμο που εγκαταστάθηκαν για δημόσια χρήση, ήταν στο Όσλο και τη Στοκχόλμη από την εταιρεία TeliaSonera, τον Δεκέμβρη του 2009. Τα πρώτα εμπορικά διαθέσιμα LTE smartphone που κυκλοφόρησαν ήταν τα Samsung Galaxy Indulge (από τη MetroPCS) και HTC Thunderbolt για την αγορά της Β. Αμερικής. Αρχικώς, οι διαχειριστές των δικτύων CDMA είχαν σχεδιάσει να αναβαθμίσουν τα συστήματά τους σε μια ανταγωνιστική τεχνολογία ονόματι UMB, ωστόσο όλες οι μεγάλες εταιρείες κινητής τηλεφωνίας αποφάσισαν να συνεχίσουν με το LTE. Η εξέλιξη του LTE είναι το LTE Advanced, το οποίο προτυποποιήθηκε το Μάρτιο του 2011.

Το πρότυπο του LTE από την έκδοση 10 και μετά [2] είναι σχεδιασμένο ώστε να παρέχει ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων στη καθοδική ζεύξη (downlink) της τάξης των 3 Gbps και στην ανοδική (uplink) μέχρι και 1.5 Gbps. Το εύρος ζώνης του φέροντος σήματος είναι μεταβλητό, κυμαινόμενο από τα 1.4 έως τα 20 MHz και υποστηρίζονται τόσο η πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDD) όσο και η πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDD). Η αρχιτεκτονική του δικτύου βασίζεται σε μια απλοποιημένη μορφή αρχιτεκτονικής IP, το Evolved Packet Core (EPC), το οποίο σχεδιάστηκε για να αντικαταστήσει το GPRS Core Network και υποστηρίζει την απρόσκοπτη μετάδοση τόσο δεδομένων όσο και φωνής ακόμα και σε δίκτυα με παλαιότερη τεχνολογία δικτύου (GSM, UMTS, CDMA2000). Η απλούστερη αρχιτεκτονική αποσκοπεί σε χαμηλότερα λειτουργικά έξοδα.

Οι νεότερες εκδόσεις του LTE από την έκδοση 10 και μετά ονομάζονται συχνότερα ως LTE Advanced [1]. Ο κύριος λόγος για την περαιτέρω εξέλιξη του LTE σε LTE Advanced ήταν η ανάγκη να παρέχουμε υψηλότερα bitrates με οικονομικά αποδοτικό τρόπο και επιπλέον να

ανταποκρίνεται πλήρως το πρότυπο στις απαιτήσεις που καθορίζονται από την ITU για τα δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G).



Εικόνα 1: Εξέλιξη του LTE [1]

Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά και οι καινοτομίες που έφεραν οι εκδόσεις του 3GPP [3] από την έκδοση 8 έως την έκδοση 12:

**Έκδοση 8:** Εισήγαγε για πρώτη φορά το LTE, ένα εντελώς νέο interface ραδιοσυχνοτήτων και δίκτυο κορμού, επιτρέποντας την ουσιαστικά βελτιωμένη απόδοση των δεδομένων σε σχέση με τα προηγούμενα συστήματα. Τα κυριότερα στοιχεία του είναι:

- έως και 300Mbit/s downlink και uplink 75Mbit/s
- λανθάνουσα κατάσταση μέχρι 10ms
- εφαρμογή σε εύρος ζώνης της τάξης του 1,4, 3, 5, 10, 15 ή 20 MHz, για να καταστεί δυνατή για διάφορα σενάρια ανάπτυξης
- ορθογώνια περιοχή συχνοτήτων πολλαπλής πρόσβασης (OFDMA) downlink
- πολλαπλή πρόσβαση σε πεδίο συχνοτήτων μονής φέρουσας(SC-FDMA) uplink
- κεραιές πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO)
- επίπεδη αρχιτεκτονική ραδιο-δικτύου, χωρίς να ισοδυναμεί με το BSC GSM ή UMTS RNC, και η λειτουργικότητα κατανέμεται μεταξύ των σταθμών βάσης (eNodeBs)
- all IP δικτύου κορμού και System Architecture Evolution(SAE)

**Έκδοση 9:** Έφερε μια σειρά από βελτιώσεις σε χαρακτηριστικά που εισάγονται στην 8η έκδοση, μαζί με τις νέες εξελίξεις στην αρχιτεκτονική του δικτύου και τα νέα χαρακτηριστικά της υπηρεσίας. Αυτές περιελάμβαναν:

- εισαγωγή του LTE femtocells με τη μορφή του Home eNodeB (HeNB)
- αυτο οργάνωση των χαρακτηριστικών του δικτύου (SON), όπως η βελτιστοποίηση του καναλιού τυχαίας προσπέλασης
- εξελιγμένη μετάδοση πολυμέσων και πολυεκπομπής (eMBMS) για την αποτελεσματική παροχή του ίδιου πολυμεσικού περιεχομένου σε πολλούς προορισμούς.
- υπηρεσίες εντοπισμού θέσης (LCS) για τον εντοπισμό της θέσης μιας κινητής συσκευής

**Έκδοση 10:** Παρέχει μια σημαντική βελτίωση στη χωρητικότητα και τη δυναμικότητα του συστήματος LTE και έλαβε επίσης μέτρα για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος για φορητές συσκευές που βρίσκονται σε κάποια απόσταση από το σταθμό βάσης. Αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά περιλαμβάνονται:

- μέχρι 3Gbit/s downlink και uplink 1.5Gbit/s
- συνάθροιση φορέα (CA), που επιτρέπει τον συνδυασμό έως πέντε ξεχωριστών φορέων για να επιτύχουν εύρος ζώνης έως και 100MHz
- ανώτερης τάξης διαμόρφωση κεραιών MIMO έως 8×8 downlink και 4×4 uplink
- κόμβοι αναμετάδοσης (relay nodes) για να υποστηρίξουν ετερογενή δίκτυα (HetNets) που περιέχουν μία ευρεία ποικιλία μεγεθών των κυψελών
- ενισχυμένη συνεργασία μεταξύ των κυττάρων (eICIC) για να βελτιωθούν οι επιδόσεις στις άκρες των κυψελών.

**Έκδοση 11:** Βασίζεται στην πλατφόρμα της έκδοσης 10 με μια σειρά από βελτιώσεις στις υπάρχουσες δυνατότητες, όπως οι εξής:

- βελτιώσεις στο carrier aggregation, MIMO, στους κόμβους αναμετάδοσης και στο eICIC
- εισαγωγή νέων συχνοτήτων
- συντονισμένη μετάδοση και λήψη πολλαπλών σημείων για να καταστεί δυνατή η ταυτόχρονη επικοινωνία με προηγμένους δέκτες πολλαπλών κυψελών.

**Έκδοση 12:** Δημιουργήθηκε για να υποστηριχθεί η ταχεία ανάπτυξη της χρήσης των δεδομένων από κινητές συσκευές, αλλά και άλλα στοιχεία που περιλαμβάνουν την αποτελεσματική

υποστήριξη διαφορετικών εφαρμογών, διασφαλίζοντας παράλληλα υψηλής ποιότητας εμπειρία χρήστη. Μερικά από τα χαρακτηριστικά είναι:

- ενισχυμένα μικρά κελιά για το LTE, εισάγοντας μια σειρά από χαρακτηριστικά για τη βελτίωση της υποστήριξης των HetNets
- συνάθροιση φορέα διαφορετικών τοποθεσιών, για να αναμίξει και να ταιριάζει τις δυνατότητες των γειτονικών κυψελών
- νέες τεχνικές κεραίας και προηγμένο δέκτη για να μεγιστοποιήσουν το δυναμικό των μεγάλων κυψελών
- αλληλεπίδραση μεταξύ των LTE και WiFi, WIMAX ή HSPDA
- περαιτέρω εξελίξεις των προηγούμενων τεχνολογιών.

## 2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ LTE

Το LTE είναι μια ευρυζωνική λύση για κινητά που προσφέρει ένα πλούσιο σύνολο χαρακτηριστικών με μεγάλη ευελιξία όσον αφορά τις επιλογές και τις δυνατότητες ανάπτυξης των προσφερόμενων υπηρεσιών. Ορισμένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά που αξίζουν επισήμανση είναι τα εξής:

**OFDM [1] για την υψηλή φασματική απόδοση είναι η βάση του φυσικού στρώματος:** OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) χρησιμοποιείται στην κατερχόμενη ζεύξη, προκειμένου να επιτευχθεί ανθεκτικότητα έναντι πολύδρομων παρεμβολών και συνεργασία με προηγμένες τεχνικές όπως πεδίο συχνοτήτων ανεξάρτητο από το προγραμματισμό των καναλιών επικοινωνίας και MIMO, ενώ Single-Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) χρησιμοποιείται στο uplink, προκειμένου να προσεγγίσει ένα χαμηλό Ratio Peak-to-Average Power (PAPR), να επιτύχει ορθογωνιότητα χρήστη στο πεδίο της συχνότητας, και την εφαρμογή πολλαπλών κεραιών. Το OFDM παρέχει πρόσβαση στο πεδίο των συχνοτήτων, επιτρέποντας έτσι ένα πρόσθετο βαθμό ελευθερίας στο προγραμματισμό εξαρτώμενο από το κανάλι σε σύγκριση με το χρόνο-προγραμματισμό που χρησιμοποιείται στα περισσότερα συστήματα 3G. Το ευέλικτο εύρος ζώνης μεταφοράς για την υποστήριξη της λειτουργίας σε φάσματα διαφορετικού μεγέθους εφαρμόζεται από το OFDM μεταβάλλοντας τον αριθμό των OFDM subcarriers που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση. Με το OFDM διευκολύνεται και η ταυτόχρονη μετάδοση της ίδιας πληροφορίας από διαφορετικούς σταθμούς βάσης (broadcast/multicast).

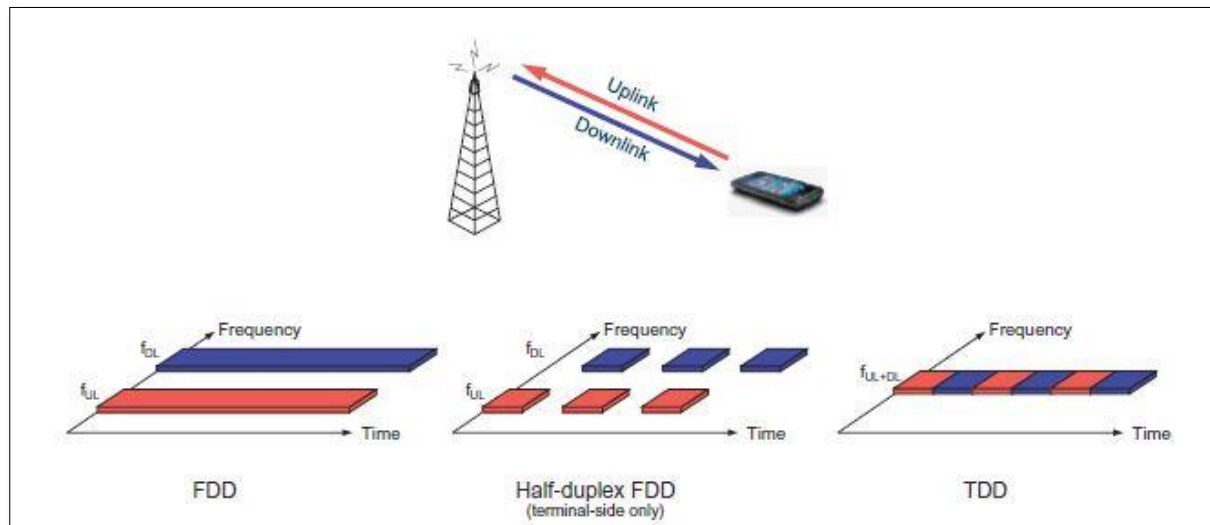
**Προγραμματισμός εξαρτώμενος από το κανάλι και προσαρμογή ρυθμού [1]:** Στον πυρήνα του συστήματος μετάδοσης του LTE είναι η χρήση της μετάδοσης κοινών καναλιών με τους συνολικούς πόρους σε χρόνο και συχνότητα να μοιράζονται δυναμικά μεταξύ των χρηστών. Η

χρήση κοινών καναλιών μετάδοσης ταιριάζει με τις ταχέως μεταβαλλόμενες απαιτήσεις των πόρων που τίθενται από την επικοινωνία πακέτων δεδομένων και επιτρέπει επίσης πολλές από τις άλλες βασικές τεχνολογίες στις οποίες βασίζεται LTE. Ο προγραμματιστής (scheduler) ελέγχει, για κάθε χρονική στιγμή, σε ποιους χρήστες πρέπει να ανατεθούν τα διάφορα μέρη των κοινόχρηστων πόρων. Ο προγραμματιστής καθορίζει επίσης την ταχύτητα δεδομένων που πρέπει να χρησιμοποιείται για κάθε μετάδοση. Έτσι, η προσαρμογή του ρυθμού, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μέρος της λειτουργικότητας προγραμματισμού. Ο προγραμματιστής είναι έτσι ένα βασικό στοιχείο και σε μεγάλο βαθμό καθορίζει την συνολική απόδοση του συστήματος, ιδιαίτερα σε ένα πολύ φορτωμένο δίκτυο. Τόσο οι downlink όσο και οι uplink μεταδόσεις υπόκεινται σε αυστηρό προγραμματισμό στο LTE.

**Συνεργασία μεταξύ γειτονικών κυψελών για αποφυγή παρεμβολών [1]:** Το LTE έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί με επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων σε μία κυψέλη, πράγμα που σημαίνει ότι οι ίδιοι πόροι χρόνου-συχνότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε γειτονικές κυψέλες. Ειδικότερα, τα βασικά κανάλια ελέγχου είναι σχεδιασμένα για να λειτουργήσουν σωστά και με τη σχετικά χαμηλό λόγο σήματος προς παρεμβολή που μπορεί να συμβεί σε μια υλοποίηση της επαναχρησιμοποίησης. Από μια άποψη το να υπάρχει πρόσβαση σε όλο το διαθέσιμο φάσμα σε κάθε κυψέλη και να υπάρχει η λειτουργία της επαναχρησιμοποίησης σε μία κυψέλη είναι πάντα θετικό. Ωστόσο, μπορεί επίσης να οδηγήσει σε σχετικά μεγάλες διακυμάνσεις στην αναλογία σήματος προς παρεμβολή, και επομένως και στις εφικτές τιμές του ρυθμού δεδομένων στην περιοχή που καλύπτει η κυψέλη με μόνο σχετικά χαμηλά ποσοστά ρυθμού δεδομένων να είναι διαθέσιμα στα σύνορα των κυψελών. Η απόδοση του συστήματος και κυρίως η ποιότητα επικοινωνίας στις άκρες της κυψέλης, μπορεί να ενισχυθεί περαιτέρω, επιτρέποντας συνεργασία στον προγραμματισμό μεταξύ των κυττάρων. Ο βασικός στόχος αυτής της συνεργασίας είναι, αν είναι δυνατόν, να αποφευχθεί ο προγραμματισμός ταυτόχρονων μεταδόσεων προς τις τερματικές συσκευές στα όρια της κυψέλης και από άλλες γειτονικές κυψέλες. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγουμε τις χειρότερες καταστάσεις παρεμβολής.

**Ευελιξία φάσματος [1]:** Ο υψηλός βαθμός ευελιξίας του ραδιοφάσματος είναι ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της τεχνολογίας ράδιο-πρόσβασης LTE. Ο στόχος αυτής της ευελιξίας του ραδιοφάσματος είναι να καταστεί δυνατή η ανάπτυξη της LTE ασύρματης πρόσβασης σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων με διαφορετικά χαρακτηριστικά, συμπεριλαμβανομένων των διαφορετικών ρυθμίσεων διπλής όψης και των διαφορετικών μεγεθών του διαθέσιμου φάσματος. Το LTE υποστηρίζει τόσο Time Division Duplexing (TDD) όσο και το Frequency Division Duplexing (FDD). Το TDD ευνοείται από την πλειοψηφία των εφαρμογών λόγω των πλεονεκτημάτων του: (1) η ευελιξία στην επιλογή uplink to downlink αναλογιών στο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (2) η ικανότητα να εκμεταλλεύεται την αμοιβαιότητα του καναλιού, (3) την ικανότητα να υλοποιηθεί σε μη αξιοποιήσιμο φάσμα και (4) λιγότερο σύνθετο σχέδιο πομποδέκτη. Το FDD όπως απεικονίζεται αριστερά στην Εικόνα 8, συνεπάγεται ότι το downlink και το uplink

λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικές, επαρκώς διαχωρισμένες ζώνες συχνοτήτων. Το TDD, όπως απεικονίζεται στα δεξιά στην Εικόνα 8, συνεπάγεται ότι το downlink και το uplink λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικές, μη επικαλυπτόμενες χρονοθυρίδες. Έτσι, το TDD μπορεί να λειτουργήσει σε ασύζευκτο φάσμα, ενώ το FDD απαιτεί ζεύγη φάσματος.



Εικόνα 2: FDD και TDD [1]

Ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό της ευελιξίας φάσματος του LTE είναι η δυνατότητα για διαφορετικού εύρους ζώνης μετάδοση και στις δύο κατευθύνσεις downlink και uplink. Ο κύριος λόγος για αυτό είναι ότι η ποσότητα του διαθέσιμου φάσματος για την ανάπτυξη του LTE μπορεί να διαφέρει σημαντικά μεταξύ των διαφόρων ζωνών συχνοτήτων και επίσης, ανάλογα με την ακριβή κατάσταση του χειριστή. Επιπλέον, η δυνατότητα λειτουργίας σε διαφορετικές κατανομές του φάσματος δίνει τη δυνατότητα για σταδιακή μετάβαση του φάσματος από άλλες τεχνολογίες ραδιο-πρόσβασης σε LTE.

**Υποστήριξη εύρεσης τοποθεσίας [1]:** Η υποστήριξη τοποθεσίας, όπως το όνομα υπονοεί, αναφέρεται στη λειτουργικότητα του ραδιο δικτύου πρόσβασης να προσδιορίζει τη θέση των επιμέρους τερματικών. Ο καθορισμός της θέσης ενός τερματικού μπορεί, κατ' αρχήν, να γίνει με ένα δέκτη GPS που περιλαμβάνεται στο τερματικό. Αν και αυτό είναι ένα πολύ κοινό χαρακτηριστικό, δεν είναι δεδομένο ότι όλα τα τερματικά περιλαμβάνουν τον αναγκαίο δέκτη και μπορεί να υπάρξουν περιπτώσεις κατά τις οποίες η υπηρεσία GPS δεν είναι διαθέσιμη. Ως εκ τούτου, το LTE εισάγει την υποστήριξη τοποθέτησης στο ασύρματο δίκτυο πρόσβασης. Μετρώντας ειδικά σήματα που μεταδίδονται τακτικά από διαφορετικές περιοχές κυψελών, η θέση του τερματικού μπορεί να προσδιοριστεί.

**Προσαρμοσμένη διαμόρφωση και κωδικοποίηση Adaptive Modulation and Coding (AMC)** [2]: Το LTE υποστηρίζει μια σειρά από διαμορφώσεις και Forward Error Correction (FEC) συστήματα κωδικοποίησης και επιτρέπει το σύστημα να αλλάξει ανά χρήστη και ανά πλαίσιο βάσης, με βάση τις συνθήκες του καναλιού. Το AMC είναι ένας αποτελεσματικός μηχανισμός για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης σε ένα κανάλι χρονικά μεταβαλλόμενο. Ο αλγόριθμος προσαρμογής απαιτεί τυπικά τη χρήση της υψηλότερης διαμόρφωσης και σύστημα κωδικοποίησης που μπορεί να υποστηρίζεται από το λόγο σήματος προς θόρυβο και το λόγο παρεμβολής στο δέκτη, έτσι ώστε κάθε χρήστης εφοδιάζεται με την υψηλότερη δυνατή ταχύτητα δεδομένων που μπορούν να υποστηριχθεί στις αντίστοιχες συνδέσεις.

**Κινητικότητα** [2]: Το E-UTRAN θα πρέπει να βελτιστοποιηθεί για τη χαμηλή ταχύτητα του κινητού από 0 έως 15km/h. Μια υψηλότερη ταχύτητα του κινητού μεταξύ 15 και 120 χλμ/ώρα θα πρέπει να υποστηρίζεται με υψηλή απόδοση. Η κινητικότητα σε όλο το κυψελοειδές δίκτυο πρέπει να διατηρείται σε ταχύτητες 120 έως 350 km / h (ή ακόμα και μέχρι 500 χιλιομέτρων / ώρα ανάλογα τη ζώνη συχνοτήτων).

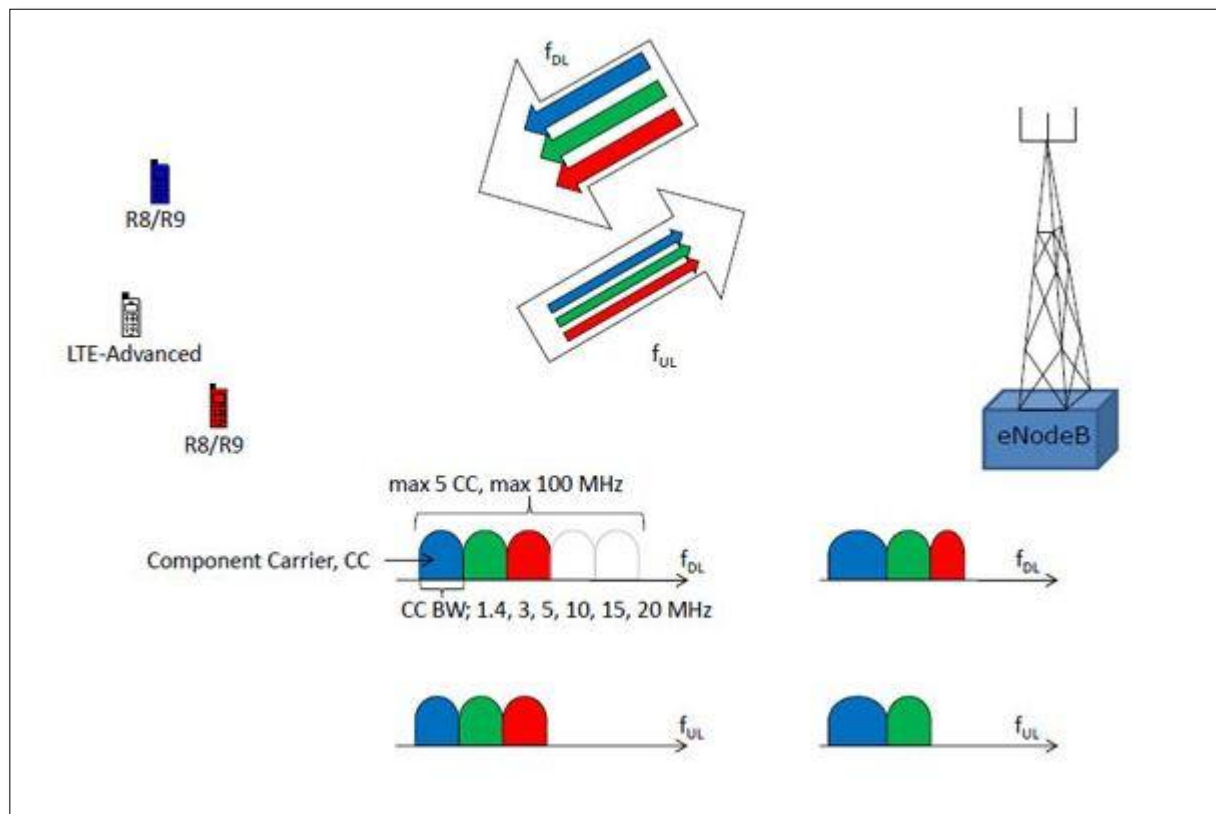
**Αναμεταδόσεις του Link Layer** [2]: Το LTE υποστηρίζει αυτόματη Αναμετάδοση Αιτήσεων Automatic Retransmission Requests (ARQ) στο link layer. Οι ARQ συνδέσεις απαιτούν κάθε εκπεμπόμενο πακέτων να αναγνωριστεί από τον δέκτη, τα πακέτα που δεν έχουν αναγνωριστεί θεωρούνται ότι έχουν χαθεί και αναμεταδίδονται. Το LTE επίσης προαιρετικά υποστηρίζει υβριδικό ARQ, το οποίο είναι ένα αποτελεσματικό υβρίδιο μεταξύ FEC και ARQ.

**Ταυτόχρονη υποστήριξη χρηστών** [2]: Το LTE παρέχει τη δυνατότητα να εκτελέσει δύο διαστάσεων προγραμματισμό των πόρων (σε χρόνο και συχνότητα), επιτρέποντας την υποστήριξη πολλών χρηστών σε μια χρονοθυρίδα, σε αντίθεση με την υπάρχουσα τεχνολογία 3G που εκτελεί μονοδιάστατο προγραμματισμό, που περιορίζει την υπηρεσία σε ένα χρήστη για κάθε φορά χρονοθυρίδα. Αυτή η ικανότητα του LTE έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη always-on εμπειρία και επίσης επιτρέπει τον πολλαπλασιασμό τω ενσωματωμένων ασύρματων εφαρμογών / συστημάτων.

**Ασφάλεια** [2]: Το LTE παρέχει αυξημένη ασφάλεια μέσω της εφαρμογής της UICC Subscriber Identity Module ( SIM) και των συνδεδεμένων, ισχυρή και μη επεμβατική αποθήκευση κλειδιών και έλεγχο ταυτότητας συμμετρικού κλειδιού όπου χρησιμοποιεί ιδιωτικά κλειδιά των 128 - bit . Το LTE ενσωματώνει επιπλέον ισχυρή αμοιβαία επαλήθευση ταυτότητας, προστασία της εμπιστευτικότητας για την ταυτότητα του χρήστη, ακεραιότητα όλων των μηνυμάτων σηματοδοσίας και προαιρετικά πολυεπίπεδη κρυπτογράφηση δεδομένων.

**Συνάθροιση φορέα (Carrier Aggregation)** [3]: Ο πιο απλός τρόπος για να αυξηθεί η χωρητικότητα είναι να προσθέσουμε περισσότερο εύρος ζώνης. Δεδομένου ότι είναι σημαντικό

να διατηρηθεί η προς τα πίσω συμβατότητα για τα κινητά των εκδόσεων 8 και 9 του LTE η αύξηση του εύρους ζώνης στο LTE Advanced παρέχεται μέσω της συνάθροισης φορέων των εκδόσεων 8 και 9. Η συνάθροιση φορέων μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για FDD και TDD. Κάθε συναθροισμένος φορέας αναφέρεται ως στοιχείο φορέα. Το στοιχείο φορέα μπορεί να έχει ένα εύρος ζώνης των 1,4, 3, 5, 10, 15 ή 20 MHz και το μέγιστο πέντε στοιχεία φορείς μπορούν να αθροιστούν. Ως εκ τούτου, το μέγιστο εύρος ζώνης είναι 100 MHz. Ο αριθμός των συναθροισμένων φορέων μπορεί να είναι διαφορετικός σε downlink και uplink, ωστόσο ο αριθμός των στοιχείων φορέα uplink δεν είναι ποτέ μεγαλύτερος από τον αριθμό των στοιχείων φορέα downlink. Οι επιμέρους φορείς στοιχεία μπορεί επίσης να είναι από διαφορετικά εύρη ζώνης, όπως στην Εικόνα 3.



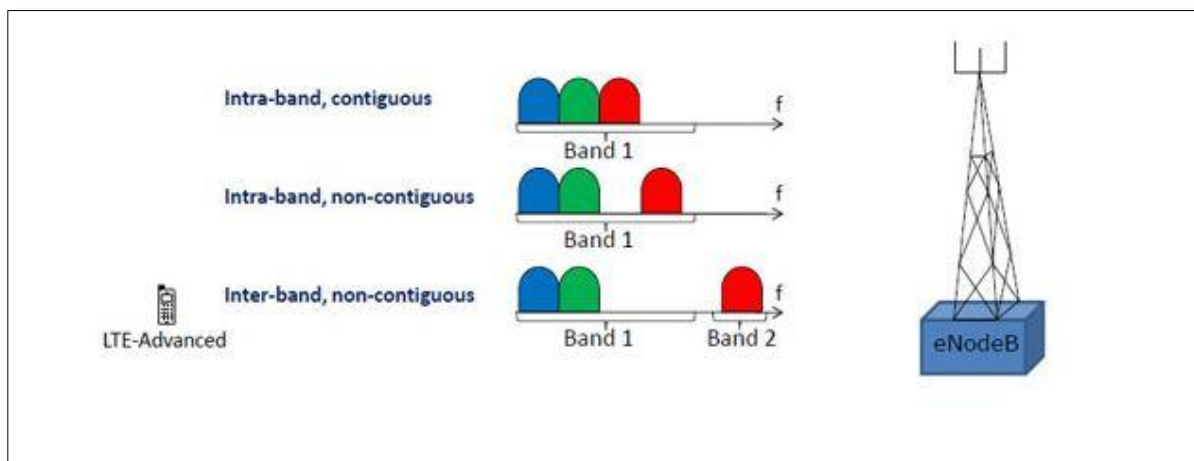
Εικόνα 3: Συνάθροιση φορέα - FDD [3]

Για πρακτικούς λόγους υπάρχουν διαφορετικές εκδοχές συνάθροισης φορέα που καθορίζονται από π.χ. συνδυασμούς της πάντα λειτουργίας E-UTRA και του αριθμού των στοιχείων φορέα. Στην έκδοση 10 υπάρχουν δύο στοιχεία φορέων στο downlink και μόνο ένας στο uplink (ως εκ



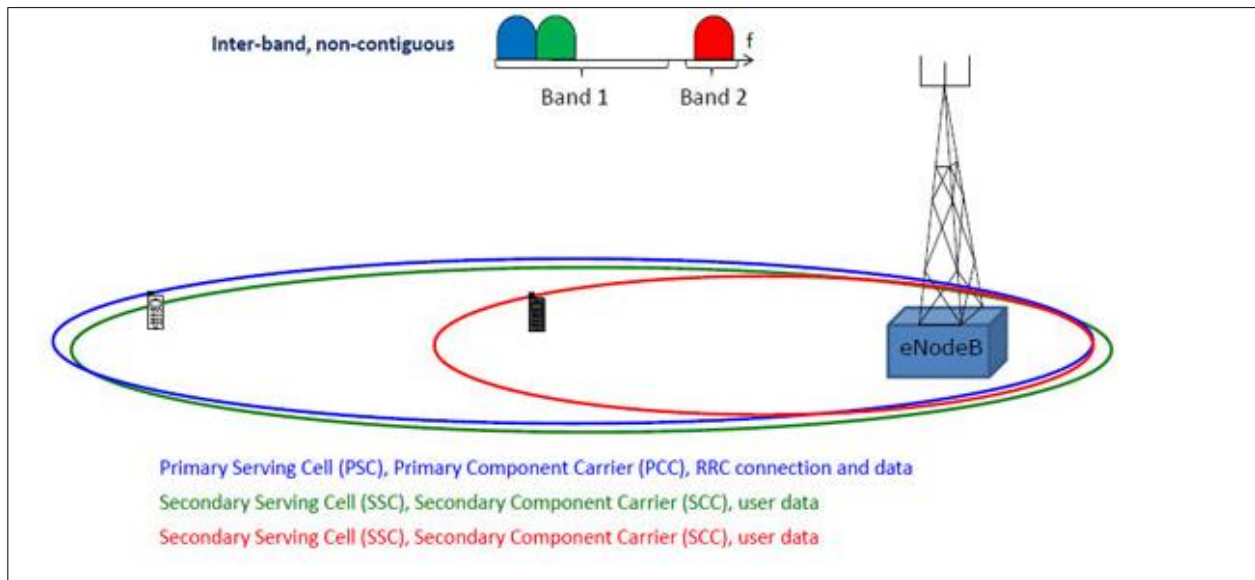
τούτου δεν υπάρχει συνάθροιση φορέα στο uplink), στην έκδοση 11 υπάρχουν δύο στοιχεία φορέα στο downlink και ένα ή δύο στοιχεία φορείς στο uplink όταν χρησιμοποιείται συνάθροιση φορέα.

Ο ευκολότερος τρόπος για να οργανωθεί η συνάθροιση είναι να χρησιμοποιηθούν συνεχόμενα στοιχεία φορέα εντός της ίδιας ζώνης συχνοτήτων λειτουργίας (όπως ορίζεται για το LTE). Αυτό μπορεί να μην είναι πάντα δυνατό, λόγω των σεναρίων κατανομής συχνοτήτων. Για μη συνεχόμενες κατανομές θα μπορούσε τα στοιχεία φορέα να ανήκουν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας, αλλά να διαχωρίζονται από ένα διάκενο συχνότητας, ή θα μπορούσε να είναι μεταξύ διαφορετικών ζωνών, στην οποία περίπτωση τα στοιχεία φορέα ανήκουν σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων λειτουργίας, όπως στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4: Συνάθροιση φορέα στην ίδια και σε διαφορετική ζώνη συχνοτήτων [3]

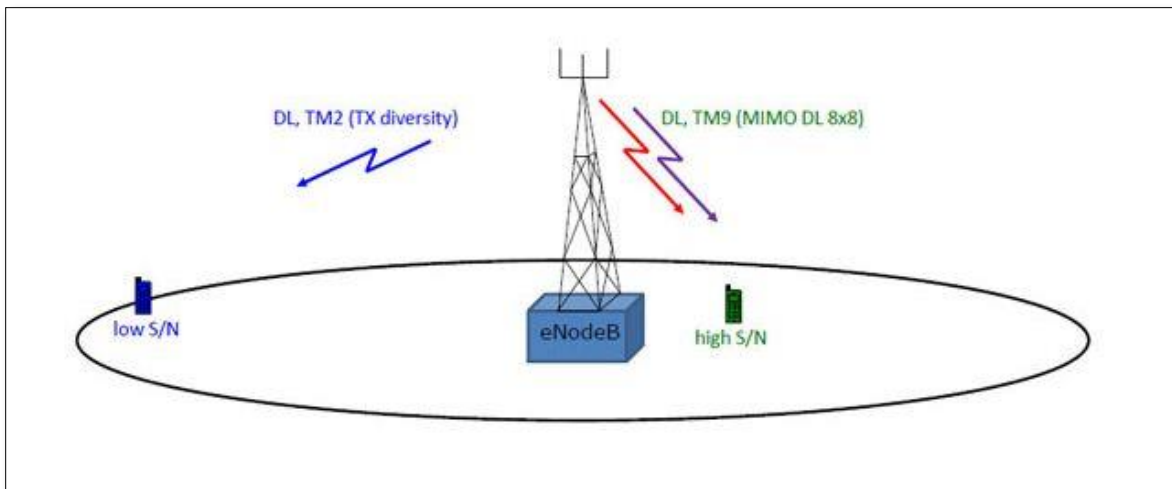
Όταν χρησιμοποιείται συνάθροιση φορέα υπάρχει ένας αριθμός κυψελών που εξυπηρετούν, μία για κάθε στοιχείο φορέα. Η κάλυψη των κυψελών που εξυπηρετούν μπορεί να διαφέρει. Η σύνδεση RRC γίνεται από μία κυψέλη, την κύρια κυψέλη, που εξυπηρετείται από το κύριο στοιχείο φορέα. Τα άλλα στοιχεία φορείς όλα αναφέρονται ως Δευτερεύοντα στοιχεία, εξυπηρετώντας τις δευτερεύουσες κυψέλες εξυπηρέτησης.



Εικόνα 5: Συνάθροιση φορέα με κυψέλες εξυπηρέτησης [3]

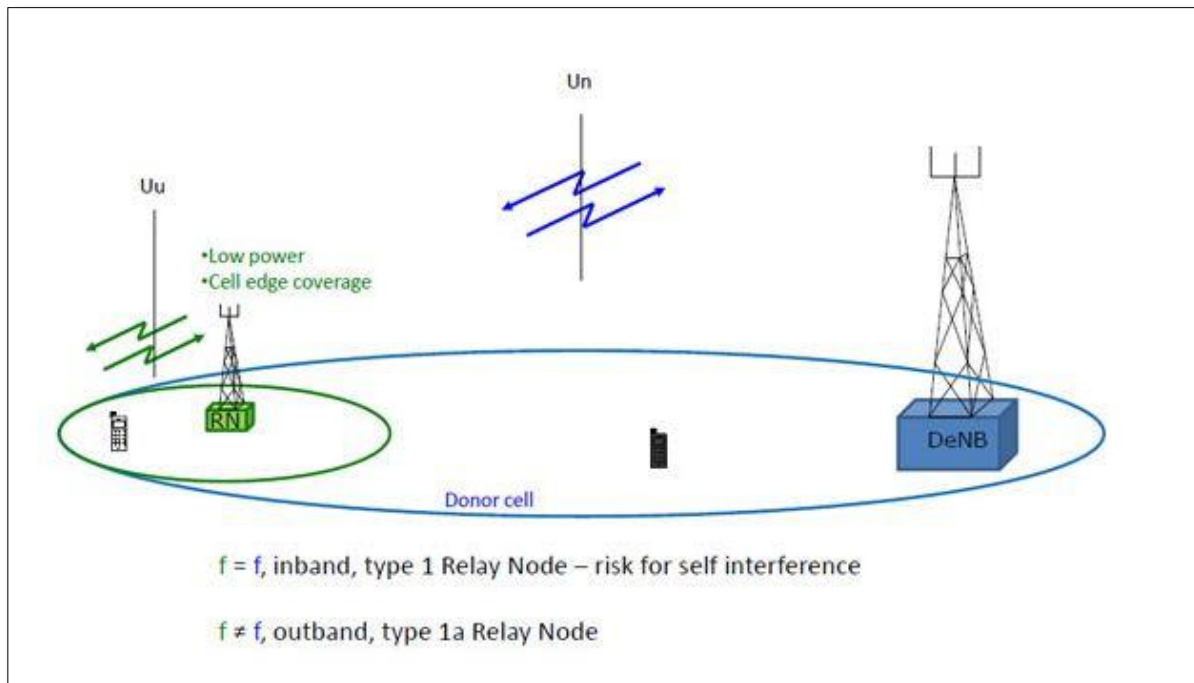
Στο παράδειγμα που φαίνεται στην Εικόνα 5, η συνάθροιση φορέα σε όλα τους τρία στοιχεία φορέα είναι δυνατή μόνο για το μαύρο τερματικό, το λευκό τερματικό δεν είναι εντός της περιοχής κάλυψης του κόκκινου στοιχείου φορέα.

**Μετάδοση πολλαπλών κεραιών [1]:** Η χρήση πολλαπλών κεραιών είναι το κλειδί από άποψη τεχνολογίας για να ικανοποιήσει το LTE τους στόχους για μεγαλύτερη απόδοση. Πολλαπλές κεραιές λήψης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη πολυμορφίας. Για μεταδόσεις ανερχόμενης ζεύξης, αυτό έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλά κυψελωτά συστήματα για αρκετά χρόνια. Ωστόσο, καθώς οι κεραιές διπλής λήψης είναι το βασικό στοιχείο για όλα τα τερματικά LTE, η απόδοση κατερχόμενης ζεύξης είναι επίσης βελτιωμένη. Ο απλούστερος τρόπος χρησιμοποίησης πολλαπλών κεραιών λήψης είναι η ποικιλόμορφη λήψη έτσι ώστε να συλλεχτεί πρόσθετη ενέργεια και να μειωθεί η εξασθένιση, αλλά επιπλέον κέρδη μπορούν να επιτευχθούν σε σενάρια με παρεμβολές αν οι κεραιές χρησιμοποιούνται όχι μόνο για την παροχή ποικιλομορφίας, αλλά επίσης για να καταστείλουν παρεμβολές. Η χωρική πολυπλεξία, μερικές φορές αναφέρεται ως MIMO, μπορεί να επιτευχθεί από το LTE χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραιές τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη. Η χωρική πολυπλεξία έχει σαν αποτελέσματα αυξημένο ποσοστό ρυθμού δεδομένων, σε περιορισμένου εύρους ζώνης σενάρια με τη δημιουργία πολλών παράλληλων καναλιών. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν το S / N (λόγος σήματος προς θόρυβο) είναι υψηλό, για παράδειγμα σε ένα υψηλής ποιότητας ραδιοφωνικό κανάλι.



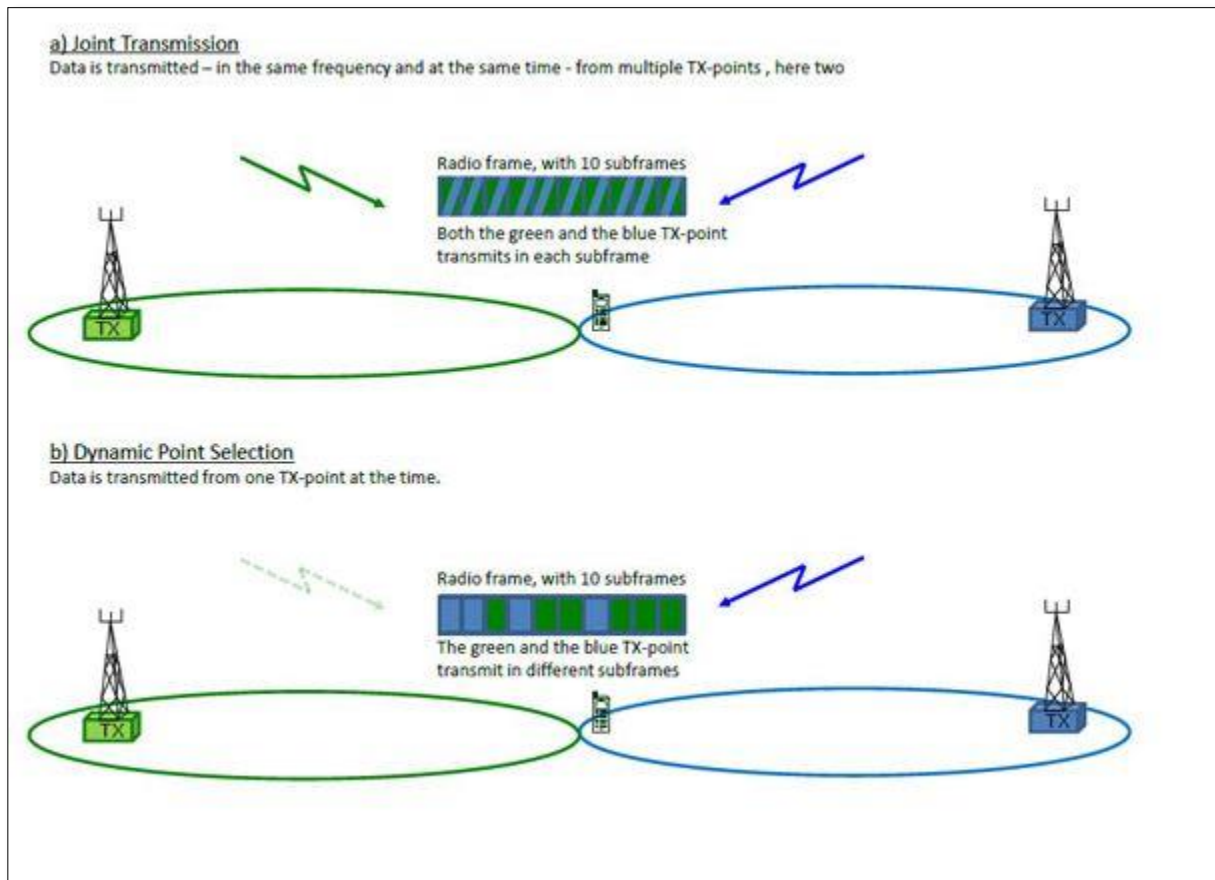
Εικόνα 6: MIMO [3]

**Κόμβοι αναμετάδοσης (Relay Nodes) [3]:** Στο LTE Advanced, η δυνατότητα για τον ετερογενή σχεδιασμό του δικτύου, για παράδειγμα ένα μίγμα των μεγάλων και των μικρών κυψελών, αυξάνεται με την εισαγωγή των Relay Nodes (RNs). Οι κόμβοι αναμετάδοσης είναι σταθμοί βάσης χαμηλής ισχύος που παρέχουν ενισχυμένη κάλυψη και χωρητικότητα στα άκρα των κυψελών και σε hot-spot περιοχές και μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη σύνδεση σε απομακρυσμένες περιοχές χωρίς σύνδεση οπτικής ίνας. Ο κόμβος αναμετάδοσης είναι συνδεδεμένος στο δότη eNB ( DeNB ) μέσω μιας ραδιο διεπαφής  $U_n$ , η οποία είναι μια τροποποίηση της E- UTRAN διεπαφής  $U_u$ . Ως εκ τούτου, στη κυψέλη δότη οι πόροι διαμοιράζονται μεταξύ UEs που εξυπηρετούνται άμεσα από την DeNB και των κόμβων αναμετάδοσης. Όταν η  $U_u$  και  $U_n$  χρησιμοποιούν διαφορετικές συχνότητες ο κόμβος αναμετάδοσης αναφέρεται ως ένας τύπος 1a RN, όταν χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες ονομάζεται τύπος 1 RN. Στην τελευταία περίπτωση υπάρχει υψηλός κίνδυνος παρεμβολής στο κόμβο αναμετάδοσης, όταν λαμβάνουμε στο  $U_u$  και εκπέμπουμε στο  $U_n$  ταυτόχρονα ( ή το αντίστροφο). Αυτό μπορεί να αποφευχθεί μέσω του διαμοιρασμού του χρόνου μεταξύ  $U_u$  και  $U_n$ , ή έχοντας διαφορετικές θέσεις του πομπού και του δέκτη.



Εικόνα 7: Σύνδεση του Relay Node με το DeNB [3]

**Συντονισμένη λειτουργία πολλαπλών σημείων Coordinated Multi Point operation (CoMP) [3]** : Το LTE Advanced συνεχίζει να εξελίσσεται. Προστίθενται νέες διαμορφώσεις συνάθροισης φορέα και υπάρχουν νέα χαρακτηριστικά που εισήχθησαν στις επόμενες κυκλοφορίες των προδιαγραφών 3GPP, όπως η συντονισμένη λειτουργία πολλαπλών σημείων (CoMP). Ο κύριος λόγος για την εισαγωγή της CoMP είναι να βελτιώσει τις επιδόσεις του δικτύου στις άκρες των κυψελών. Στη CoMP μια σειρά από TX (μετάδοση) σημείων παρέχουν συντονισμένη μετάδοση στο downlink και μια σειρά RX (λήψη) σημείων παρέχουν συντονισμένη λήψη στο uplink. Ένα TX/RX σημείο αποτελείται από ένα σύνολο συσχετιζόμενων TX/RX κεραιών που παρέχει κάλυψη στον ίδιο τομέα. Το σύνολο των TX/RX σημείων που χρησιμοποιούνται στη CoMP μπορεί να είναι είτε σε διαφορετικές περιοχές ή να συσχετίζονται αλλά να παρέχουν κάλυψη σε διαφορετικούς τομείς, μπορούν επίσης να ανήκουν στο ίδιο ή σε διαφορετικά ENBs. Η CoMP μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους και ο συντονισμός μπορεί να γίνει για ομοιογενή δίκτυα, καθώς και για ετερογενή δίκτυα. Στην Εικόνα 8 εμφανίζονται δύο απλοποιημένα παραδείγματα για το downlink CoMP. Σε αμφότερες τις περιπτώσεις τα downlink δεδομένα είναι διαθέσιμα για μετάδοση από δύο TX σημεία. Όταν δύο ή περισσότερα TX σημεία, μεταδίδουν στην ίδια συχνότητα με τον ίδιο υποπλαίσιο λέγεται μεικτή μετάδοση. Όταν τα δεδομένα είναι διαθέσιμα για μετάδοση σε δύο ή περισσότερα TX σημεία, αλλά προγραμματισμένα για μετάδοση από ένα TX σημείο σε κάθε υποπλαίσιο έχουμε την ονομαζόμενη δυναμική επιλογή σημείων.



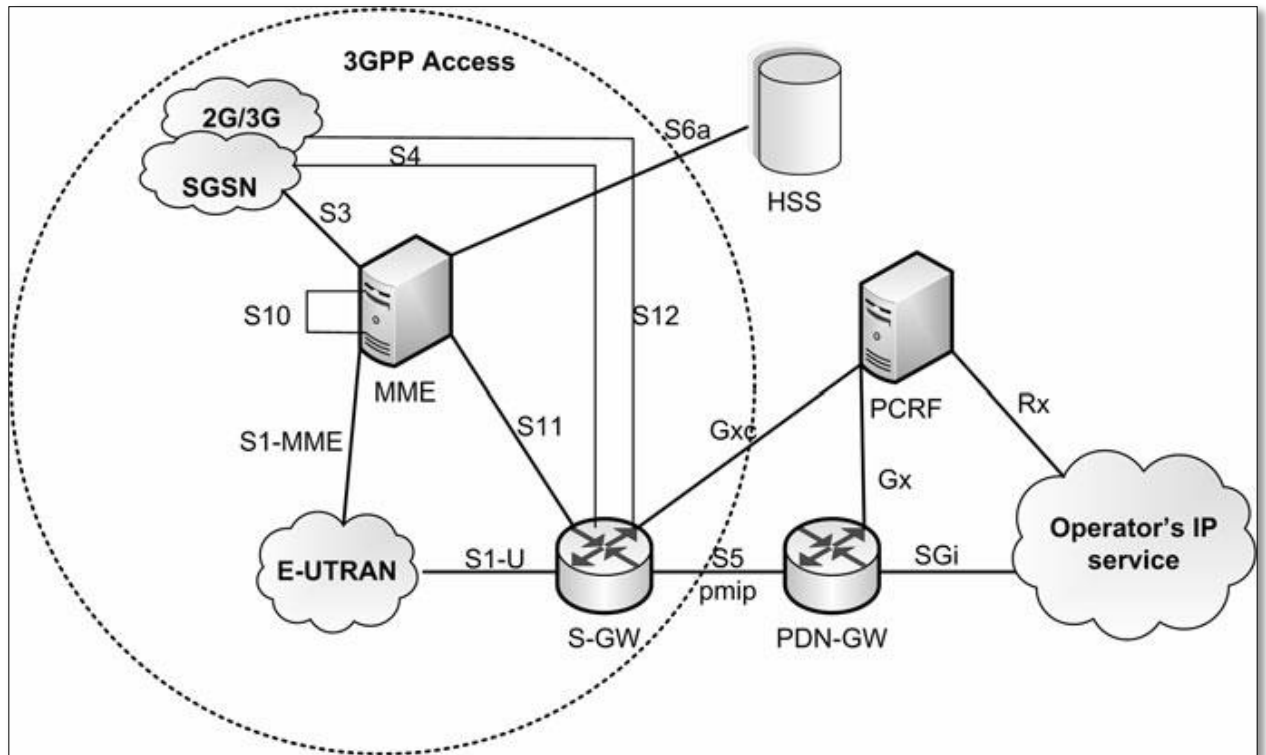
Εικόνα 8: Downlink Comp α) Μεικτή μετάδοση β) Δυναμική επιλογή σημείων [3]

## 2.2 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ

Η αρχιτεκτονική του δικτύου LTE βασίζεται σε λειτουργικές αρχές της αποσύνθεσης, όπου τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά αποσυντίθενται σε λειτουργικές οντότητες χωρίς συγκεκριμένες παραδοχές εφαρμογής για της οντότητες του φυσικού δικτύου. Αυτός είναι ο λόγος που το 3GPP ορίζει ένα νέο πακέτο πυρήνα, το Evolved Packet Core (EPC), αρχιτεκτονικής του δικτύου για την υποστήριξη του E-UTRAN μέσω της μείωσης του αριθμού των στοιχείων του δικτύου, την απλούστερη λειτουργικότητα και το πιο σημαντικό επιτρέποντας συνδέσεις και μεταγωγές σε άλλες τεχνολογίες σταθερής και ασύρματης πρόσβασης, δίνοντας στους παρόχους υπηρεσιών τη δυνατότητα να παραδώσουν μια ενιαία εμπειρία κινητικότητας.

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το μοντέλο αναφοράς δικτύου για το LTE, που αποτελεί μια λογική αναπαράσταση της αρχιτεκτονικής του δικτύου. Σε αυτό αναπαρίστανται οι

λειτουργικές μονάδες της αρχιτεκτονικής και τα σημεία αναφοράς μεταξύ των λειτουργικών μονάδων.



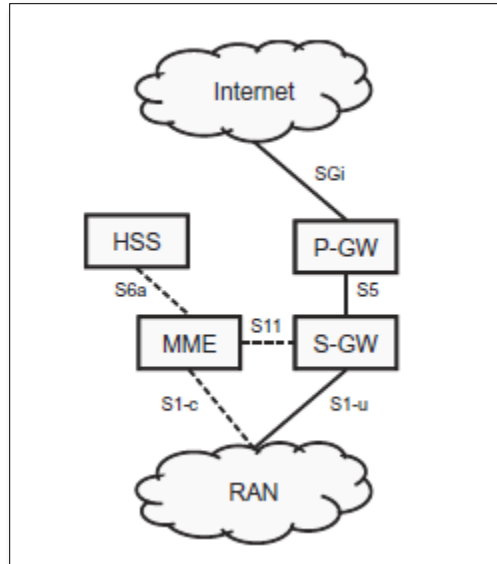
Εικόνα 9: Μοντέλο αναφοράς του LTE [2]

Η συνολική αρχιτεκτονική έχει δύο διακριτές συνιστώσες: το δίκτυο πρόσβασης και το δίκτυο πυρήνα. Το δίκτυο πρόσβασης είναι το Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN). Το δίκτυο πυρήνα που ονομάζεται Evolved Packet Core (EPC) και είναι βασικό συστατικό του SAE.

### 2.2.1 Evolved Packet Core

Το EPC [4] αναλαμβάνει τον συνολικό έλεγχο του Εξοπλισμού Χρήστη (User Equipment - UE) και την εγκαθίδρυση των φορέων σύνδεσης (bearers). Ένας φορέας σύνδεσης είναι ροή IP πακέτων με μια ορισμένη ποιότητα υπηρεσιών μεταξύ της πύλης και του UE. Το EPC είναι μια ριζική εξέλιξη από τον πυρήνα του δικτύου GSM/GPRS που χρησιμοποιείται για τα GSM και WCDMA/HSPA με πρόσθετα χαρακτηριστικά για να βελτιώσει τις επιδόσεις, να υποστηρίξει EUTRAN πρόσβαση και την υποστήριξη της ενοποίησης με μη 3GPP τεχνολογίες μετάδοσης,

όπως WLAN και WiMAX.. Το EPC υποστηρίζει την πρόσβαση μόνο στο πεδίο μεταγωγής πακέτων, δεν υπάρχει δηλαδή μεταγωγή κυκλώματος.



Εικόνα 10: Core-network (EPC) architecture [1]

Τα κύρια λειτουργικά στοιχεία [2] του EPC είναι:

**Η πύλη εξυπηρέτησης (Serving Gateway - S-GW):** Η S-GW δρομολογεί και προωθεί πακέτα δεδομένων των χρηστών, ενώ παράλληλα ενεργεί ως τοπικό σημείο κινητικότητας για τους φορείς σύνδεσης κατά τη διάρκεια των μεταπομπών μεταξύ eNodeB και ως σημείο κινητικότητας μεταξύ LTE και άλλων τεχνολογιών 3GPP. Για όλα τα ενεργά UEs, η S-GW μεταβιβάζει τα δεδομένα μεταξύ eNodeB και του P-GW. Διαχειρίζεται και αποθηκεύει περιεχόμενα όπως παραμέτρους της υπηρεσίας IP και πληροφορίες για την εσωτερική δρομολόγηση του δικτύου αλλά και πληροφορίες για τον φόρτο στο δίκτυο και την νόμιμη διακοπή. Τέλος διατηρεί τις πληροφορίες για τους φορείς όταν ο εξοπλισμός χρήστη είναι σε κατάσταση IDLE και κρατάει προσωρινά τα δεδομένα σε buffers στην διάρκεια που η MME αρχίζει την ανίχνευση για να βρει το στίγμα του εξοπλισμού χρήστη ώστε να καθιερώσει ξανά τους φορείς σύνδεσης.

**Η Οντότητα Διαχείρισης της Κινητικότητας (Mobility Management Entity - MME):** Η MME είναι ο κόμβος ελέγχου που διαχειρίζεται τα σήματα μεταξύ του εξοπλισμού χρήστη και του CN. Είναι υπεύθυνος για την αυθεντικοποίηση των χρηστών την εγκαθίδρυση της σύνδεσης και η ασφάλεια μεταξύ του δικτύου και του UE και την δημιουργία και τον καταμερισμό προσωρινών ταυτοτήτων στα UEs. Επίσης εμπεριέχει λειτουργίες που σχετίζονται με την διαχείριση των

φορέων σύνδεσης όπως η διατήρηση και απελευθέρωση των φορέων και τις χειρίζεται το επίπεδο διαχείρισης συνεδρίας στο πρωτόκολλο NAS.

**Η πύλη Packet Data Network (PDN Gateway ή P-GW ή PDN GW):** Η PDN-GW παρέχει συνδεσιμότητα στο UE με τα εξωτερικά δίκτυα δεδομένων με το να είναι το σημείο εισόδου και εξόδου της κυκλοφορίας για το UE. Η PDN είναι υπεύθυνη για την ανάθεση IP διευθύνσεων στους εξοπλισμούς χρήστη, για την επιβολή της ποιότητας υπηρεσιών, και για την διαμόρφωση της ροής σύμφωνα με τους κανόνες του PCRF. Ένα UE μπορεί να έχει ταυτόχρονη συνδεσιμότητα με περισσότερα από ένα PDN-GW για την πρόσβαση σε πολλαπλά δίκτυα δεδομένων. Η PDN-GW εκτελεί επιβολής της πολιτικής, το φιλτράρισμα πακέτων για κάθε χρήστη, υποστήριξη χρέωσης, νόμιμη παρακολούθηση και τον έλεγχο πακέτων. Άλλος καίριος ρόλος της PDN-GW είναι να λειτουργήσει ως σημείο αναφοράς για την κινητικότητα μεταξύ 3GPP και μη-3GPP τεχνολογίες όπως WiMAX και 3GPP2

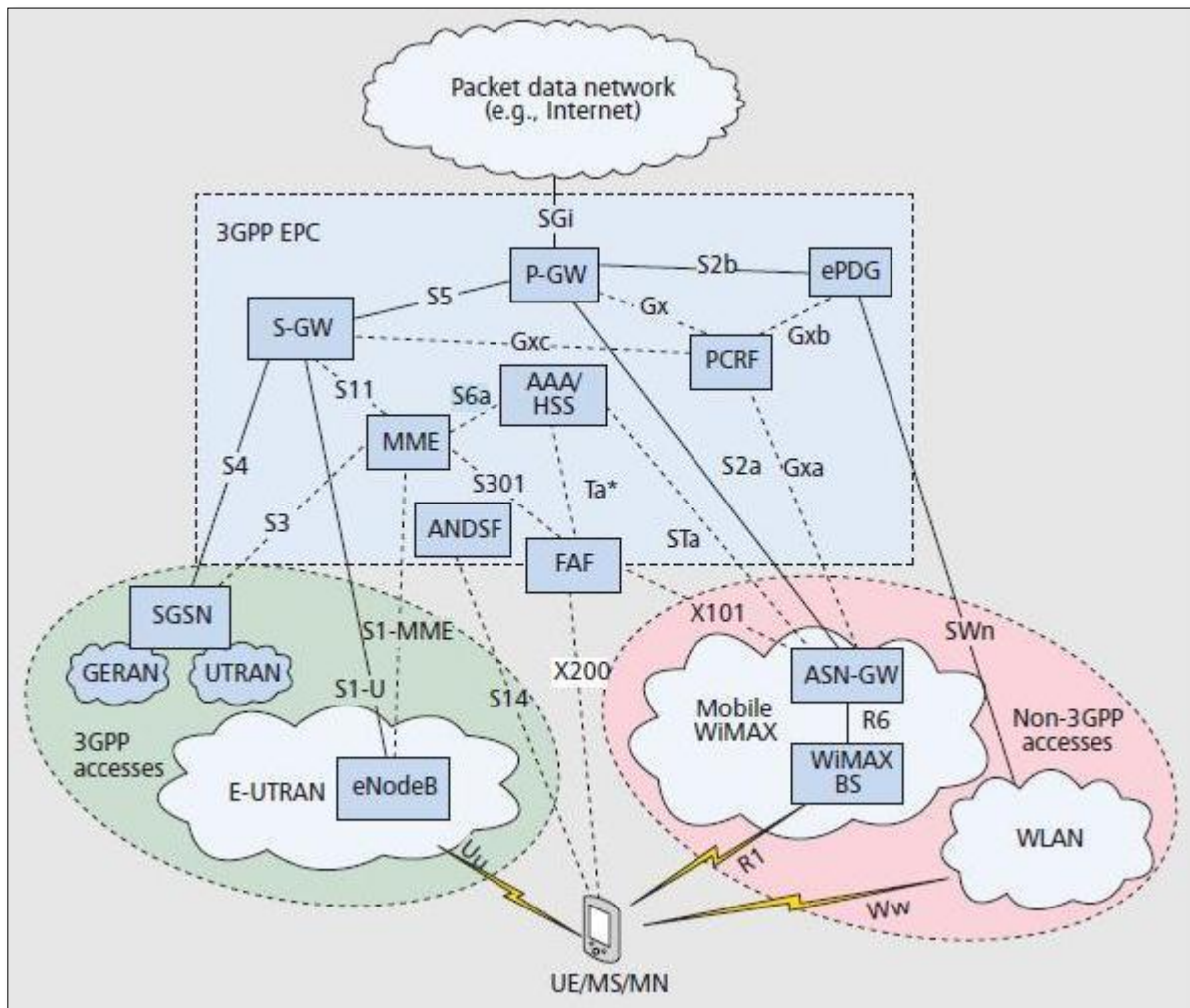
### 2.2.2 Αρχιτεκτονική Evolved 3GPP Network

Το 3GPP μετά την έκδοση 8 καθόρισε το evolved packet system (EPS) [4] που περιλαμβάνεται στο System Architecture Evolution (SAE). Το EPS αποτελείται από ένα νέο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης, που ονομάζεται εξελιγμένο UTRAN (E-UTRAN), καθώς και ένα νέο all-IP κεντρικό δίκτυο, που ονομάζεται evolved packet core (EPC). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 11, η πρόσβαση στο EPC δεν υποστηρίζεται μόνο μέσω 3GPP πρόσβασης (π.χ. E-UTRAN, UTRAN, GERAN), αλλά επίσης, μέσω μη 3GPP πρόσβασης, όπως WLAN και τεχνολογιών WiMAX. Ένας αριθμός διαφορετικών δικτύων πρόσβασης, όπως WLAN, WiMAX, German, UTRAN, και E-UTRAN, συνδέονται σε ένα κοινό core network (το EPC) που βασίζεται στην τεχνολογία IP μέσω διαφορετικών διεπαφών. Όλες οι 3GPP τεχνολογίες πρόσβασης συνδέονται μέσω της πύλης εξυπηρέτησης (SGW), ενώ όλες οι μη 3GPP τεχνολογίες πρόσβασης συνήθως συνδέονται μέσω της packet data network gateway (P-GW) ή της evolved packet data gateway (ePDG), η οποία παρέχει επιπλέον λειτουργίες ασφαλείας για μη αξιόπιστες τεχνολογίες πρόσβασης (όπως WLANs χωρίς ισχυρά ενσωματωμένα χαρακτηριστικά ασφαλείας).

Η ANDSF [5] που ορίζεται από το 3GPP είναι μία από τις λογικές οντότητες που έχουν προστεθεί για τη υποστήριξη του VHO μεταξύ ετερογενών δικτύων με τη διευκόλυνση της ανακάλυψης ενός TN. Η ANDSF είναι ανεξάρτητη του χρησιμοποιούμενες ράδιο τεχνολογίες, έτσι ώστε να μπορεί να υποστηρίξει τόσο 3GPP και μη 3GPP AN. Η ANDSF είναι εννοιολογικά παρόμοια με το media independent information services (MIIS) του IEEE 802.21 media independent handover (MIH). Οι οντότητες της MIIS περιλαμβάνουν γενικές πληροφορίες για το σύστημα, AN συγκεκριμένες πληροφορίες, point of attachment (PoA) συγκεκριμένες πληροφορίες και υπηρεσίες υψηλότερου επιπέδου / πληροφορίες ανά POA. Η ANDSF [6] θεσπίστηκε από το 3GPP προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις από τη χρήση



ραδιοκυμάτων. Η χρήση των ραδιοκυμάτων για την ανακάλυψη των γειτονικών κυψελών απαιτεί το UE να χρησιμοποιήσει πολλαπλές κεραίες, οι οποίες σε αυξημένη ζήτηση ενέργειας. Επιπλέον, εάν οι πληροφορίες της κυψέλης δεν μεταδίδονται, το UE δεν είναι σε θέση να αποκτήσει τις κατάλληλες πληροφορίες της κυψέλης στόχου. Προαιρετικά, η ANDSF μπορεί να παρέχει πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με τις γειτονικές κυψέλες, όπως δυνατότητες QoS, το οποίο δεν μπορεί να διανεμηθεί από ραδιοσήματα, λόγω της υψηλής ζήτησης σε δεδομένα.



Εικόνα 11: Αρχιτεκτονική του 3GPP Evolved Packet Core [5]

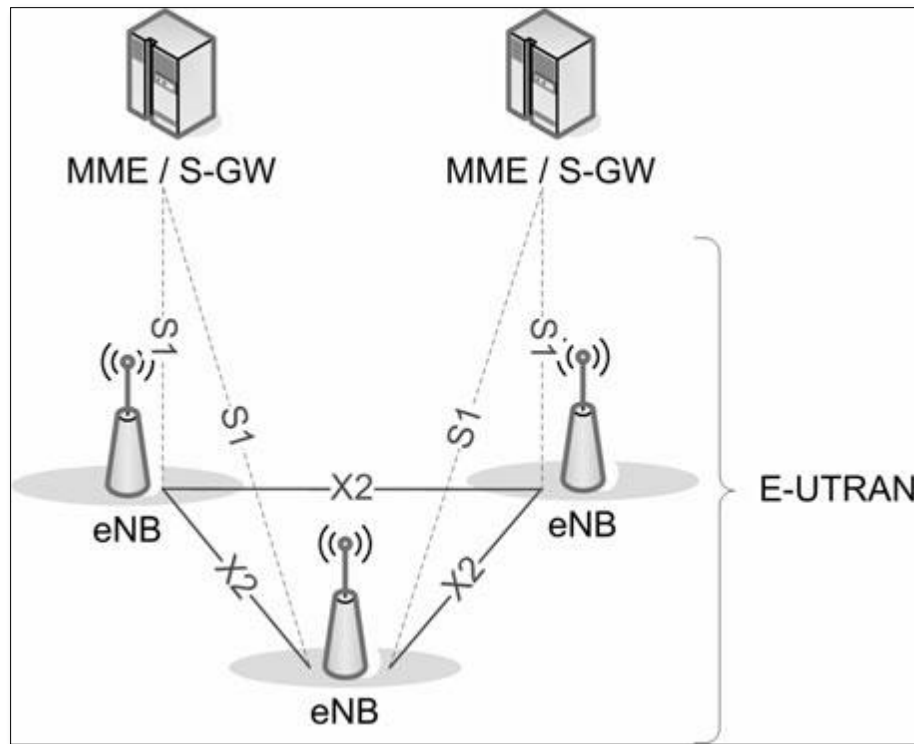
Το S-GW [4] λειτουργεί ως σημείο αναφοράς για την κινητικότητα εντός των 3GPP τεχνολογιών πρόσβασης και επίσης ρυθμίζει τη κίνηση μεταξύ του GPRS κόμβου υποστήριξης (SGSN) και της πύλης PDN (P-GW).

Στο E-UTRAN το SGW συνδέεται άμεσα με αυτό μέσω της S1 διασύνδεσης, ενώ ο SGSN είναι ο ενδιάμεσος κόμβος όταν χρησιμοποιείται GERAN / UTRAN. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η οντότητα διαχείρισης της κινητικότητας (MME) έχει επίσης ενσωματωθεί στην αρχιτεκτονική για το χειρισμό των λειτουργιών ελέγχου όπως ο έλεγχος ταυτότητας, η ασφάλεια και η κινητικότητα στην κατάσταση αδράνειας.

Για την πρόσβαση στο EPC μέσω WLAN και WiMAX [4], χρησιμοποιούνται διαφορετικά μονοπάτια δεδομένων. Ένα WiMAX ASN είναι άμεσα συνδεδεμένο με ένα P-GW μέσω της διεπαφής S2a ως αξιόπιστη πρόσβαση. Από την άλλη πλευρά, ένα WLAN είναι προσβάσιμο μέσω του EPDG ως μη αξιόπιστη πρόσβαση. Όλα τα μονοπάτια δεδομένων από τα δίκτυα πρόσβασης συνδυάζονται στην P-GW, η οποία ενσωματώνει λειτουργίες, όπως το φιλτράρισμα πακέτων, φόρτιση και εκχώρηση διευθύνσεων IP και δρομολογεί την κίνηση πάνω από SGI σε ένα εξωτερικό πακέτο δικτύου δεδομένων ή σε δίκτυο πακέτων δεδομένων του φορέα εκμετάλλευσης (για την πρόσβαση σε υπηρεσίες IP που παρέχονται από το πάροχο). Εκτός από τις οντότητες του δικτύου που ελέγχουν τη κίνηση δεδομένων, το EPC περιλαμβάνει επίσης οντότητες δικτύου για τη διατήρηση πληροφοριών εγγραφής χρήστη (home subscriber server - HSS), τον καθορισμό της ταυτότητας και των δικαιωμάτων του χρήστη, παρακολούθηση των δραστηριοτήτων του (AAA server) και επιβολή χρέωσης και QoS πολιτικών μέσω μιας PCC αρχιτεκτονικής.

### **2.2.3 Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)**

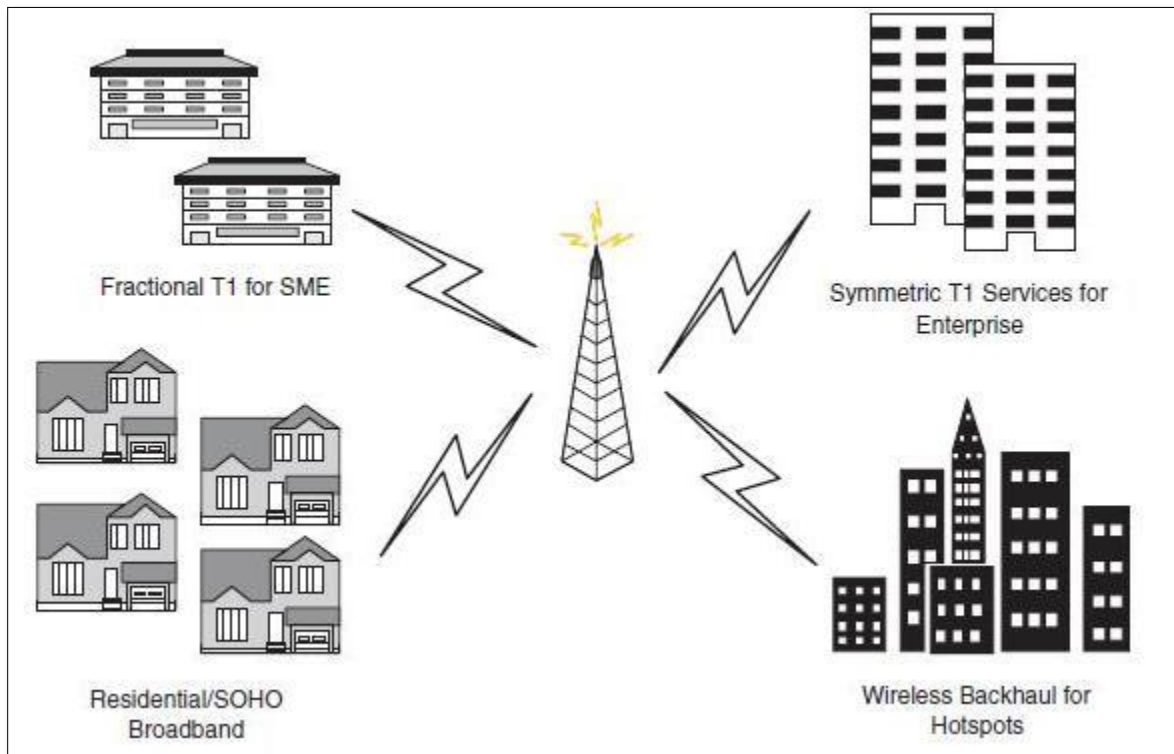
Το E-UTRAN [2] αποτελείται από eNodeBs. Το E-UTRAN είναι υπεύθυνο για την συνολική διαχείριση του ράδιο-μέσου στο LTE. Όταν εμφανίζεται ο UE, ο eNodeB είναι υπεύθυνος για την διαχείριση των ράδιο-πόρων, δηλαδή θα κάνει τον έλεγχο των ραδιοφορέων σύνδεσης, τον έλεγχο της ράδιο-υποδοχής, την διάθεση ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης στον UE. Όταν ένα πακέτο από τον UE φτάσει στον eNodeB, ο δεύτερος θα συμπίσει την κεφαλίδα IP και θα κρυπτογραφήσει την ακολουθία δεδομένων. Επίσης είναι υπεύθυνος για την προσθήκη GPRS Tunneling Protocol (GTP-U) κεφαλίδας στο φορτίο και για την αποστολή του στην S-GW. Πριν τα δεδομένα μεταδοθούν πραγματικά πρέπει να εγκαθιδρυθεί το επίπεδο ελέγχου. Ο eNodeB είναι υπεύθυνος για την επιλογή της MME χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση επιλογής MME. Επειδή ο eNodeB είναι η μόνη οντότητα στην μεριά του ράδιο-μέσου, φροντίζει όλη την ποιότητα υπηρεσιών, δρομολογεί τα δεδομένα, εκτελεί λειτουργίες σχετικά με την δρομολόγηση και την μετάδοση των μηνυμάτων ανίχνευσης και μηνυμάτων πολυεκπομπής.



Εικόνα 12: Αρχιτεκτονική του E-UTRAN [2]

### 3. WIMAX

Το WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) [7] είναι μια ασύρματη τεχνολογία επικοινωνιών που βασίζεται στο IEEE 802.16 πρότυπο που επιτρέπει την παροχή ασύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών ανά πάσα στιγμή, οπουδήποτε. Το WiMAX μπορεί να εξυπηρετήσει σταθερά και κινητά μοντέλα χρήσης σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Το πρότυπο IEEE 802.16 αναπτύχθηκε για την παροχή non-line-of-sight (NLoS) συνδεσιμότητας μεταξύ ενός σταθμού συνδρομητή και σταθμού βάσης. Το αρχικό πρότυπο IEEE 802.16 (τώρα ονομάζεται Fixed WiMAX) δημοσιεύθηκε το 2001. Το Mobile WiMAX (αρχικά βασίστηκε στο 802.16e-2005) είναι η αναθεώρηση που αναπτύχθηκε σε πολλές χώρες, και βάσει των μελλοντικών αναθεωρήσεων όπως 802.16m-2011. Στο WIMAX δεν υπάρχει ένα παγκόσμιο ενοποιημένο φάσμα συχνοτήτων. Ωστόσο, το WiMAX Forum έχει δημοσιεύσει τρία αδειοδοτημένα προφίλ φάσματος: 2,3 GHz, 2,5 GHz και 3,5 GHz, σε μια προσπάθεια να οδηγηθούμε στην τυποποίηση και να μειωθεί το κόστος.



Εικόνα 13: Point-to-multipoint WiMAX εφαρμογές [7]

Παρότι οι αρχικές υλοποιήσεις του WiMAX αφορούσαν σταθερές εφαρμογές, οι πραγματικές δυνατότητες του WiMAX γίνονται αντιληπτές μόνο όταν χρησιμοποιούνται για mobile broadband εφαρμογές. Η τεχνολογία WiMAX IEEE 802.16e αναπτύσσεται από σταθερούς παρόχους σαν μέρος της ασύρματης κινητικότητας ώστε να επιτευχθεί ενιαία ευρυζωνική πρόσβαση. Καθώς οι τελικοί χρήστες έχουν συνηθίσει σε ευρυζωνικές συνδέσεις υψηλής ταχύτητας στο σπίτι και την εργασία, απαιτούν παρόμοιες υπηρεσίες σε εφαρμογές κινητικότητας, έτσι πάροχοι υπηρεσιών χρησιμοποιούν το WiMAX για να ικανοποιήσουν τη ζήτηση αυτή.

Με την έκδοση 802.16.m [20] που εισήχθη το 2011, το WiMAX απέκτησε κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά που του επιτρέπουν να συνεργάζεται με ετερογενή δίκτυα και κάνουν απρόσκοπτη τη μετάβαση από LTE σε WiMAX. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του 802.16.m είναι:

- Λειτουργία πολλαπλού φορέα χρησιμοποιώντας ένα μόνο στιγμιότυπο MAC για να είναι δυνατή η λειτουργία σε συνεχόμενα/μη συνεχόμενες ζώνες ραδιοσυχνοτήτων άνω των 20 MHz
- Επέκταση και βελτιωμένους τρόπους MIMO στο downlink και uplink
- Ενισχυμένη Multicast και Broadcast υπηρεσία, χρησιμοποιώντας νέα κανάλια ελέγχου E-MBS και subchannelization
- Ενισχυμένη με βάση το GPS και μη βασισμένη σε GPS υπηρεσία εντοπισμού θέσης
- Υποστήριξη Femto cells και αυτο οργάνωση και βελτιστοποίηση
- Αυξημένη VoIP χωρητικότητα με τη χρήση της νέας δομής ελέγχου, δομής πλαισίων, πιο γρήγορων HARQ αναμεταδόσεων και προγραμματισμό ομάδων
- Βελτιωμένος και αυξημένος έλεγχος καναλιού και κάλυψη του καναλιού δεδομένων μέσω της χρήσης των προγραμμάτων ποικιλομορφίας μετάδοσης, καθώς και πιο ισχυρών μορφών μετάδοσης και προσαρμογή ζεύξης
- Υποστήριξη για multi - hop relay λειτουργία με ενοποιημένη πρόσβαση και συνδέσεις relay
- Υποστήριξη για προηγμένες τεχνικές περιορισμού των παρεμβολών συμπεριλαμβανομένων των Multi - BS MIMO, κλασματική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας, κλειστού βρόγχου και ανοικτού βρόγχου συστήματα ελέγχου ισχύος
- Βελτιωμένα συστήματα ενδο - RAT και μεταξύ RAT διαπομπής με μικρότερους χρόνους διακοπής κατά τη διαπομπή
- Βελτιωμένη υποστήριξη Qo

### 3.1 Χαρακτηριστικά του WiMAX

Το WiMAX είναι μια ασύρματη ευρυζωνική λύση που προσφέρει ένα πλούσιο σύνολο χαρακτηριστικών με μεγάλη ευελιξία όσον αφορά τις επιλογές και τις δυνατότητες ανάπτυξης των προσφερόμενων υπηρεσιών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα πιο βασικά χαρακτηριστικά [7] του WiMAX, μερικά είναι κοινά με του LTE και έχουν αναλυθεί στο κεφάλαιο 2:

**OFDM πολυπλεξία στο φυσικό επίπεδο:** Το WiMAX physical layer (PHY) βασίζεται σε orthogonal frequency division multiplexing, ένα σύστημα που προσφέρει καλή αντίσταση στις πολλαπλές διαδρομές, και επιτρέπει στο WiMAX να λειτουργεί σε συνθήκες NLOS. Η OFDM είναι πλέον ευρέως αναγνωρισμένη ως η μέθοδος για τον μετριασμό των πολλαπλών διαδρομών για τα ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα.

**Πολύ μεγάλες ανώτατες τιμές στο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων:** Το WiMAX είναι σε θέση να υποστηρίζει πολύ υψηλές ταχύτητες δεδομένων. Στην πραγματικότητα, ο ρυθμός δεδομένων

μπορεί να φτάσει 74Mbps όταν λειτουργεί χρησιμοποιώντας ένα 20MHz<sup>2</sup> ευρύ φάσμα. Πιο τυπικά, με τη χρήση ενός λειτουργικού φάσματος 10MHz χρησιμοποιώντας σύστημα TDD με ένα λόγο 3:1 κατερχόμενη ζεύξη προς ανερχόμενη, ο ρυθμός δεδομένων είναι 25Mbps και 6.7Mbps για το downlink και το uplink αντίστοιχα.

**Κλιμακωμένο εύρος ζώνης και ρυθμό δεδομένων υποστήριξης:** Το WiMAX έχει μια επεκτάσιμη αρχιτεκτονική φυσικού επιπέδου που επιτρέπει στο ρυθμό δεδομένων κλιμακωθεί εύκολα με το διαθέσιμο εύρος ζώνης του καναλιού. Αυτή η επεκτασιμότητα υποστηρίζεται στη λειτουργία OFDMA, όπου το FFT (Fast Fourier Transform) μέγεθος μπορεί να είναι κλιμακωμένο με βάση το διαθέσιμο εύρος ζώνης του καναλιού. Αυτή η κλιμάκωση μπορεί να γίνει δυναμικά για να υποστηρίξει την περιαγωγή των χρηστών σε διαφορετικά δίκτυα που μπορεί να έχουν διαφορετικές κατανομές εύρους ζώνης.

**Η υποστήριξη της κινητικότητας :** Το mobile WiMAX έχει τους μηχανισμούς για τη υποστήριξη της απρόσκοπτης διαπομπής σε εφαρμογές πλήρους κινητικότητας που είναι ανεκτές στη καθυστέρηση, όπως το VoIP. Το σύστημα έχει επίσης ενσωματωμένη υποστήριξη για μηχανισμούς εξοικονόμηση ενέργειας που παρατείνουν τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας στις φορητές συσκευές των συνδρομητών. Οι βελτιώσεις του physical layer, όπως η πιο συχνή εκτίμησης του καναλιού, το uplink subchannelization και ο έλεγχος ισχύος, συμβάλουν επίσης στην καλύτερη υποστήριξη των κινητών εφαρμογών.

**Αρχιτεκτονική που βασίζεται σε IP:** Το WiMAX Forum έχει καθορίσει την αρχιτεκτονική του δικτύου αναφοράς που βασίζεται σε μια πλατφόρμα all- IP . Όλες οι υπηρεσίες end-to - end που παραδίδονται πάνω από μια αρχιτεκτονική IP βασίζονται σε πρωτόκολλα IP-based για end-to - end μεταφορά, σε QoS , στη διαχείριση των sessions, την ασφάλεια και την κινητικότητα. Η εξάρτηση από την IP επιτρέπει στο WiMAX προχωρήσει στην επεξεργασία της IP, και διευκολύνει τη σύγκλιση με άλλα δίκτυα και στην αξιοποίηση και την ανάπτυξη των πολλών εφαρμογών που υπάρχουν και είναι εξαρτώμενες από την IP.

**Προσαρμοσμένη διαμόρφωση και κωδικοποίηση (AMC):** Το WiMAX υποστηρίζει έναν αριθμό από διαμορφώσεις και διαφοροποίηση και Forward Error Correction (FEC) συστήματα κωδικοποίησης και επιτρέπει στο σύστημα να αλλάξει σε ένα ανά χρήστη και ανά πλαίσιο, με βάση τις συνθήκες του καναλιού. Η AMC είναι ένας αποτελεσματικός μηχανισμός για τη μεγιστοποίηση του throughput σε ένα κανάλι χρονικά μεταβαλλόμενο. Ο αλγόριθμος προσαρμογής απαιτεί τυπικά τη χρήση της υψηλότερης διαμόρφωσης και του συστήματος κωδικοποίησης που μπορεί να υποστηρίζονται από το λόγο του σήματος προς τον θόρυβο και την παρεμβολή στο δέκτη , έτσι ώστε ο κάθε χρήστης να εφοδιάζεται με τον υψηλότερο δυνατό ρυθμό δεδομένων που μπορεί να υποστηριχθεί στις αντίστοιχες συνδέσεις του.

**Αναμεταδόσεις του link layer:** Για τις συνδέσεις που απαιτούν αυξημένη αξιοπιστία, το WiMAX υποστηρίζει αυτόματες αιτήσεις αναμετάδοσης (ARQ) στο link layer. Οι ARQ συνδέσεις απαιτούν από κάθε μεταδιδόμενο πακέτο επιβεβαιώνεται από τον δέκτη, ανεπιβεβαίωτα πακέτα θεωρούνται ότι έχουν χαθεί και αναμεταδίδονται. Το WiMAX υποστηρίζει επίσης προαιρετικά υβριδικό ARQ το οποίο είναι ένα αποτελεσματικό υβρίδιο μεταξύ FEC και ARQ .

**Υποστήριξη για TDD και FDD:** Οι εκδόσεις μετά το IEEE 802.16e-2005 υποστηρίζουν time division duplexing και frequency division duplexing, καθώς και half-duplex FDD, η οποία επιτρέπει την υλοποίηση συστήματος χαμηλού κόστους. Το TDD ευνοείται από την πλειοψηφία των εφαρμογών λόγω των πλεονεκτημάτων του: (α) ευελιξία στην επιλογή αναλογιών uplink to downlink ρυθμού δεδομένων, (β) ικανότητα να εκμεταλλεύονται την αμοιβαιότητα του καναλιού, (γ) την ικανότητα να εφαρμόσουν σε αζευγάρωτο φάσμα και (δ) το λιγότερο πολύπλοκο σχέδιο πομποδέκτη.

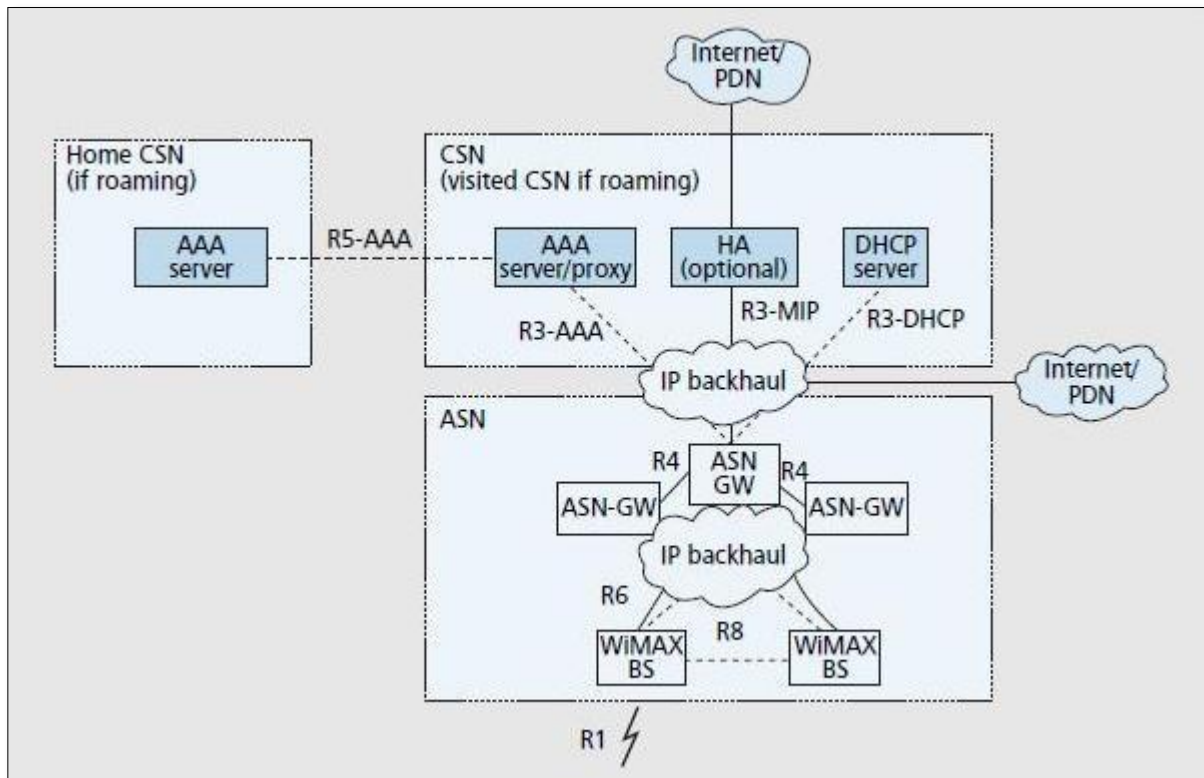
**Ευέλικτη και δυναμική ανά χρήστη κατανομή των πόρων:** Οι uplink και οι downlink πόροι κατανομής ελέγχονται από ένα χρονοπρογραμματιστή στο σταθμό βάσης. Η Χωρητικότητα μοιράζεται μεταξύ πολλών χρηστών με βάση τη ζήτηση, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα TDM. Όταν χρησιμοποιείται η λειτουργία OFDMA - PHY, η πολυπλεξία επιπροσθέτως γίνεται στη διάσταση της συχνότητας, διαθέτοντας διαφορετικά υποσύνολα από OFDM subcarriers σε διαφορετικούς χρήστες. Οι πόροι μπορούν να διατεθούν επίσης στο πεδίο του χώρου, κατά τη χρήση των optional advanced antenna systems (AAS). Το πρότυπο επιτρέπει στους πόρους του εύρους ζώνης να μπορούν διατεθούν σε χρόνο, τη συχνότητα και το χώρο και έχει έναν ευέλικτο μηχανισμό για να μεταφέρει τις πληροφορίες κατανομής των πόρων σε μια frame by frame βάση.

**Υποστήριξη για προηγμένες τεχνικές κεραιάς:** Το WiMAX έχει μια σειρά από ενσωματωμένες λειτουργίες στο σχεδιασμό του physical layer, που επιτρέπουν τη χρήση των τεχνικών πολλαπλών κεραιών, όπως η διαμόρφωση σε δέσμη, η κωδικοποίηση χωροχρόνου, και η χωρική πολυπλεξία. Τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουν τη συνολική χωρητικότητα του συστήματος και τη φασματική απόδοση με την ανάπτυξη πολλαπλών κεραιών στον πομπό και/ή στο δέκτη.

### 3.2 Αρχιτεκτονική του WiMAX

Με βάση το 802.16e, το Mobile WiMAX [4] προσφέρει ένα ασύρματο ευρυζωνικό σύστημα που επιτρέπει τη σύγκλιση κινητών και σταθερών ευρυζωνικών δικτύων. Αυτή η σύγκλιση επιτυγχάνεται μέσω της επαναχρησιμοποίηση μιας κοινής διεπαφής αέρα, και της

ευέλικτης αρχιτεκτονικής δικτύου για την υποστήριξη τόσο σταθερής όσο και κινητής τηλεφωνίας. Το IEEE 802.16e υποστηρίζει επεκτάσιμη OFDMA, η οποία είναι απαραίτητη για την υποστήριξη των συστημάτων πολλαπλής πρόσβασης με εγγυημένο και με διαφοροποιημένες δυνατότητες QoS. Η ομάδα δικτύου Εργασίας (NWG) του WiMAX Forum, καθορίζει την αρχιτεκτονική του συστήματος και λεπτομερή πρωτόκολλα και διαδικασίες πέρα από τα πρότυπα για τη διεπαφή αέρα που καλύπτονται από το IEEE. Η Εικόνα 14 δείχνει την από άκρο-προς-άκρο αρχιτεκτονική του Mobile WiMAX δικτύου.



Εικόνα 14: Αρχιτεκτονική δικτύου του Mobile WiMAX [4]

Το δίκτυο Mobile WiMAX αποτελείται από τις υπηρεσίες δικτύου πρόσβασης-access services network (ASN) και τις υπηρεσίες συνδεσιμότητας δικτύου-connectivity services network (CSN).

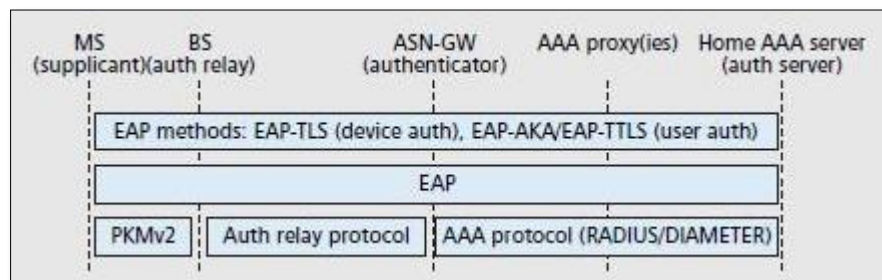
**ASN:** Τα βασικά στοιχεία του ASN είναι ο σταθμός βάσης (BS) και η ASN πύλη (ASN - GW), που συνδέεται μέσω ενός cloud IP . Η λειτουργικότητα σε όλη την ASN - GW και BS χωρίζεται



και σηματοδοτείται μέσω R6. Η ASN - GW παρέχει ασφάλεια, υπολογισμό της κυκλοφορίας και εξασφαλίζει κινητικότητα (και proxy) για το κινητό σταθμό (MS).

**CSN:** Ο Mobile IP home agent (HA) στο CSN χρησιμοποιείται ως ένα παγκόσμιο σημείο αναφοράς κινητικότητας και είναι ένα προαιρετικό στοιχείο, ανάλογα με τις επιλογές ανάπτυξης. Στην απλουστευμένη μορφή (γνωστή και ως απλή IP), η κίνηση του χρήστη παρακάμπτει το HA στο CSN. Η κίνηση των χρηστών δρομολογείται ως ωφέλιμο φορτίο μεταξύ της BS και της ASN - GW. Η κινητικότητα μεταξύ της ASN - GW και του HA αντιμετωπίζεται με το πρωτόκολλο Proxy Mobile IP.

**WiMAX BS:** Ένα WiMAX BS μπορεί δυνητικά να συνδεθεί με οποιαδήποτε ASN - GW που μπορεί να φτάσει μέσω IP συνδεσιμότητας (flex R6) . Αυτή η ευελιξία βοηθά στη μείωση της κινητικότητας που σχετίζεται με τη σηματοδότηση στο δίκτυο, καθώς το ASN - GW μπορεί να εξυπηρετήσει την ενεργή συνεδρία IP του χρήστη, ενώ ο χρήστης μετακινείται σε αρκετές διαφορετικές BSs (π.χ. ASN - GW μετεγκατάσταση απαιτείται σπάνια). Η διεπαφή R8 μπορεί να διευκολύνει τη μεταφορά περιεχομένου και τη βελτιστοποίηση διαπομπής όταν ο χρήστης μετακινείται από ένα BS σε άλλο. Η ταυτοποίηση στο Mobile WiMAX πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας το πλαίσιο EAP, όπως φαίνεται στην Εικόνα 15. Στην προδιαγραφή IEEE 802.16, οι ανταλλαγές EAP μεταφέρονται μεταξύ των MS και BS μέσω Privacy Key Management (PKMv2) MAC μηνυμάτων.



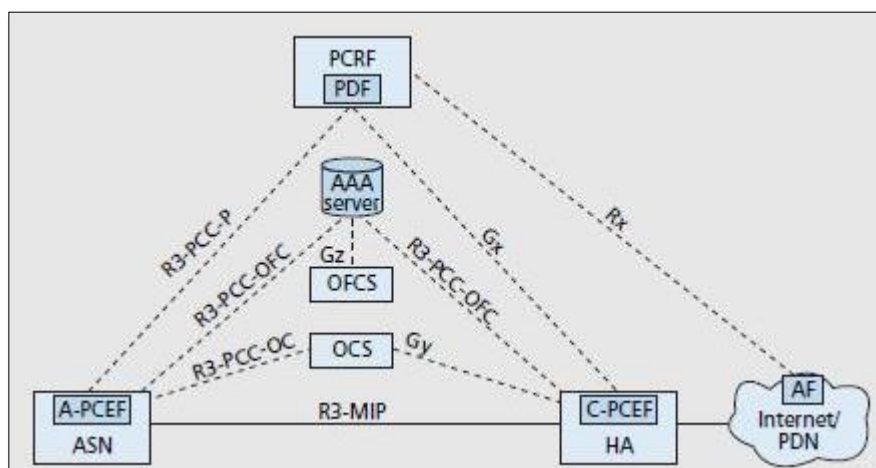
Εικόνα 15: Mobile WiMAX authentication framework [4]

**AAA Server:** Τα προφίλ QoS του χρήστη και οι σχετικοί κανόνες πολιτικής αποθηκεύονται στο AAA server. Οι πληροφορίες QoS του χρήστη μεταφορτώνονται σε ένα SFA στην είσοδο του δικτύου ως μέρος της ταυτοποίησης και της διαδικασίας έγκρισης. Η SFA στη συνέχεια αξιολογεί τα εισερχόμενα αιτήματα υπηρεσιών σε σύγκριση με το προφίλ χρήστη που έχει μεταφορτώσει για να καθορίσει το χειρισμό. Εναλλακτικά, ο AAA server μπορεί να παρέχει στο PF τις QoS

πληροφορίες που σχετίζονται με τον συνδρομητή. Στην περίπτωση αυτή, το PF καθορίζει πως διεκπεραιώνονται οι εισερχόμενες ροές εξυπηρέτησης.

Η **κινητικότητα** στο WiMAX ενεργοποιείται από τα σημεία αναφοράς R6, R4, R8, και το R3 (Εικόνα 14). Τα διάφορα σενάρια κινητικότητας μπορεί να υποστηριχθούν, συμπεριλαμβανομένων ενδο-ASN-GW, μεταξύ ASN-GW, και anchored κινητικότητας CSN. Το σενάριο κινητικότητας anchored CSN είναι μια προαιρετική επιλογή ανάπτυξης για τις επιχειρήσεις. Καθώς τα MSs διασχίζουν BSs, μπορεί να σταθεροποιηθούν σε μια συγκεκριμένη ASN-GW, και η κινητικότητα μπορεί να διαχειρισθεί εντός της ASN-GW. Υπάρχουν και άλλα σενάρια όπου χρειάζεται να χειρισθούν οι πελάτες σε διάφορα ASN-GWS μέσω πλευρικών μεταβιβάσεων περιεχομένου από το R4.

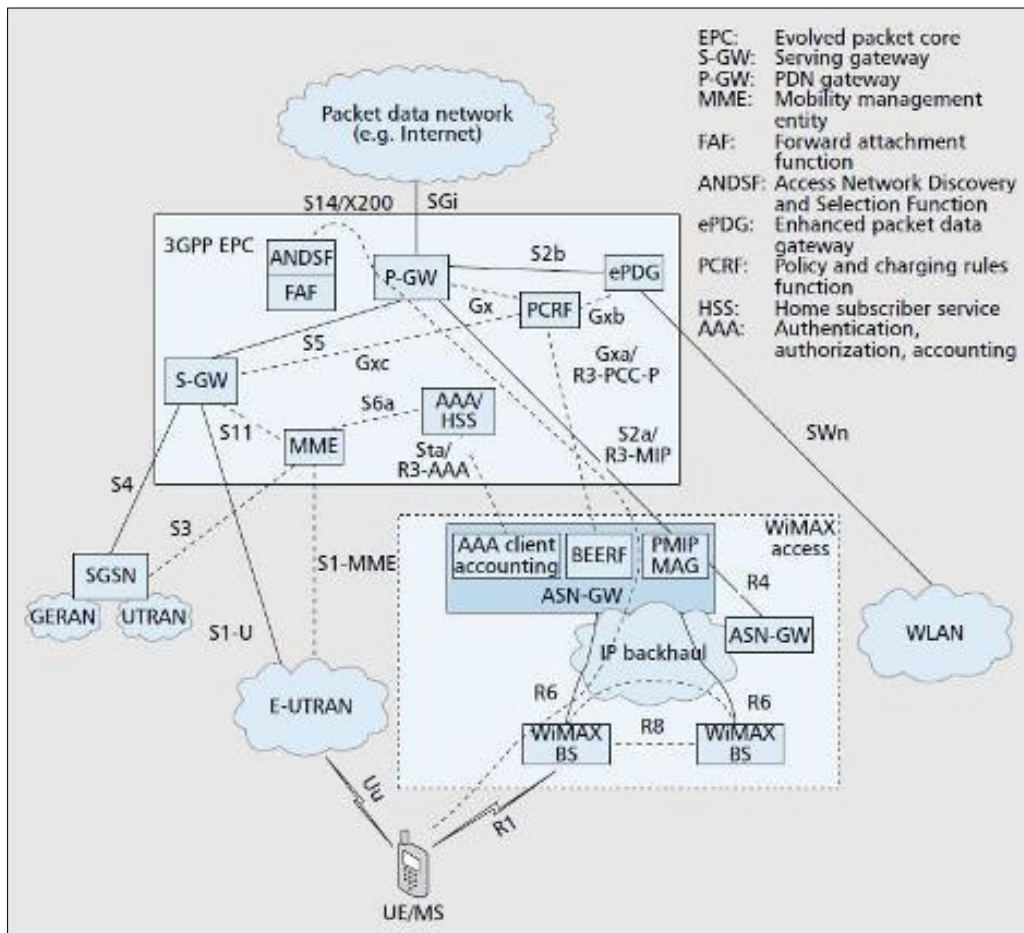
Το **QoS** στο mobile WiMAX διαχειρίζεται μέσα από πολλαπλές ροές υπηρεσιών για να επιτευχθούν οι διαφοροποιημένες υπηρεσίες. Για να επιτευχθεί η δυναμική QoS εξουσιοδότηση και επιβολή, η ASN-GW και το WiMAX HA θα μπορούσε να κάνει χρήση ενός πλαισίου ανταλλαγής πολιτικών πως παρέχεται από την αρχιτεκτονική ελέγχου πολιτική και χρέωσης (PCC).



Εικόνα 16: Mobile WiMAX PCC Αρχιτεκτονική [4]

Στις υλοποιήσεις για ενοποίηση με άλλα δίκτυα ένα νέο στοιχείο δικτύου που ονομάζεται **forward attachment function (FAF)** [6] έχει εισαχθεί. Είναι μια λογική οντότητα του σταθμού βάσης (BS) που βρίσκεται στον στόχο πρόσβασης. Μια λογική οντότητα σημαίνει ότι η FAF δεν παρέχει καμία ασύρματη σύνδεση, αλλά επικοινωνεί με τον εξοπλισμό χρήστη (UE) μέσω IP

σήραγγας. Δεδομένου ότι θεωρείται ως ένα κανονικό BS στο δίκτυο, δεν απαιτεί οποιεσδήποτε τροποποιήσεις σε υπάρχοντα συστήματα. Η FAF επιτρέπει IP-based παράδοση με τη χρήση proxy mobile IPv6 (PMIPv6) λειτουργικότητα και τη θέσπιση ενός IP tunnel προς την UE. Παρέχει επίσης τη λειτουργικότητα που επικυρώνει την UE στο στόχο πρόσβασης πριν από την εκτέλεση του VHO. Ανάλογα με τον τύπο του στόχου πρόσβασης, η FAF μιμείται τις λειτουργίες BS των διαφόρων δικτύων. Η FAF εκτελεί τις λειτουργίες του WiMAX BS όταν το UE κινείται προς μια κυψέλη WiMAX, ή μπορεί επίσης να αποδώσει ως ένας ελεγκτής ραδιο δικτύου 3GPP (RNC) NodeB ή εξελιγμένο NodeB (ENB) εάν ο στόχος είναι 3GPP UTRAN ή E-UTRAN. Παρά το γεγονός ότι η FAF μπορεί να περιλαμβάνει λειτουργίες από οντότητες υψηλότερου επιπέδου, όπως η WiMAX ASN-GW, είναι σωστό να εξετάζεται η FAF ως BS-επιπέδου λογική οντότητα, δεδομένου ότι μόνο οι οντότητες BS-επιπέδου έχουν τις λειτουργίες για να επικοινωνούν απευθείας με τον UE.



Εικόνα 17: Ενοποιημένη αρχιτεκτονική δικτύου για mobile WiMAX and 3GPP [6]

Ένα νέο στοιχείο δικτύου που ονομάζεται **data forwarding function (DFF)** [6] εισάγεται για την επίλυση των προβλημάτων της απώλειας δεδομένων και την ανώμαλη αποσύνδεση από αρχικό δίκτυο. Το DFF μπορεί να θεωρηθεί ως αντιστάθμισμα της FAF λόγω του ότι η DFF επιλύει τα προβλήματα διασυνδεσιμότητας στο πηγαίο δίκτυο, ενώ το FAF κάνει το ίδιο όσον αφορά τον στόχο πρόσβασης. Η DFF Επικοινωνεί με τον UE μέσω IP σήραγγας. Η DFF περιλαμβάνει τις BS-επιπέδου λογικές λειτουργίες των διαφόρων δικτύων, ανάλογα με τον τύπο των πρωτοκόλλων πρόσβασης της πηγής. Για παράδειγμα, το DFF προσομοιώνει ένα BS WiMAX, όταν το UE βρίσκεται στην πρόσβαση WiMAX. Το DFF μπορεί να περιλαμβάνει τη λειτουργικότητα ενός RNC/NodeB στο UTRAN ή εκείνη του ENB στο E-UTRAN. Η DFF χειρίζεται τη διαβίβαση δεδομένων από την BS πηγή στο FAF. Επίσης, διαχειρίζεται τη διαγραφή και την απελευθέρωση των πόρων της UE μετά την διαπομπή

#### 4. WLAN

Ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο (WLAN) [10] συνδέει δύο ή περισσότερες συσκευές που χρησιμοποιούν κάποια μέθοδο ασύρματης διανομής (συνήθως εξάπλωση φάσματος ή OFDM ραδιοσήματα), και συνήθως παρέχουν μια σύνδεση μέσω ενός σημείου πρόσβασης στο ευρύτερο διαδίκτυο. Αυτό δίνει στους χρήστες τη δυνατότητα να μετακινούνται μέσα σε μια τοπική περιοχή κάλυψης και ακόμα να είναι συνδεδεμένοι με το δίκτυο. Τα περισσότερα σύγχρονα δίκτυα WLAN λειτουργούν με βάση το πρότυπο IEEE 802.11, που διατίθενται στο εμπόριο με την ονομασία Wi-Fi. Το βασικό πρότυπο IEEE 802.11, το οποίο καθορίζει τα πρωτόκολλα WLAN, πλαίσια δεδομένων, διάφορα στρώματα, καθώς και συχνότητες

Ένα παραδοσιακό δικτύου WLAN περιλαμβάνει APs, κάρτες διασύνδεσης δικτύου (NIC) ή προσαρμογείς πελάτη, γέφυρες, αναμεταδότες και τις κεραίες. Επιπλέον περιλαμβάνει έναν AAA server για την ταυτοποίηση, εξουσιοδότηση και τη χρέωση (ειδικά έναν Remote Address Dial-In User Service [RADIUS] server), διακομιστή διαχείρισης δικτύου (NMS) και ασύρματους δρομολογητές, θεωρούνται ως τμήμα ενός WLAN δικτύου. Μερικά πιο αναλυτικά συστατικά του WLAN είναι :

**Σημείο πρόσβασης - access point(AP):** Ένα AP λειτουργεί μέσα σε ένα συγκεκριμένο φάσμα συχνοτήτων και χρησιμοποιεί τεχνική διαμόρφωσης του πρότυπου 802.11. Ενημερώνει επίσης τους πελάτες του ασύρματου δικτύου για τη διαθεσιμότητα και κάνει έλεγχο ταυτότητας στους ασύρματους πελάτες στο ασύρματο δίκτυο. Ένα AP συντονίζει επίσης τη χρήση των ασύρματων πελατών των ενσύρματων πόρων.

**NIC ή προσαρμογέας πελάτη:** Ένας υπολογιστής ή σταθμός εργασίας χρησιμοποιεί ένα ασύρματο NIC ή προσαρμογέα πελάτη να συνδεθεί στο ασύρματο δίκτυο. Το NIC σαρώνει το

διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων για τη σύνδεση και το συσχετίζει με ένα AP ή άλλο ασύρματο πελάτη. Το NIC είναι συζευγμένο με τον υπολογιστή ή το λειτουργικό σύστημα του σταθμού εργασίας (OS) με τη χρήση ενός λογισμικού προγράμματος οδήγησης.

**Κεραία:** Μια κεραία ακτινοβολεί το διαμορφωμένο σήμα μέσω του αέρα, έτσι ώστε οι πελάτες του ασύρματου δικτύου να μπορούν να το παραλάβουν. Τα χαρακτηριστικά μιας κεραίας ορίζονται από το μοτίβο μετάδοσης (κατευθυντική ή όχι), το κέρδος, την ισχύ μετάδοσης και ούτω καθεξής. Οι κεραίες που απαιτούνται για τα APs, γέφυρες, και τους πελάτες.

**AAA Server:** Οι υπηρεσίες AAA απαιτούνται για την ασφάλεια ενός δικτύου WLAN. Ο διακομιστής AAA χρησιμοποιείται για τον έλεγχο ταυτότητας του χρήστη και του διαχειριστή σε ένα δίκτυο WLAN. Ο διακομιστής AAA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περάσει κάποια πολιτική, όπως εικονικά LAN (VLAN) και SSID για τους πελάτες, να χορηγήσει διαφορετικά επίπεδα δικαιωμάτων για χρήστες με δικαιώματα διαχειριστή, και να δημιουργήσει δυναμικά κλειδιά κρυπτογράφησης για WLAN χρήστες. Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά τιμολόγησης ενός εξυπηρετητή AAA μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση των δραστηριοτήτων των χρηστών WLAN.

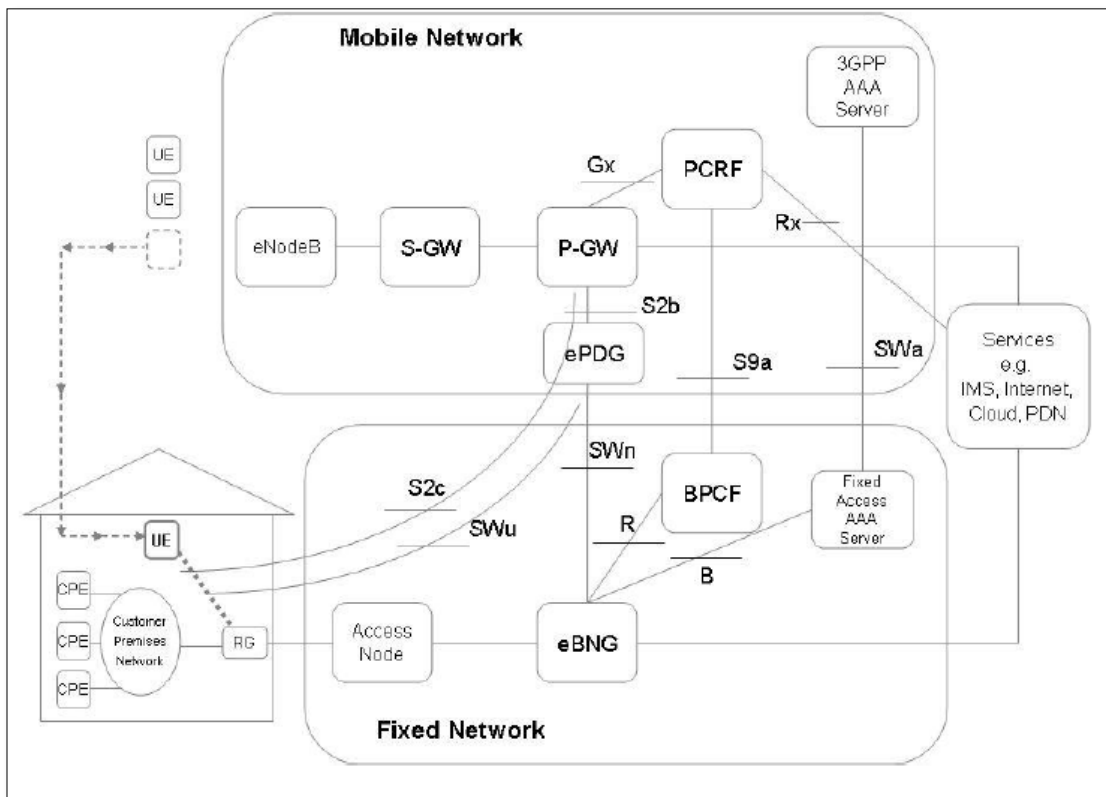
**Διακομιστής διαχείρισης δικτύου (NMS):** Το NMS είναι απαραίτητο για να διευκολύνει την πολυπλοκότητα της εγκατάστασης και διαχείρισης των μεγάλων δικτύων WLAN. Τα NMS θα πρέπει να υποστηρίζουν τη διαχείριση υλικού/λογισμικού, τη διαχείριση της ρύθμισης, έλεγχο της απόδοσης σε ένα δίκτυο WLAN. Επιπλέον παρέχει πρόσθετες δυνατότητες για τη διαχείριση του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων σε WLAN δίκτυο μιας επιχείρησης.

#### 4.1 Αρχιτεκτονική για τη διασύνδεση WLAN με LTE

Για το 3GPP η διασύνδεση του LTE και του WLAN [8] ήταν από την αρχή ένας πολύ σημαντικός στόχος προκειμένου να υλοποιηθούν τα ασύρματα πολυμέσα και άλλες υπηρεσίες υψηλού ρυθμού δεδομένων για τους συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας. Ένα τερματικό LTE μπορεί να έχει πρόσβαση σε υπηρεσίες δεδομένων υψηλού εύρους ζώνης, όπου προσφέρεται WLAN κάλυψη, ενώ έχει πρόσβαση σε δίκτυα ευρείας περιοχής, χρησιμοποιώντας το LTE σε άλλα μέρη. Για να προσφέρουμε λύσεις αποτελεσματικής πολλαπλής πρόσβασης, χρειαζόμαστε μια ολοκληρωμένη λύση που να παρέχει απρόσκοπτη κινητικότητα μεταξύ αυτών των τεχνολογιών πρόσβασης, επιτρέποντας τη συνέχεια των υφιστάμενων συνεδριών. Η διασύνδεση LTE/WLAN υπόσχεται να προσφέρει αυτές τις δυνατότητες απρόσκοπτα. Το 3GPP έχει καθορίσει μια αρχιτεκτονική για τη συνεργασία μεταξύ LTE και μη-3GPP δικτύων, χαρακτηρίζοντας τα μη-3GPP δίκτυα ως αξιόπιστα και μη αξιόπιστα δίκτυα. Στο πλαίσιο της διασύνδεσης LTE/WLAN, το 3GPP θεωρεί το WLAN ως μη αξιόπιστο δίκτυο, δεδομένου ότι κάνει χρήση μη αδειοδοτημένου ραδιοφάσματος. Αυτός είναι ο λόγος που κατά την ενσωμάτωση

αυτών των δύο τεχνολογιών, πιο λειτουργικές οντότητες πρέπει να προστεθούν προκειμένου να ενισχυθεί ο μηχανισμός ασφαλείας μεταξύ τους. Τα στοιχεία του δικτύου που προστίθεται στο δίκτυο WLAN είναι μια Access πύλη WLAN (WAG) και μια πύλη Packet Data (PDG).

Η WAG επιτρέπει σε ένα δίκτυο LTE να δημιουργήσει πληροφορίες χρέωσης για τους χρήστες που έχουν πρόσβαση μέσω του δικτύου πρόσβασης WLAN, στην περίπτωση περιαγωγής. Το WAG φιλτράρει τα πακέτα που βασίζονται σε μη κρυπτογραφημένη πληροφορία στα πακέτα. Η PDG αποδέχεται ή απορρίπτει το ζητούμενο WLAN access point name (W-APN), σύμφωνα με την απόφαση που ελήφθη από τον 3GPP AAA server. Η PDG συμπεριφέρεται ουσιαστικά ως πύλη υποστήριξης GPRS (GGSN) για τους χρήστες WLAN. Μπορεί να χρησιμοποιήσει Wi - Fi hotspots για να βοηθήσει τη διασύνδεση μεταξύ LTE και WLAN. Στην περίπτωση αυτή, η διασυνεργασία μπορεί να παρέχει την καλύτερη ασφάλεια και την κινητικότητα, αλλά οι φορείς εκμετάλλευσης κινητών επικοινωνιών πρέπει να επενδύσουν σε ένα μεγάλο αριθμό Wi - Fi hotspots, για να εξασφαλίσουν μια καλή εμπειρία για το χρήστη.



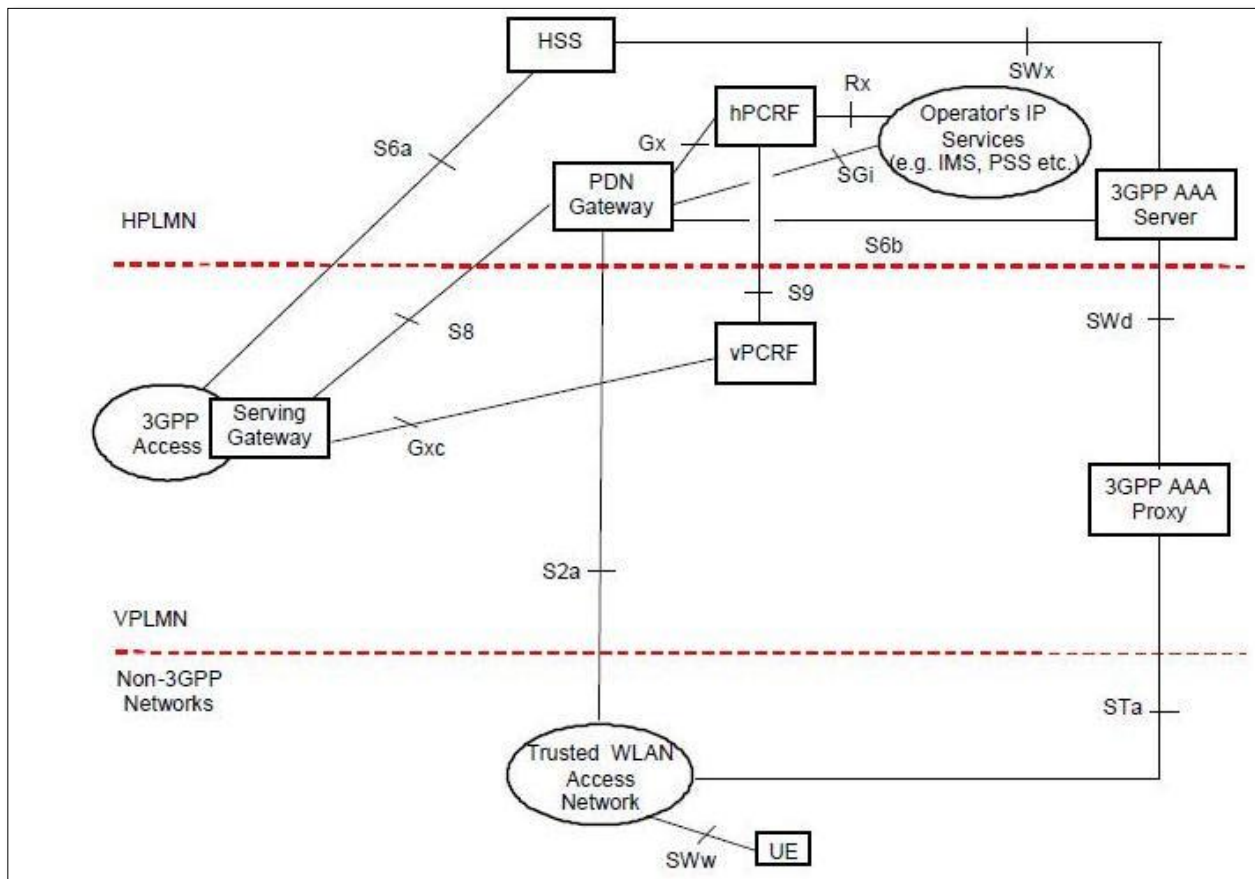
Δ

Εικόνα 18: Αρχιτεκτονική διασύνδεσης με μη αξιόπιστο WLAN [9]

Το UE έχει πρόσβαση στο P-GW απευθείας μέσω του χειριστή ανήκει Wi - Fi hotspot, χρησιμοποιώντας την διεπαφή S2a. Το UE έχει πρόσβαση στο P-GW μέσω του EPDG

χρησιμοποιώντας το SWN (προς μη 3GPP δίκτυα) και S2b διασυνδέσεις. Το UE πρέπει να διαμορφώσει μια ασφαλή σήραγγα, με τον EPDG μέσα από το μη αξιόπιστο δίκτυο WLAN μέσω της διασύνδεσης SWU (προς το UE). Η διεπαφή SWn [9] ορίζεται μεταξύ του EPDG και eBNG και χρησιμοποιείται μόνο για να μεταφέρει την κίνηση IP μεταξύ του eBNG και EPDG. Σημειώστε ότι ακόμη και αν αυτές οι διαδικασίες που περιγράφονται για "μη αξιόπιστη πρόσβαση», υποθέτουμε ότι υπάρχει μία επιχειρηματική συμφωνία και η σχέση εμπιστοσύνης μεταξύ του παρόχου πρόσβασης BBF και του παρόχου 3GPP Evolved Packet Core, προκειμένου να καταστεί δυνατή, για παράδειγμα, η πολιτική διασυνεργασία.

Όταν το WLAN θεωρείται αξιόπιστο από τον φορέα εκμετάλλευσης, το Trusted WLAN Access Network (Twan) [11] διασυνδέεται με την EPC ως αξιόπιστη μη 3GPP πρόσβαση μέσω της διεπαφής STa στο 3GPP AAA Server/Proxy και της διασύνδεσης S2a στο PDN GW.



Εικόνα 19: Αρχιτεκτονική περιαγωγής για πρόσβαση του Trusted WLAN στο EPC[11]

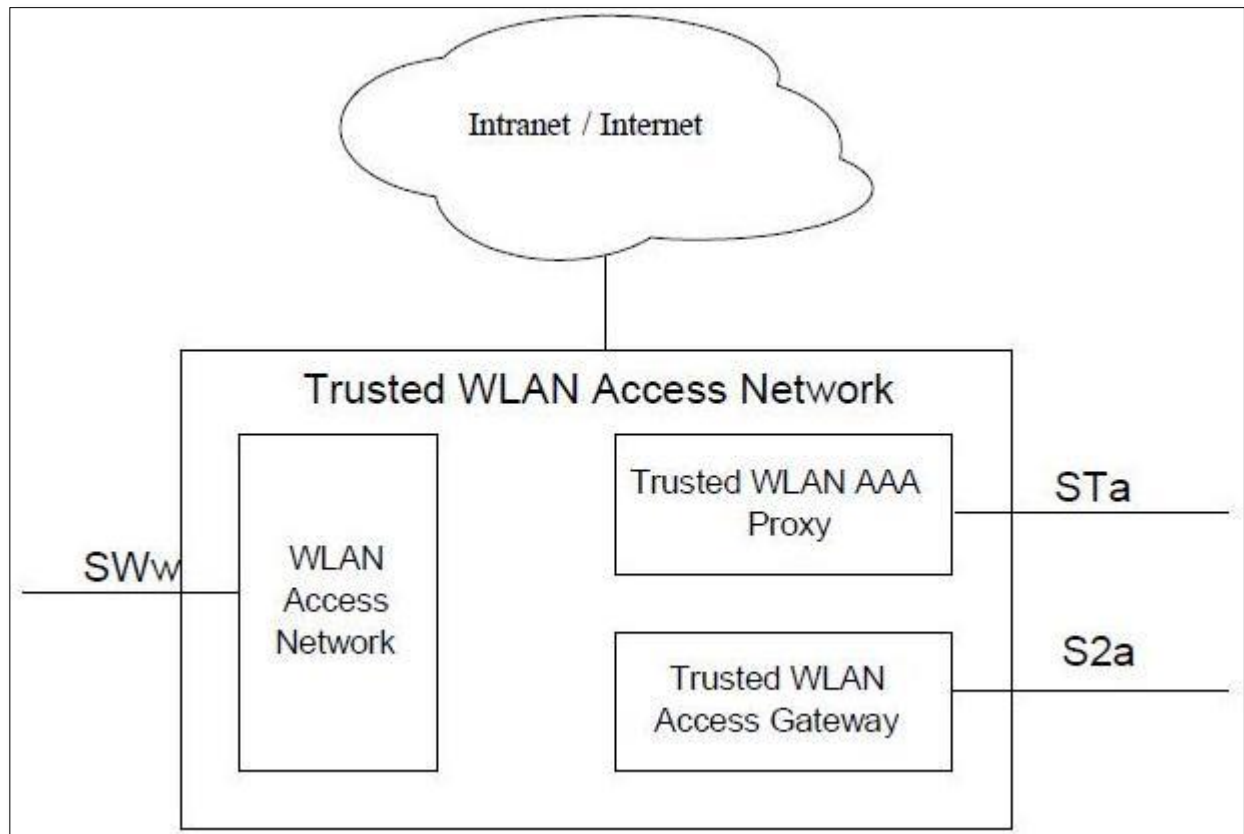
Ένα Trusted WLAN Access Network (TWAN) περιλαμβάνει τις εξής οντότητες [11]:

**Δίκτυο WLAN Access (WLAN AN):** Ένα WLAN AN περιλαμβάνει μια συλλογή από ένα ή περισσότερα σημεία πρόσβασης WLAN. Ένα σημείο πρόσβασης καθορίζει τη UE WLAN IEEE 802.11 σύνδεση, που ορίζεται στο IEEE Std 802.11-2007.

**Μια αξιόπιστη WLAN πύλη πρόσβασης(TWAG):** Αυτή η λειτουργία καθορίζει το S2a. Επίσης, λειτουργεί ως προεπιλεγμένο δρομολογητής για το UE στη ζεύξη πρόσβασης του , και ως DHCP server για το UE. Όταν η Twaan παρέχει πρόσβαση στο EPC για μια UE, προωθεί πακέτα μεταξύ της UE - TWAG point to point σύνδεσης και της σήραγγας S2a για την εν λόγω UE. Η συσχέτιση στην Twaan μεταξύ UE - TWAG point to point σύνδεσης και S2a σήραγγας βασίζεται στη UE MAC διεύθυνση.

**Trusted WLAN AAA Proxy (TWAP):** Αυτή η λειτουργία καθορίζει το STa. Αναμεταδίδει τις πληροφορίες AAA μεταξύ του WLAN Access Network και του διακομιστή 3GPP AAA ή Proxy στην περίπτωση της περιαγωγής. Καθιερώνει τη συσχέτιση των δεδομένων εγγραφής UE (συμπεριλαμβανομένου του IMSI) με τη διεύθυνση MAC UE στο δίκτυο WLAN Access. Παρέχει στο TWAG τα δεδομένα εγγραφής UE κατά την αρχική σύνδεση ή σε τυχόν τροποποίηση των δεδομένων εγγραφής.





Εικόνα 20: Trusted WLAN Access Network [11]

## 5. Διαπομπή (Handover)

Στα κυψελωτά συστήματα, όταν μία κινητή συσκευή βρίσκεται σε κίνηση και απομακρύνεται από την περιοχή εμβέλειας μιας κυψέλης με την οποία είναι συνδεδεμένη και ανταλλάσσει δεδομένα, για να διασφαλίζεται η συνέχεια στην επικοινωνία, θα πρέπει κάποια στιγμή η κινητή συσκευή να αποσυνδεθεί από την τρέχουσα κυψέλη και να συνδεθεί με κάποια νέα, η οποία παρέχει καλύτερης ποιότητας σήμα. Στην περίπτωση αυτή είναι απαραίτητο να λάβει χώρα η διαδικασία που είναι γνωστή ως διαπομπή (handover, handoff) και μάλιστα με τέτοιο

τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η άρτια μεταφορά δεδομένων χωρίς απώλειες. Για να είναι δυνατή η απρόσκοπτη διατήρηση της επικοινωνίας, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η συνεχής ανταλλαγή δεδομένων και πληροφοριών μεταξύ κινητών συσκευών και σταθμών βάσης. Για την υλοποίηση οποιουδήποτε μηχανισμού handover πρέπει να υποστηρίζεται και να υλοποιείται από τις κινητές συσκευές η αποστολή πληροφοριών που προσδιορίζουν τη θέση τους, γεγονός που διασφαλίζεται με τη συνεχή αποστολή μηνυμάτων. Πρακτικά, αυτό που κάνουν συνήθως οι κινητές συσκευές είναι να καταγράφουν την ισχύ των παρακείμενων σταθμών μετάδοσης, ώστε να μπορούν να επιλεγούν οι πλέον ενδεδειγμένοι υποψήφιοι σταθμοί για να υλοποιήσουν οποιοδήποτε αίτημα επικοινωνίας.

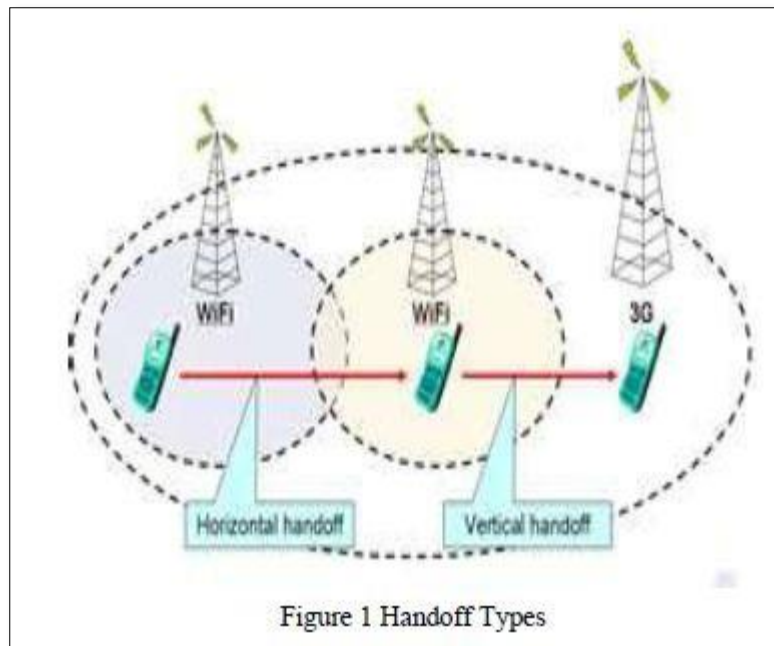
Τα τελευταία χρόνια, τα κινητά τερματικά (MT) [19] είναι εξοπλισμένα με πολλαπλές διασυνδέσεις και μπορούν να έχουν πρόσβαση σε ένα ευρύ φάσμα των εφαρμογών που παρέχονται από πολλαπλά ασύρματα δίκτυα σε μια Always Best Connected λειτουργία (ABC). Για να επιτευχθεί η πρόσβαση στις υπηρεσίες επικοινωνίας οποιαδήποτε στιγμή, οποιαδήποτε με την καλύτερη Quality of Service (QoS) και με ελάχιστο κόστος, ένα ετερογενές σύστημα ασύρματης επικοινωνίας είναι μια καλύτερη λύση. Πολλά ασύρματα δίκτυα όπως το Bluetooth, WiFi, WiMax, GPRS και CDMA έχουν εξελιχθεί. Κάθε δίκτυο έχει αναπτυχθεί για συγκεκριμένο σκοπό με διαφορετικά χαρακτηριστικά που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Τα ετερογενή ασύρματα δίκτυα έχουν διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης, επικάλυψη και κάλυψη, άλλη αρχιτεκτονική του δικτύου, πρωτόκολλα για τη μεταφορά, τη δρομολόγηση και τη διαχείριση της κινητικότητας.

Επίσης, διαφορετικοί πάροχοι προσφέρουν διαφορετικές απαιτήσεις υπηρεσιών από τους χρήστες κινητών (φωνή, βίντεο, πολυμέσα, κείμενα) στην αγορά. Λόγω αυτών των διακυμάνσεων, όταν ο κινητός χρήστης κινείται υπάρχει ανάγκη για την διαπομπή του καναλιού επικοινωνίας από το ένα δίκτυο στο άλλο λαμβάνοντας υπόψη τις δυνατότητές του, αλλά και τις απαιτήσεις των χρηστών. Η διαπομπή του καναλιού μεταξύ δύο διαφορετικών δικτύων υλοποιείται με την κάθετη διαπομπή (vertical handover) . Κατά τη διάρκεια της διαπομπής είναι ανάγκη να αποφασίσει και να επιλέξει το καλύτερο δίκτυο, όπως αναφέρεται ανωτέρω.

## 5.1 Κατηγορίες Διαπομπής

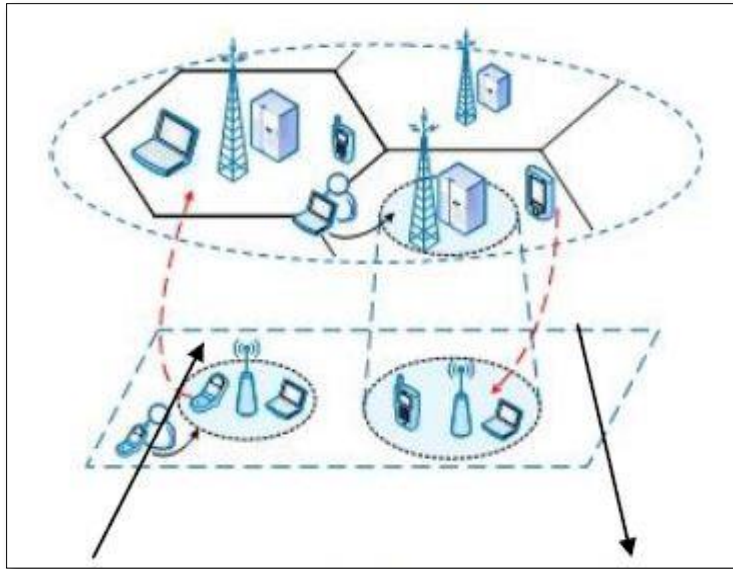
Υπάρχουν διάφοροι διαχωρισμοί κατηγοριών διαπομπής [19] ανάλογα με το δίκτυο πρόσβασης στο οποίο εκτελείται η διαπομπή (vertical ή horizontal), την κατεύθυνση της διαπομπής (Upward και Downward), την διαδικασία της διαπομπής (hard ή soft), τον έλεγχο της διαπομπής (Imperative και Alternative) και ανάλογα με την απόφαση της διαπομπής (Mobile Controlled και Network Controlled).

**Vertical και Horizontal handover:** Στις οριζόντιες μεταπομπές πραγματοποιείται εναλλαγή μεταξύ Σταθμών Βάσης που χρησιμοποιούν κοινή τεχνολογία. Στην κάθετη διαπομπή έχουμε εναλλαγή μεταξύ ετερογενών τεχνολογιών πρόσβασης ασύρματου δικτύου. Δεδομένου ότι το VHO είναι μια ασύμμετρη διαδικασία, το MT (κινητό τερματικό) κινείται μεταξύ δύο διαφορετικών δικτύων με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Έτσι, είναι απαραίτητο να επιλεγεί το καλύτερο δίκτυο που παρέχει υψηλή απόδοση. Η λειτουργία του VHO θα πρέπει να παρέχει μια ελάχιστη επιβάρυνση, την αυθεντικοποίηση των χρηστών κινητής τηλεφωνίας και η σύνδεση θα πρέπει να διατηρηθεί για να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια πακέτων και η καθυστέρηση μεταφοράς.



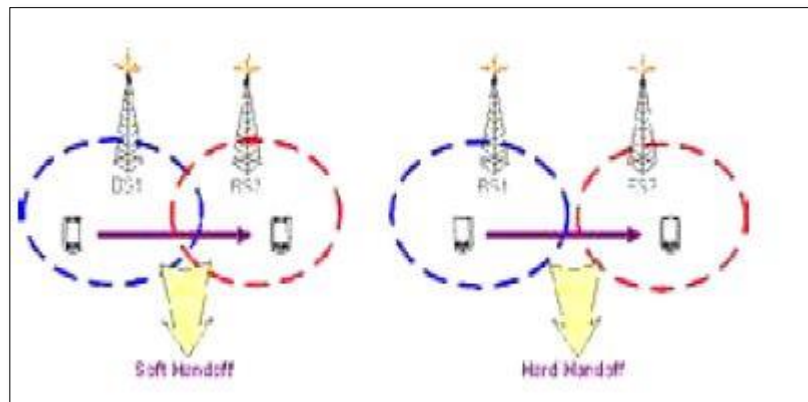
Εικόνα 21: Vertical και Horizontal Handover

**Upward και Downward:** Εάν το κινητό εκτελεί διαπομπή από ένα δίκτυο με μια μικρή κάλυψη σε ένα δίκτυο με μεγαλύτερη κάλυψη, έχουμε το λεγόμενο upward handover. Από την άλλη πλευρά, όταν μια διαπομπή λαμβάνει χώρα κατά την αντίστροφη κατεύθυνση, δηλαδή από ένα δίκτυο με μεγαλύτερη κάλυψη σε ένα δίκτυο με μικρότερη κάλυψη έχουμε το λεγόμενο downward handover.



Εικόνα 22: Upward και Downward handover [19]

**Hard και Soft:** Όταν το κινητό εκτελεί την διακοπή μόνο αφού έχει αποσυνδεθεί από το αρχικό δίκτυο, έχουμε το λεγόμενο hard handover ή break before make, ακριβώς γιατί η επικοινωνία διακόπτεται πριν αποκατασταθεί το κανάλι επικοινωνίας με το νέο σταθμό βάσης. Οι περιπτώσεις στις οποίες βρίσκει εφαρμογή το σκληρό handover, παρά το γεγονός ότι ενδέχεται να θέσει σε κίνδυνο την ποιότητα της επικοινωνίας, είναι αυτές κατά τις οποίες το δίκτυο της υπάρχουσας σύνδεσης και το δίκτυο της νέας σύνδεσης δεν είναι συμβατά και διαφέρουν σημαντικά ως προς τα χαρακτηριστικά διασύνδεσης και τις υποκείμενες τεχνολογίες. Άλλη περίπτωση κατά την οποία χρησιμοποιούνται τα σκληρά handovers είναι όταν πρόκειται για ενδοκυψελικές (intracellular) μεταπομπές. Στο soft handover το κινητό τερματικό διατηρεί τη σύνδεση με το προηγούμενο σταθμό βάσης μέχρι η επικοινωνία του με το νέο σταθμό βάσης να έχει ολοκληρωθεί. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται επίσης και make before break. Το soft handover εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που δεν είναι επιθυμητή η ανάληψη κινδύνων επιδείνωσης της ποιότητας εξυπηρέτησης (quality of service – QoS).



Εικόνα 23: Hard και Soft handover [19]

**Imperative και Alternative:** Όταν υπάρχει απώλεια της ισχύος του σήματος εκτελείται ένα imperative handover. Από την άλλη πλευρά, ένα alternative handover εκκινεί για να παρέχει στο χρήστη την καλύτερη απόδοση. Για alternative handoffs αρκετές άλλες παράμετροι του δικτύου, όπως το διαθέσιμο εύρος ζώνης, η υποστηριζόμενη ταχύτητα και το κόστος του δικτύου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πέρα από τις παραμέτρους της συσκευής, όπως η ποιότητα της εξυπηρέτησης που απαιτείται από την εφαρμογή και την προτίμηση του χρήστη.

**Mobile Controlled και Network Controlled:** Οι μεταπομπές μπορούν περαιτέρω να ταξινομηθούν με βάση το ποιος ελέγχει την απόφαση για διαπομπή. Όταν η απόφαση για το αν θα πραγματοποιηθεί διαπομπή ή όχι λαμβάνεται από την κινητή συσκευή έχουμε το λεγόμενο Mobile Controlled Handover (MCHO). Η συσκευή αφενός καταγράφει τα δεδομένα και τις πληροφορίες που είναι απαραίτητα για τη λήψη της απόφασης διαπομπής, αφετέρου μπορεί να επιλέξει τον καταλληλότερο σταθμό βάσης μετρώντας και καταγράφοντας την ισχύ και την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος από τους παρακείμενους σταθμούς βάσης, αλλά και τις παρεμβολές που υφίστανται. Στο Network Controlled Handover (NCHO) το δίκτυο αναλαμβάνει τη συλλογή και καταγραφή των απαιτούμενων πληροφοριών και δεδομένων για να αξιολογηθεί αν απαιτείται η εκτέλεση διαπομπής. Αυτό λαμβάνει χώρα για όλες τις κινητές συσκευές που βρίσκονται εντός της εμβέλειάς του εν λόγω δικτύου. Ο έλεγχος της απόφαση διαπομπής μοιράζεται μεταξύ του δικτύου και του κινητού στις περιπτώσεις των Mobile controlled Network Assisted (MCNA) και Network Controlled Mobile Assisted handoffs (NCMA). Οι MCNA μεταπομπές είναι πιο

κατάλληλες, γιατί μόνο οι κινητοί κόμβοι έχουν τη γνώση σχετικά με τις διασυνδέσεις του δικτύου που είναι εξοπλισμένοι και έτσι οι προτιμήσεις των χρηστών και μπορούν να ληφθούν υπόψη.

## 5.2 Φάσεις Διαπομπής

Η διαδικασία του vertical handover μπορεί να χωριστεί σε τρεις επιμέρους βήματα [19], το handover initiation, το handover decision και το handover execution:

**Handover Initiation:** Χρησιμεύει για να εκκινήσει την διαδικασία της διαπομπής, συλλέγει πληροφορίες σχετικά με το δίκτυο από τα διάφορα επίπεδα του δικτύου όπως το επίπεδο εφαρμογής, το επίπεδο μεταφοράς και το επίπεδο σύνδεσης. Αυτά τα στρώματα παρέχουν πληροφορίες, όπως RSS, το εύρος ζώνης, την ταχύτητα σύνδεσης, τη διακίνηση, το jitter, το κόστος, την ενέργεια, τις προτιμήσεις του χρήστη και την εγγραφή στο δίκτυο. Με βάση αυτές τις πληροφορίες η διαπομπή θα ξεκινήσει σε εύθετο χρόνο.

**Handover Decision:** Σε αυτή τη φάση η κινητή συσκευή αποφασίζει εάν η σύνδεση θα συνεχιστεί με το αρχικό δίκτυο πρόσβασης ή πρόκειται να μεταφερθεί σε ένα άλλο. Η απόφαση μπορεί να εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους που έχουν συλλεχθεί κατά τη διάρκεια της μεταβίβασης φάση έναρξης. Η Φάση Απόφασης αποτελεί ίσως την πλέον κρίσιμη φάση της διαδικασίας, αφού τελικά καθορίζει τα κανάλια επικοινωνίας που θα ενεργοποιηθούν και την κυψέλη που θα χρησιμοποιηθεί.

**Handover Execution:** Σε αυτή τη φάση οι υπάρχουσες συνδέσεις πρέπει να αναδρομολογηθούν στο νέο δίκτυο με ομοιογενή τρόπο, υλοποιείται «φυσικά» η διαπομπή με τη σύνδεση της κινητής συσκευής στο νέο δίκτυο πρόσβασης που επιλέχθηκε και την αποσύνδεσή της από το υφιστάμενο, που μέχρι τώρα την εξυπηρετούσε. Για τη «φυσική» υλοποίηση της διαπομπής, χρησιμοποιούνται συνήθως αλγόριθμοι και διαδικασίες επαναδρομολόγησης (rerouting) που μπορεί να διαφοροποιούνται ανάλογα με τον τύπο των μεταδιδόμενων δεδομένων (π.χ. φωνή, δεδομένα, κ.α.), ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή ποιότητα εξυπηρέτησης (QoS). Η φάση αυτή περιλαμβάνει, επίσης, την πιστοποίηση και την αδειοδότηση και τη μεταφορά πληροφοριών του χρήστη.

## 6. EPC Vertical Handover

Η δυνατότητα της παροχής ανεξαρτησίας της κινητικότητας στον συνδρομητή αναδύεται ως ένα βασικό χαρακτηριστικό στο τομέα της κινητής τηλεφωνίας. Μια σημαντική διαφορά μεταξύ του 3G περιβάλλοντος και του Evolved Packet Core (EPC) [12], το οποίο όπως αναλύσαμε προορίζεται για την τεχνολογία 4G, είναι η δυνατότητα της ενσωμάτωσης μη-3GPP τεχνολογιών πρόσβασης, όπως WLAN και WiMAX σε 3GPP τεχνολογίες και συνεπώς, να παρέχουν πρόσβαση σε Packet Data Δίκτυα (PDNs). Η ένταξη των μη-3GPP τεχνολογιών πρόσβασης στο EPC σε συνδυασμό με την κινητικότητα παρέχει μια νέα σειρά από ευκαιρίες και προκλήσεις που σχετίζονται με την διαπομπή μεταξύ των συστημάτων. Δεδομένου ότι η ανάπτυξη του δικτύου πηγαίνει προς την κατεύθυνση των 4G δικτύων, τα δίκτυα πρόσβασης είναι αρκετά γρήγορα για να εξυπηρετήσουν υπηρεσίες σε πραγματικό χρόνο αλλά παράλληλα η κινητικότητα πρέπει να υποστηρίζεται εξίσου αποτελεσματικά.

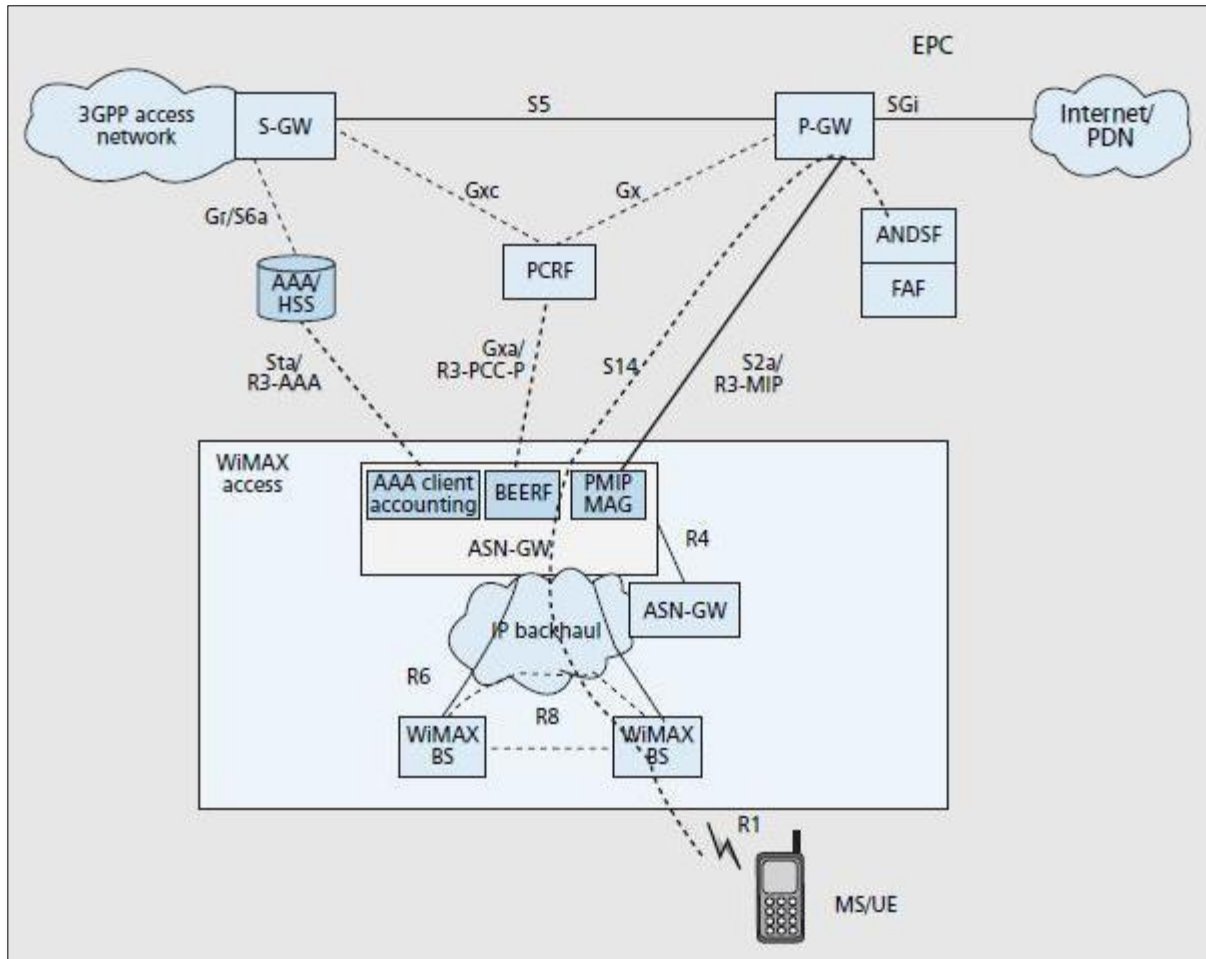
Οι πρόσφατες κινητές συσκευές [6] ενσωματώνουν πολλαπλές διεπαφές δικτύου. Οι χρήστες θέλουν οι συσκευές τους να είναι συνδεδεμένες με το δίκτυο οποιαδήποτε στιγμή και οπουδήποτε. Είναι ιδιαίτερα πιθανό ένας χρήστης να αλλάξει σύνδεση με ένα άλλο δίκτυο ιδιαίτερα για χρήστες που εγκαταλείπουν την περιοχή εξυπηρέτησης του υφιστάμενου δικτύου, όπου η διαπομπή πρέπει να εκτελεσθεί απρόσκοπτα, έτσι ώστε οι εξελισσόμενες συνεδρίες των υπηρεσιών να μην διακόπτονται. Η λειτουργία της διαπομπής όχι μόνο απαιτεί την εναλλαγή των διασυνδέσεων εντός μιας συσκευής, αλλά περιλαμβάνει επίσης την απρόσκοπτη αναδιάρθρωση των δικτύων υποστήριξης.

Η απρόσκοπτη κινητικότητα [4] μπορεί να επιτευχθεί επιτρέποντας στα κινητά τερματικά για τη διεξαγωγή απρόσκοπτων μεταπομπών κατά μήκος mobile WiMAX και 3GPP δικτύων πρόσβασης, μεταφέροντας απρόσκοπτα τις συνεχιζόμενες συνεδρίες τους από το ένα σημείο πρόσβασης στο άλλο. Μια συνεχής και αδιάκοπη διαπομπή χαρακτηρίζεται συνήθως από δύο απαιτήσεις επιδόσεων:

- Η καθυστέρηση της διαπομπής δεν πρέπει να είναι περισσότερη από μερικές εκατοντάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου.
- Τα QoS που παρέχονται από τα συστήματα πρόσβασης στην πηγή και τον στόχο θα πρέπει να είναι σχεδόν ταυτόσημα ώστε διατηρήσουν την ίδια εμπειρία επικοινωνίας.

Το 3GPP Evolved Packet Core εκθέτει, IP-based διασυνδέσεις προς μη - 3GPP δίκτυα πρόσβασης (π.χ. το mobile WiMAX). Στην Εικόνα 21 παρουσιάζονται οι λογικές διεπαφές που συνδέουν το Mobile WiMAX και το 3GPP EPC. Σημειώνουμε ότι η αρχιτεκτονική αυτή βασίζεται

σε μεγάλο βαθμό στις προδιαγραφές που καθορίζονται από το 3GPP αλλά διαθέτει επίσης κάποιες βελτιώσεις, προκειμένου να στηρίξει τους βελτιστοποιημένους μηχανισμούς διαπομπής.



Εικόνα 24: Αρχιτεκτονική για την ενσωμάτωση του WiMAX στο 3GPP evolved packet network [4]

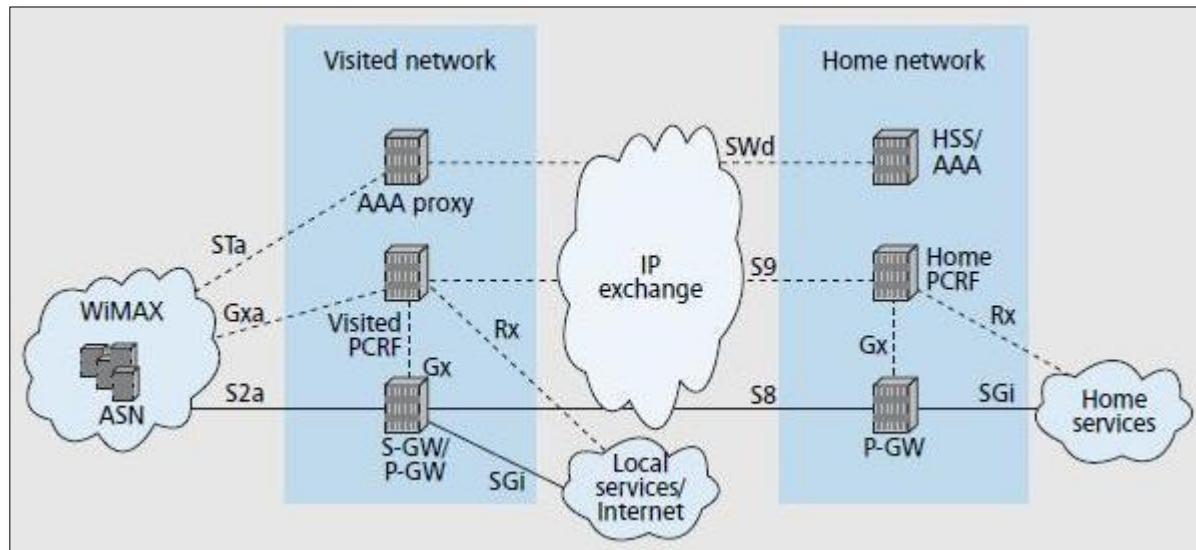
Υπάρχουν τέσσερις μεγάλες λογικές διεπαφές [4] που έχουν αναπτυχθεί:

- **3GPP STa** (ισοδύναμο του WiMAX R3 - Interface AAA): Χρησιμοποιείται για AAA - based έλεγχο ταυτότητας του εξοπλισμού των χρηστών (UE) και επιβολή του προρυθμισμένου QoS



- **3GPP GXA** (ισοδύναμο του WiMAX R3 - PCCP): Χρησιμοποιείται για την εκτέλεση δυναμικών QoS και των κανόνων χρέωσης
- **3GPP S2a** (ισοδύναμο του WiMAX R3 - MIP): Χρησιμοποιείται για τη κινητικότητα στο layer 3 και στον κομιστή προς τον πυρήνα του δικτύου.
- **3GPP S14**: Χρησιμοποιείται για την ανακάλυψη και επιλογή δίκτυο ανεξάρτητα από την τεχνολογία που χρησιμοποιείται και για τη διευκόλυνση της βελτιστοποιημένης WiMAX - 3GPP διαπομπής (η τελευταία ικανότητα είναι μια επέκταση της λογικής διεπαφής S14).

Η αρχιτεκτονική περιαγωγής για WiMAX-3GPP ολοκλήρωση δείχνεται στην Εικόνα 25 και υποστηρίζει interoperator περιαγωγή, η οποία είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που επιτρέπει στους παρόχους να επεκτείνουν την κάλυψη σε περιφερειακό και σε παγκόσμιο επίπεδο.



Εικόνα 25: WiMAX αρχική είσοδος στο δίκτυο μέσω EPC[4]

Το EPC 3GPP επιτρέπει διεπαφές περιαγωγής για την ανταλλαγή των πολιτικών των παρόχων (S9), ανταλλαγές ταυτότητας (SWD), δρομολόγηση της κυκλοφορίας των χρηστών στον οικείο φορέα (S8), ή τη δρομολόγηση της κυκλοφορίας των χρηστών στο δίκτυο επίσκεψης (αυτό ονομάζεται local breakout, LBO) για την πρόσβαση σε τοπικές υπηρεσίες ή το Διαδίκτυο. Για ευρυζωνική κίνηση του Διαδικτύου είναι πιο αποδοτικό να δρομολογείται η κίνηση προς το Internet στο δίκτυο επίσκεψης (LBO) για να αποφευχθεί η δαπανηρή μεταφορά δεδομένων μεταξύ παρόχων.

## 6.1 Βελτιστοποιημένη Αρχιτεκτονική VHO μεταξύ WiMAX και 3GPP Access

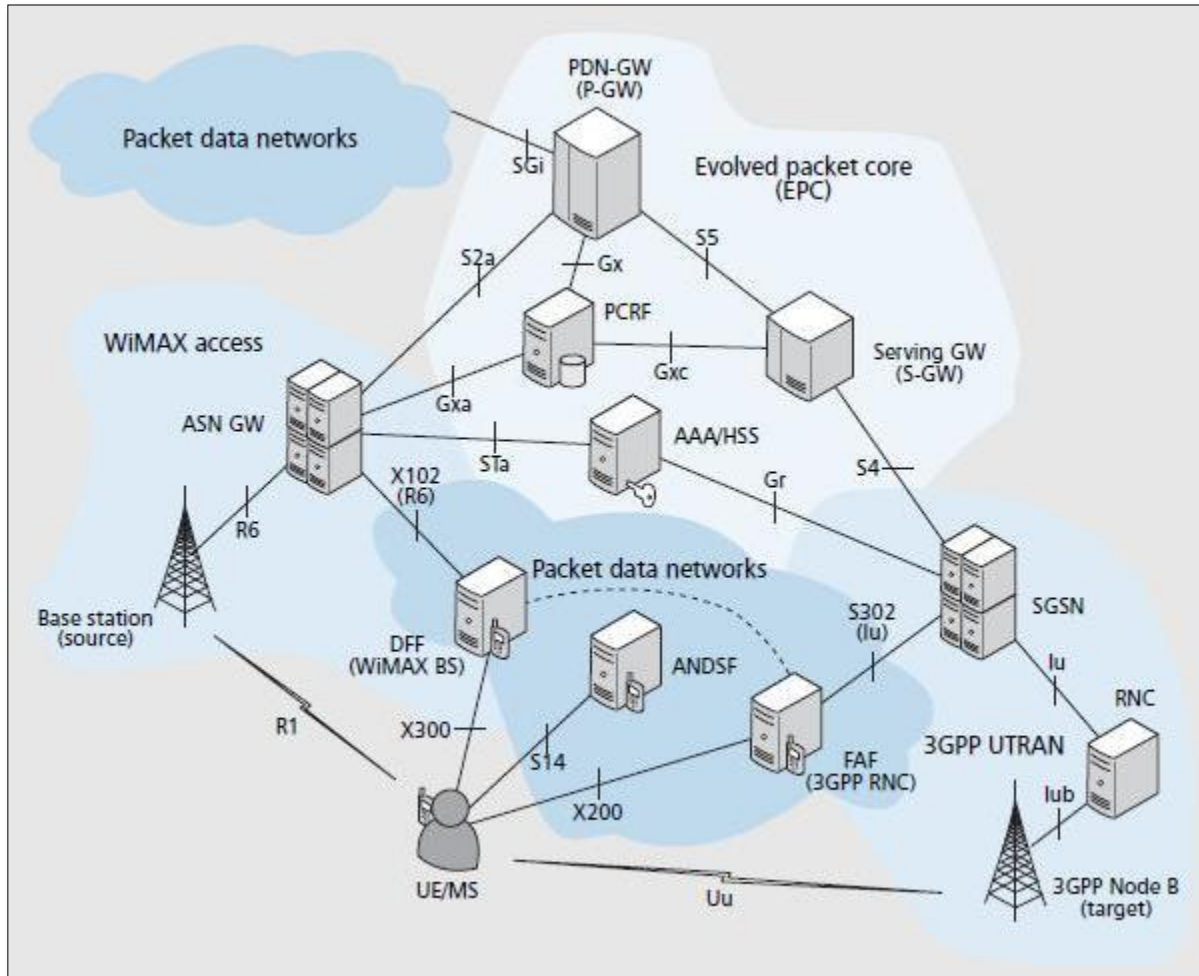
Οι προηγούμενες λύσεις για handover εμφανίζουν κάποια προβλήματα [6] όταν αλλάζει το μονοπάτι δεδομένων. Το πρώτο πρόβλημα είναι ότι το UE δεν κάνει καμία προσπάθεια να ενημερώσει το δίκτυο προέλευσης για τη λειτουργία του VHO, κάτι το οποίο οδηγεί σε απώλεια των πακέτων δεδομένων που υπάρχουν στο buffer. Το δεύτερο πρόβλημα είναι ότι το UE αφήνει το δίκτυο προέλευσης χωρίς την κατάλληλες διαδικασίες αποσύνδεσης. Για παράδειγμα, εάν το πηγαίο δίκτυο είναι ένα mobile WiMAX, τα πακέτα μεταδίδονται μέσω της ASN-GW στο WiMAX BS που υποστηρίζει το UE. Όταν το UE βρίσκει τη 3GPP πρόσβαση-στόχο με τη βοήθεια του ANDSF, εκτελεί προσκόλληση και διαδικασίες πιστοποίησης με την EPC. Καθώς το UE συνδέεται με τον στόχο πρόσβασης, εκτελεί VHO στη 3GPP πρόσβαση-στόχο χωρίς ειδοποίηση στο δίκτυο προέλευσης. Αυτή η διαδικασία οδηγεί στην απώλεια των πακέτων χρήστη που είναι ήδη αποθηκευμένα στα WiMAX ASN-GW και BS. Επιπλέον, το δίκτυο προέλευσης δεν αρχίζει να απελευθερώσει τους πόρους, ακόμη και μετά την αποσύνδεση του UE.

Για την επίλυση αυτών των προβλημάτων, εισάγεται μια τροποποίηση του WiMAX ASN-GW έτσι ώστε να συμπεριλάβει διαδικτυακές λειτουργικότητες, όπως η επιλογή των 3GPP κυψελών στόχων. Η προσθήκη των λειτουργιών διασύνδεσης στο ASN-GW συνεπάγεται ότι απαιτεί πρόσθετες τροποποιήσεις στις λειτουργίες των στοιχείων του δικτύου 3GPP (π.χ. S-GW), όταν το UE εκτελεί διαπομπή προς την αντίστροφη κατεύθυνση. Εδώ χρησιμεύει και η BS επιπέδου λογική οντότητα του DFF. Το UE στέλνει τη διεύθυνση IP του FAF μέσω του UE - DFF IP καναλιού και το DFF εγκαθιστά τη σύνδεση IP στο καθορισμένο FAF. Το DFF εκτελεί WiMAX BS ή ενδο - SGSN διαπομπή για να ανακτήσει τα δεδομένα του χρήστη που είναι προσωρινά αποθηκευμένα στην πηγαία πρόσβαση. Μετά από αυτό, το DFF προωθεί τα δεδομένα του χρήστη στη FAF. Επίσης υποστηρίζει τη διαδικασία διαγραφής της πηγαίας πρόσβασης αφού το UE έχει κινηθεί προς το στόχο πρόσβασης και η διαβίβαση των δεδομένων έχει ολοκληρωθεί..

Στην Εικόνα 26 υπάρχουν αρκετές αρκετές λογικές διεπαφές και λειτουργικές οντότητες που είναι που είναι νεοεισαχθέντες:

- X300 (ισοδύναμο με 3GPP Uu ): IP σήραγγα μεταξύ της DFF και UE .
- S301 (ισοδύναμο με S1- MMK , που δεν φαίνεται στο σχήμα) : η λογική διεπαφή μεταξύ της FAF και MME , όταν η FAF λειτουργεί ως E - UTRAN ENB .
- S302 (ισοδύναμο με 3GPP Iu): η λογική διεπαφή μεταξύ της FAF και του SGSN, όταν το UTRAN είναι η πρόσβαση στόχου.
- S303 (ισοδύναμο με S1- MMK , που δεν φαίνεται στο σχήμα) : η λογική διεπαφή μεταξύ του DFF και MME , όταν το DFF μιμείται ένα E - UTRAN ENB.
- S304 (ισοδύναμο με 3GPP IU, που δεν φαίνεται στο σχήμα) : η λογική διεπαφή μεταξύ του DFF και του SGSN, όταν το UTRAN είναι η πηγή πρόσβασης.

- X101 (ισοδύναμο με WiMAX R6, δεν φαίνεται στο σχήμα) : η λογική διεπαφή μεταξύ του FAF και ASN - GW όταν WiMAX είναι ο στόχος πρόσβασης.
- X102 (ισοδύναμο με WiMAX R6) : η λογική διεπαφή μεταξύ του DFF και ASN – GW όταν DFF λειτουργεί ως WiMAX BS .
- DFF (ισοδύναμο με WiMAX BS) : μια λογική οντότητα που διαχειρίζεται τη διαβίβαση των στοιχείων και κατάργηση εγγραφής στην πηγή πρόσβαση.



Εικόνα 26: Αρχιτεκτονική διασύνδεσης δικτύου μεταξύ των mobile WiMAX και 3GPP UTRAN με το UE να εκτελεί παράδοση διαπομπή από το WiMAX στο UTRAN [6]

## 6.2 Vertical Handover Signaling μέσω EPC

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν οι διαδικασίες του signaling κατά τη διάρκεια που ένα κινητό τερματικό πραγματοποιεί Vertical Handover Operation από LTE σε ένα WiMAX δίκτυο και από LTE σε WLAN..

### 6.2.1 VHO signaling μεταξύ LTE και WiMAX με χρήση FPMIP

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί ένα παράδειγμα ροής σηματοδότησης όπου το user interface (UE) πραγματοποιεί VHO από LTE σε WiMAX [5].

Το UE είναι συνδεδεμένο σε ένα δίκτυο πρόσβασης WiMAX (WiMAX - AN) και επικοινωνεί με μια πύλη (P - GW) μέσω μιας PMIPv6 IP σήραγγας.

1. Αρχικά, η UE ανακαλύπτει την ANDSF του EPC και ανακτά πληροφορίες σχετικά με τις πολιτικές και τις συχνότητες των γειτονικών κυψελών, καθώς και τη διεύθυνση της FAF.
2. Στη συνέχεια, η UE ζητείται από το WiMAX-AN για να μετρήσει τις κυψέλες LTE που ανακαλύφθηκαν και να αποφασίσει σχετικά με το δίκτυο στόχο.
3. Κατόπιν μια σήραγγα IP δημιουργείται μεταξύ του UE και της FAF. Η διαδικασία προκαταχώρισης ξεκινάει η οποία περιλαμβάνει ένα αίτημα ελέγχου ταυτότητας για την πρόσδεση από το UE στο δίκτυο EPC που πραγματοποιείται μέσω της FAF.
- 4-12. Η FAF αντιπροσωπεύει το UE στη διαδικασία πιστοποίησης από την UE δεν είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο στόχο. Στα βήματα αυτά ολοκληρώνεται ο έλεγχος ταυτότητας.
13. Το UE ξεκινά ένα μήνυμα αίτησης μετάδοσης στο WiMAX ASN συμπεριλαμβανομένου ενός καταλόγου των υποψήφιων για σύνδεση κυψελών 3GPP.
- 14-15. Το WiMAX ASN αξιολογεί τη διαθεσιμότητα των υποψηφίων κυψελών και ανταποκρίνεται προς το UE με ένα μήνυμα εντολής handover συμπεριλαμβάνοντας την επιλεγμένη 3GPP κυψέλη στόχο.
- 16-17. Το UE αφού ενημερώθηκε από το δίκτυο στόχο, εκδίδει ένα μήνυμα αιτήματος handover προς την FAF συμπεριλαμβανομένης της 3GPP κυψέλης στόχο. Στη συνέχεια η FAF εκτελεί το αίτημα μετεγκατάστασης στο στόχο LTE S-GW.
- 18-21. Σε αυτά τα βήματα ολοκληρώνεται η δέσμευση των πόρων για το UE από το δίκτυο EPC.
- 22-23. Κατά συνέπεια, η FAF στέλνει μια εντολή handover στο UE, συμπεριλαμβανομένων των ραδιο πληροφοριών της κυψέλης - στόχου. Το UE συνδέεται με το στόχο LTE -AN και εκδίδει ένα αίτημα δημιουργίας σύνδεσης που στη συνέχεια διαβιβάζεται στο S- GW από εκεί αρχίζει η λειτουργία του reactive FPMIP handover.

Στην reactive διαδικασία υποτίθεται ότι η κάθε πύλη εξυπηρέτησης έχει μια βάση δεδομένων που περιέχει το Access Point Identification(AP-ID) και το Proxy- CoA κάθε άλλης πύλης εξυπηρέτησης που βρίσκεται στο δίκτυο.

24. Η S-GW ξεκινά να αποθηκεύει προσωρινά πακέτα κατερχόμενης ζεύξης που προορίζονται για το UE.

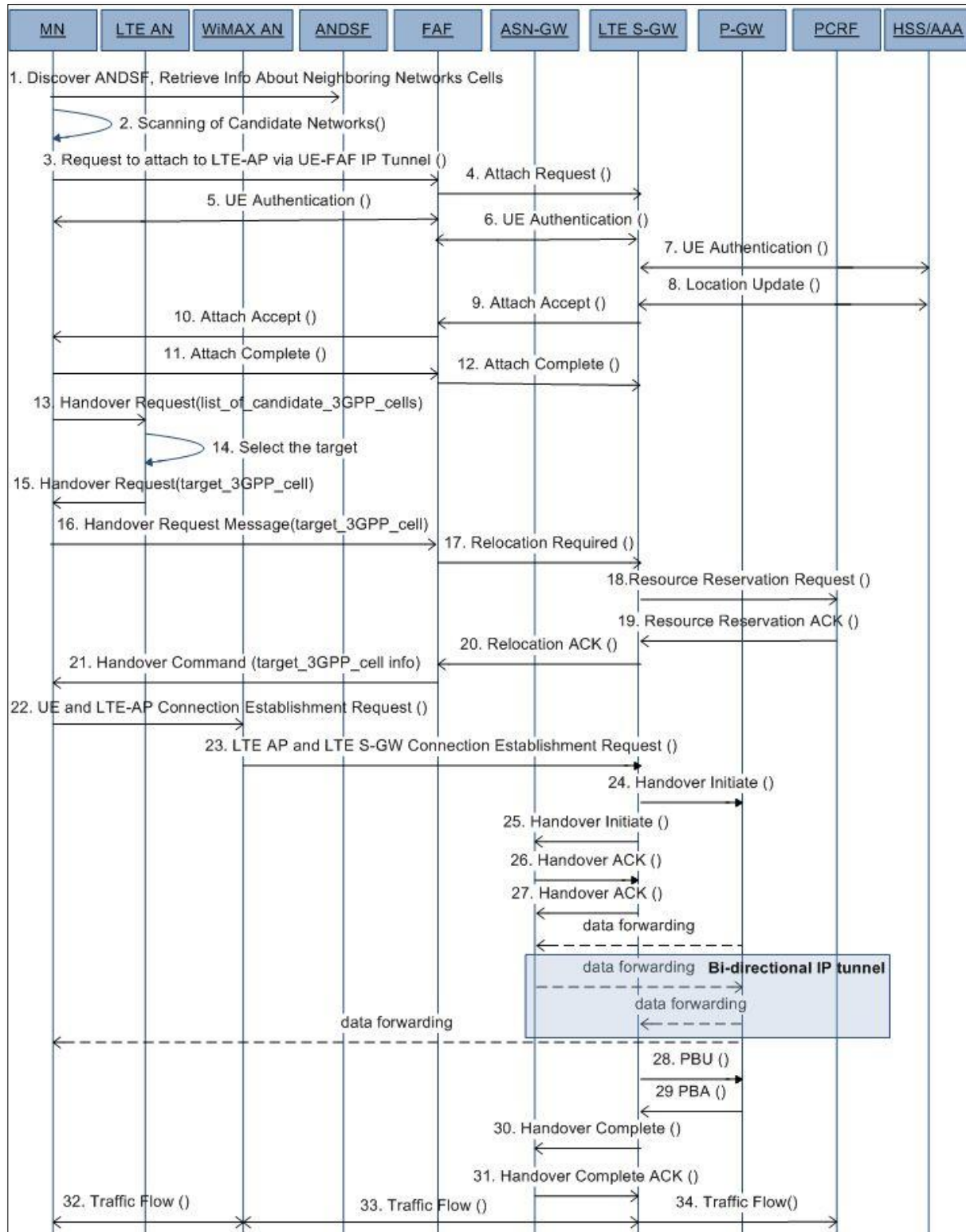
25. Ακολουθεί η ανάκτηση της διεύθυνσης του WiMAX ASN-GW από τη βάση δεδομένων της, χρησιμοποιώντας το προηγούμενο AP -ID του UE και στέλνει ένα μήνυμα εκκίνησης handover προς το ASN - GW.

26-27. Η ASN - GW απαντάει στέλνοντας ένα μήνυμα επιβεβαίωσης του handover που περιλαμβάνει το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων και την αρχική διεύθυνση δικτύου του UE καθώς και τη διεύθυνση του τρέχοντος P-GW.

Στη συνέχεια δημιουργείται μια προσωρινή, αμφίδρομη σήραγγα μεταξύ του Proxy CoAs της ASNGW και της S-GW για να βοηθήσει στη διαβίβαση των πακέτων δεδομένων στο UE. Τα Uplink πακέτα προωθούνται μέσω της σήραγγας από το S-GW στην ASN-GW που εκ νέου τα διαβιβάζει στο PGW. Κατά συνέπεια, τα πακέτα downlink διαβιβάζονται από το P-GW στην ASN-GW και μέσω της σήραγγας προς το S-GW.

28-29. Το S-GW στέλνει ένα μήνυμα PBU στο P-GW το οποίο απαντά πίσω με ένα μήνυμα PBA και η διαδικασία του FPMIP HO τελειώνει.

Στα επόμενα βήματα ολοκληρώνεται η διαδικασία του handover με την S-GW να εκδίδει ένα μήνυμα handover προς την ASN-GW για να αποδεσμεύσει τους πόρους και μια επιβεβαίωση της ολοκλήρωσης του handover στέλνεται πίσω από το ASN-GW.



*Εικόνα 27: Ροή σηματοδότησης VHO από LTE σε WiMAX [5]*

### 6.2.2 VHO signaling μεταξύ LTE και WLAN Access Networks

Η υποστήριξη πολλαπλών PDNs έχει τις εξής επιπτώσεις σχετικά με τις διαδικασίες διαπομπής για μία σύνδεση PDN [11]:

- Κατά την διαδικασία του handover από 3GPP πρόσβαση σε μη-3GPP πρόσβαση και από μη-3GPP πρόσβαση σε 3GPP πρόσβαση, αν το UE έχει πολλαπλές PDN συνδέσεις σε διαφορετικές APNs στην πρόσβαση πηγής και το UE είναι ικανό να δρομολογήσει διαφορετικές ταυτόχρονα ενεργές συνδέσεις PDN μέσω διαφορετικών δικτύων πρόσβασης, το UE μπορεί να μεταφέρει από την πηγή στον στόχο πρόσβασης όλες τις συνδέσεις PDN που ήταν ενεργές στην πηγή πρόσβασης πριν από το handover ή μόνο ένα υποσύνολο των τους, με τον περιορισμό ότι πολλαπλές συνδέσεις PDN στην ίδια APN πρέπει να διατηρούνται σε ένα σημείο πρόσβασης.
- Κατά την διαδικασία του handover από 3GPP πρόσβαση σε μη-3GPP πρόσβαση και από μη-3GPP πρόσβαση σε άλλη πρόσβαση μη-3GPP, χρησιμοποιώντας S2a ή S2b, κατά τη διάρκεια του ελέγχου ταυτότητας πρόσβασης, το HSS/AAA επιστρέφει στη Trusted μη-3GPP πρόσβαση ή στο EPDG την ταυτότητα PDN GW και το σχετικό APN για κάθε PDN με το οποίο είναι συνδεδεμένο το UE. Για τις μη-3GPP προσβάσεις που υποστηρίζουν το UE να δημιουργήσει σύνδεση με τα PDNs μετά την επαφή, το UE εκτελεί μια επαφή με τον μη-3GPP στόχο πρόσβασης υποδεικνύοντας ότι είναι ένα handover, με αποτέλεσμα το UE να συνδεθεί με ένα PDN και το UE εδραιώνει τη σύνδεση με τα υπόλοιπα PDNs που μεταφέρονται από το σύστημα 3GPP.
- Εάν το UE εκτελεί handover μεταξύ 3GPP πρόσβασης και μη 3GPP πρόσβασης και το UE έχει περισσότερες από μία PDN συνδέσεις με ένα μόνο APN στην πηγή πρόσβασης και πολλαπλές συνδέσεις PDN σε μία μόνο APN δεν υποστηρίζονται μέσω του στόχου πρόσβασης, μόνο μία PDN σύνδεση με τη δεδομένη APN θα είναι εγκατεστημένη στην πρόσβαση στόχο. Σε αυτή την περίπτωση, ισχύουν τα ακόλουθα :

α) Αν έχει αναπτυχθεί δυναμική PCC και η PCRF λαμβάνει ένα Gateway Control Session Establishment Request από τη BBERF στόχο υποδεικνύοντας ένα IP-CAN τύπου διαφορετικό από 3GPP πρόσβαση, η PCRF επιλέγει μια από τις IP-CAN συνεδρίες για αυτό το APN και συνεχίζει με τη διαδικασία μετεγκατάστασης BBERF για αυτή τη σύνδεση PDN.

β) Όταν η PDN GW λαμβάνει PBU πάνω PMIP με βάση S2a ή S2b ή S5/S8, η PDN GW πρέπει να επιλέξει μία από τις συνδέσεις PDN για αυτό το APN και να συνεχίσει με τη διαδικασία handover για την εν λόγω σύνδεση PDN. Το PDN GW τερματίζει τις υπόλοιπες PDN συνδέσεις για το APN χωρίς να αφαιρεί τις PDN GW πληροφορίες στο HSS. Αν έχει αναπτυχθεί δυναμική

PCC, το PDN GW ενημερώνει το PCRF για την απενεργοποίηση των PDN συνδέσεων που χρησιμοποιούν το PCEF εκκινώντας την IP-CAN διαδικασία τερματισμού της συνεδρίας.

γ) Όταν η PDN GW λαμβάνει μια PBU που περιέχει ένα πρόθεμα IPv6 διεύθυνσης που συνδέεται με ένα μία από τις PDN συνδέσεις και το πρόθεμα IPv6 διεύθυνσης είναι έγκυρο, η PDN GW χρησιμοποιεί το πρόθεμα IPv6 διεύθυνσης για να επιλέξει τη σύνδεση PDN από τις ενεργές συνδέσεις PDN. Όταν η πληροφορία δεν περιλαμβάνονται στο PBU, η PDN GW και η PCRF επιλέγει την τελευταία σύνδεση PDN από τις ενεργές PDN συνδέσεις για το συγκεκριμένο APN.

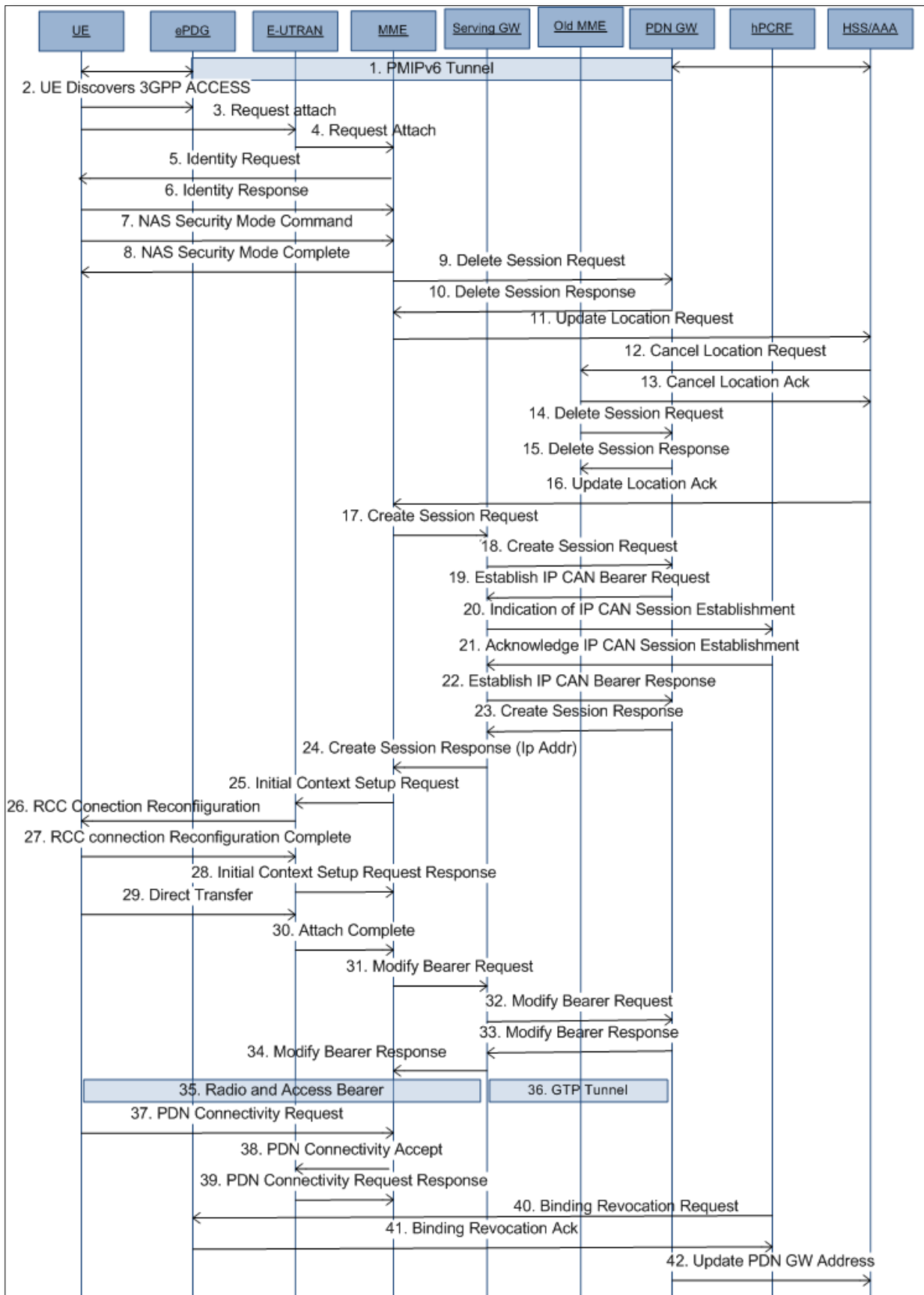
- Αν το UE εκτελεί handover μεταξύ 3GPP πρόσβασης και μη 3GPP και το UE έχει περισσότερες από μία PDN συνδέσεις με ένα δεδομένο APN στην πηγή πρόσβασης και πολλαπλές συνδέσεις PDN σε ένα μόνο APN στο στόχο πρόσβασης, ισχύουν τα ακόλουθα:

α) Όλες οι συνδέσεις PDN στο ίδιο APN πρέπει να εκτελούν handover.

β) Όταν η PDN GW λαμβάνει το αίτημα για τη δημιουργία μιας σύνδεσης PDN με συγκεκριμένο APN, η PDN GW θα επιλέξει μία από τις συνδέσεις PDN για αυτό το APN και να συνεχίσει με τη διαδικασία handover της εν λόγω PDN σύνδεσης.

Τα βήματα που εμπλέκονται στην διαδικασία του handover από μια αξιόπιστη ή μη αξιόπιστη non-3GPP IP πρόσβαση στο E-UTRAN που συνδέεται με EPC απεικονίζεται παρακάτω, για περιπτώσεις περιαγωγής και μη περιαγωγής και όταν PMIPv6 χρησιμοποιείται σε S2a ή S2b [19]. Θεωρούμε ότι ενώ το UE εξυπηρετείται από την αξιόπιστη ή μη αξιόπιστη non-3GPP IP πρόσβαση, μια σήραγγα PMIPv6 είναι εγκατεστημένη μεταξύ του non-3GPP δικτύου πρόσβασης και της PDN GW στο EPC.





*Εικόνα 28: Handover από WLAN σε LTE με PMIPv6 [21],[22], [23]*

Τα βήματα που εμπλέκονται στο handover, παρουσιάζονται παρακάτω [2]:

1. Το UE χρησιμοποιεί ένα αξιόπιστο ή μη αξιόπιστο μη - 3GPP σύστημα πρόσβασης και εξυπηρετείται από PDN GW (όπως PMIPv6 LMA).
2. Το UE ανακαλύπτει την πρόσβαση E-UTRAN και καθορίζει να μεταφέρει τις τρέχουσες συνεδρίες του από το επί του παρόντος χρησιμοποιούμενο μη-3GPP σύστημα πρόσβασης στο E-UTRAN.
3. Το UE στέλνει ένα μήνυμα αιτήματος σύνδεσης προς το MME με τον τύπο του αιτήματος να έχει την ένδειξη Handover σύνδεση. Το μήνυμα από το UE δρομολογείται από το E-UTRAN προς την MME. Το UE θα πρέπει να περιλαμβάνει οποιοδήποτε από τα APN , που αντιστοιχούν στις συνδέσεις PDN στην μη 3GPP πηγή πρόσβασης.
4. Το MME μπορεί να επικοινωνήσει με το HSS και να επιβεβαιώσει την ταυτότητα του UE.
5. Μετά τον επιτυχή έλεγχο ταυτότητας, το MME μπορεί να εκτελέσει τη διαδικασία ενημέρωσης θέσης και ανάκτησης δεδομένων συνδρομητών από το HSS. Από τη στιγμή που ο τύπος του αιτήματος είναι "Handover", η ταυτότητα PDN GW μεταφέρεται στο MME αποθηκεύεται στο πλαίσιο εγγραφής PDN. Η MME λαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τα PDNs που το UE είναι συνδεδεμένο πάνω από την μη 3GPP πρόσβαση στα δεδομένα συνδρομητή που λαμβάνονται από το HSS.
6. Το MME επιλέγει ένα APN, μια πύλη εξυπηρέτησης GW και PDN GW. Το MME στέλνει αίτημα για δημιουργία συνεδρίας (συμπεριλαμβανομένου IMSI, MME ID Πλαίσιο, PDN GW - διεύθυνση, Handover ένδειξη, APN) στον επιλεγμένο εξυπηρετητή GW. Δεδομένου ότι ο τύπος του αιτήματος είναι "Handover", περιλαμβάνεται μια πληροφορία ένδειξης Handover.
7. Η πύλη εξυπηρέτησης GW στέλνει αίτημα δημιουργίας συνεδρίας (Ένδειξη Handover) προς την PDN-GW στην VPLMN ή HPLMN. Δεδομένου ότι το MME περιλαμβάνει πληροφορίες ένδειξης Handover στο μήνυμα αιτήματος δημιουργίας συνεδρίας, η GW περιλαμβάνει τις πληροφορίες αυτές μήνυμα αιτήματος δημιουργίας συνεδρίας. Αφού η ένδειξη Handover συμπεριλαμβάνεται, η PDN GW δεν θα πρέπει να αλλάξει τη σήραγγα από την μη-3GPP IP πρόσβαση σε 3GPP σε αυτό το σημείο.
8. Καθώς η ένδειξη Handover περιλαμβάνεται, η PDN GW εκτελεί μια PCEF-IP CAN διαδικασία τροποποίησης συνεδρίας με την PCRF για να ικανοποιήσει τους κανόνες που απαιτούνται για την PDN GW στην VPLMN ή HPLMN ώστε να λειτουργήσει ως PCEF για όλες τις ενεργές περιόδους λειτουργίας του UE. Αφορά τις συνεδρίες που έχουν συσταθεί με το νέο IPCAN τύπο ως αποτέλεσμα της διαδικασίας handover. Αν το UE έχει αποσυνδεθεί από την προεπιλεγμένη PDN πριν το handover τότε η PDN GW εκτελεί ένα PCEF ξεκίνημα IP CAN διαδικασίας συνεδρίας.

9. Η PDN GW ανταποκρίνεται με ένα μήνυμα απάντησης δημιουργίας συνεδρίας προς την εξυπηρετούμενη GW. Το μήνυμα απάντησης δημιουργίας συνεδρίας περιέχει τη διεύθυνση IP ή το πρόθεμα που ανατέθηκε στο UE ενώ ήταν συνδεδεμένο με την μη-3GPP πρόσβαση. Επίσης περιέχει, το Id χρέωσης που προηγουμένως έχει ανατεθεί στη σύνδεση PDN στην μη-3GPP πρόσβαση παρόλο που Id χρέωσης εξακολουθεί να ισχύει για την μη-3GPP πρόσβαση.
10. Η εξυπηρετούμενη GW επιστρέφει ένα μήνυμα απάντησης για τη δημιουργία συνεδρίας στον MME. Αυτό το μήνυμα περιλαμβάνει τη διεύθυνση IP του UE, χρησιμεύει επίσης ως ένδειξη προς το MME ότι η ρύθμιση και ενημέρωση του S5 φορέα ήταν επιτυχής. Σε αυτό το βήμα, η PMIPv6 ή GTP σήραγγα πάνω από το S5 είναι εγκατεστημένη.
11. Οι φορείς ραδιοσήματος και πρόσβασης εδραιώνονται, σε αυτό το βήμα, στην 3GPP πρόσβαση.
12. Το MME στέλνει ένα μήνυμα αιτήματος τροποποίησης φορέα (διεύθυνση eNodeB, eNodeB TEID, ένδειξη Handover) προς την εξυπηρετούμενη GW.
13. Δεδομένου ότι η ένδειξη handover περιλαμβάνεται στο βήμα 12, η εξυπηρετούμενη GW στέλνει ένα μήνυμα αίτησης τροποποίησης φορέα για τη PDN GW για να ζητήσει από τη PDN GW να κατευθύνει σε σήραγγα τα πακέτα από τη μη 3GPP IP πρόσβαση στο 3GPP σύστημα πρόσβασης και να ξεκινήσει αμέσως τη δρομολόγηση πακέτων στην GW για τον προεπιλεγμένο και κάθε ειδικό EPS φορέα. Σε αυτό το βήμα, το PDN GW απομακρύνει τους παλιούς κανόνες PCC για την αξιόπιστη ή μη αξιόπιστη μη-3GPP IP πρόσβαση και εφαρμόζει τους νέους κανόνες για την πρόσβαση E- UTRAN για χρέωση. Το Id χρέωσης που προηγουμένως χρησιμοποιούνταν για την PDN σύνδεση στη μη-3GPP πρόσβαση τώρα ισχύει μόνο για τον προεπιλεγμένο φορέα που χρησιμοποιείται στην πρόσβαση E- UTRAN. Αν δημιουργούνται ειδικοί φορείς, μια νέα ταυτότητα χρέωσης εκχωρείται από το PGW για κάθε μία από αυτές.
14. Το PDN GW επιβεβαιώνει στέλνοντας μια απάντηση τροποποίησης φορέα στην εξυπηρετούμενη GW.
15. Η εξυπηρετούμενη GW επιβεβαιώνει στέλνοντας ένα μήνυμα απάντησης τροποποίησης φορέα (ταυτότητα EPS Φορέα) προς το MME.
16. Το UE στέλνει και λαμβάνει δεδομένα σε αυτό το σημείο μέσω του συστήματος E- UTRAN.
17. Για τη σύνδεση σε πολλαπλά PDNs, το UE καθιερώνει συνδεσιμότητα σε κάθε PDN που μεταφέρεται από μη-3GPP πρόσβαση, εκτός από τη σύνδεση PDN που ιδρύθηκε στα βήματα 3-15, με την εκτέλεση το UE ζητάει PDN διαδικασία σύνδεσης.
18. Η PDN GW εκκινεί την διαδικασία απενεργοποίησης κατανομής των πόρων στην αξιόπιστη/μη αξιόπιστη μη-3GPP IP πρόσβαση.

Σε περίπτωση σύνδεσης με πολλαπλές PDNs ισχύουν τα ακόλουθα :

- Αν το UE συνδέεται με πρόσβαση 3GPP αλλά και με μη-3GPP πρόσβαση πριν να ενεργοποιηθεί το handover των PDN συνδέσεων στην 3GPP πρόσβαση, τα βήματα 2 έως 16 πρέπει να παραβλεφθούν και το UE εκτελεί μόνο το βήμα 17 για κάθε PDN σύνδεση που μεταφέρεται από μη-3GPP πρόσβαση.
- Αν το UE συνδέεται μόνο με μη-3GPP πρόσβαση πριν να ενεργοποιηθεί το handover των PDN συνδέσεων στην 3GPP πρόσβαση, τα βήματα 2 έως 16 πρέπει να εκτελούνται. Στο βήμα 3, το UE θα πρέπει να παρέχει το APN που αντιστοιχεί σε μία από τις PDN συνδέσεις που μεταφέρονται από μη-3GPP πρόσβαση. Αν το APN δεν παρέχεται, και το πλαίσιο συνδρομής από τον HSS περιέχει μια ταυτότητα PDN GW που αντιστοιχεί στο προεπιλεγμένο APN, το MME θα χρησιμοποιήσει την PDN GW που αντιστοιχεί στην προεπιλεγμένη APN. Το UE πρέπει στη συνέχεια να επαναλάβει το βήμα 17 για κάθε μία από τις εναπομείναντες συνδέσεις PDN που μεταφέρονται από μη-3GPP πρόσβαση.
- Το βήμα 18 πρέπει να επαναληφθεί για κάθε σύνδεση PDN που μεταφέρεται από μη-3GPP πρόσβαση.

## **7. MIH Vertical Handover**

Κατά τα τελευταία έτη, τα τερματικά πολλαπλών τεχνολογιών γίνονται διαθέσιμα στο ευρύ κοινό. Τέτοια τερματικά multi-mode θέτουν νέες προκλήσεις για τη διαχείριση της κινητικότητας. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν ορισμένες από αυτές τις προκλήσεις, το IEEE δημιούργησε νέες προδιαγραφές για Media Independent Handover services (IEEE 802.21 MIH) [14]. Ο κύριος στόχος είναι να βελτιωθεί για το χρήστη εμπειρία των κινητών τερματικών, επιτρέποντας μεταπομπές μεταξύ ετερογενών τεχνολογιών, βελτιστοποιώντας παράλληλα τη συνέχεια της συνεδρίας. Το πρότυπο 802.21 είναι επικεντρωμένο γύρω από τα ακόλουθα τρία κύρια στοιχεία :

- Ένα πλαίσιο που επιτρέπει την απρόσκοπτη μετάβαση μεταξύ ετερογενών τεχνολογιών. Το πλαίσιο αυτό βασίζεται σε μια στοίβα πρωτοκόλλων που εφαρμόζεται σε όλες τις συσκευές που συμμετέχουν στην διαπομπή. Η στοίβα πρωτοκόλλων στοχεύει στην παροχή των απαραίτητων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των συσκευών για να βελτιστοποιηθούν οι αποφάσεις παράδοσης.

- Ο ορισμός ενός νέου επιπέδου σύνδεσης (link layer) σύνδεσης SAP που προσφέρει μια κοινή διεπαφή για τις λειτουργίες επιπέδου σύνδεσης το οποία είναι ανεξάρτητο από τις ιδιαιτερότητες της τεχνολογίας. Για καθεμία από τις τεχνολογίες που εξετάζονται σε 802.21, αυτή η SAP έχει αντιστοιχιστεί στις αντίστοιχες συγκεκριμένες τεχνολογίες αρχέτυπα. Το πρότυπο σχέδιο περιλαμβάνει ορισμένες από αυτές τις αντιστοιχίσεις.
- Ο ορισμός μιας σειράς λειτουργιών που επιτρέπουν την παράδοση που παρέχουν τα ανώτερα στρώματα (όπως π.χ. πρωτόκολλα για τη διαχείριση της κινητικότητας όπως Mobile IP), με την απαιτούμενη λειτουργικότητα για την εκτέλεση ενισχυμένων μεταπομπών. Αυτές οι λειτουργίες ενεργοποιούν, μέσω του πλαισίου 802.21, το αντίστοιχο τοπικό ή απομακρυσμένο αρχέτυπα επίπεδο σύνδεσης που ορίζεται παραπάνω.

### 7.1. Mobile IP

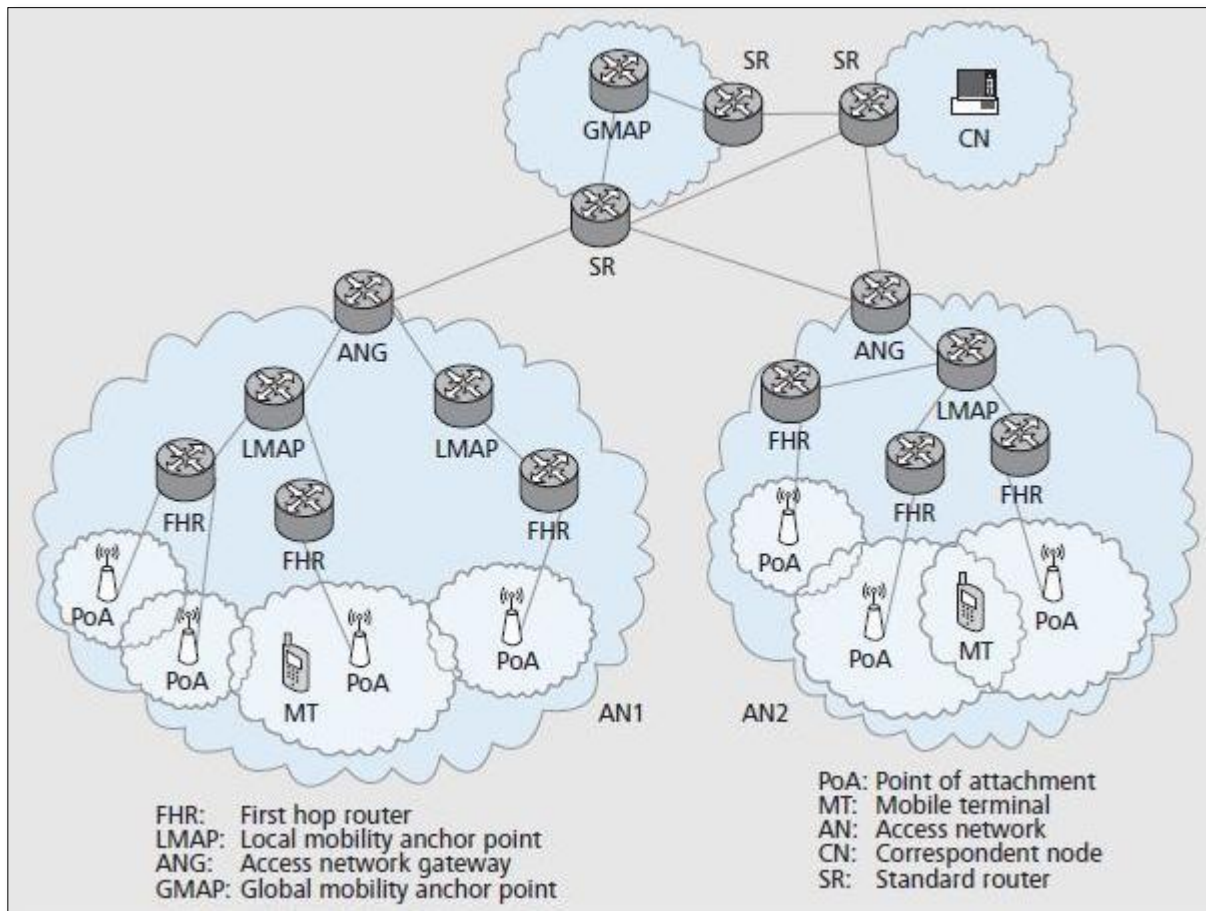
Σε κάθε IP multimedia subsystem (IMS), προ-IMS, ή συνδυασμένο δίκτυο, το handover είναι το κλειδί που επιτρέπει τη λειτουργία για την παροχή αδιάλειπτων υπηρεσιών και την παράδοση περιεχομένου σε μια ποικιλία φορητών/ασύρματων (και ενσύρματων) τεχνολογιών πρόσβασης. Οι μεταπομπές μέσα στο ίδιο σύστημα ραδιοσύστημα αντιμετωπίζονται από τους οργανισμούς τυποποίησης που συμμετέχουν στην ανάπτυξη των αντίστοιχων τεχνολογιών, όπως είναι τα 3GPP, 3GPP2, IEEE, και Digital Video Broadcasting (DVB). Από την άλλη πλευρά, οι μεταπομπές μεταξύ ετερογενών συστημάτων διαχειρίζονται από πρωτόκολλα που αναπτύχθηκαν από το Internet Engineering Task Force (IETF), όπως το Mobile IP (MIP) [13].

Το βασικό σύστημα για τη διαχείριση της κινητικότητας τερματικών σε IP δίκτυα είναι το MIP. Αυτό λειτουργεί με την κατανομή δύο διευθύνσεων σε ένα κινητό τερματικό (MT): μια μακροπρόθεσμη παγκόσμια διεύθυνση (home address) και μια βραχυπρόθεσμη τοπική διεύθυνση (care of address [CoA]). Η home address ανήκει στο home domain του MT, ενώ το CoA, που χρησιμοποιείται από τον κινητό όταν είναι μακριά από το home network, ανήκει στο visiting network. Η home address χρησιμοποιείται ως αναγνωριστικό παραμέτρου για το επίπεδο μεταφοράς, ενώ το CoA χρησιμοποιείται ως αναγνωριστικό τοποθεσίας.

Στην Εικόνα 29 [13] εμφανίζονται οι κύριες οντότητες κινητικότητας σε ένα Ip δίκτυο. Το MIP απαιτεί τη λειτουργικότητα της κινητικότητας που σχετίζεται με το MT, το παγκόσμιο σημείο αναφοράς της κινητικότητας GMAP (που αντιστοιχεί με τον MIP home agent [HA] εντός το οικείου δικτύου) και προαιρετικά το firsthop δρομολογητή (FHR), ο οποίος αναλαμβάνει το ρόλο του MIP Foreign Agent (FA). Το COA μπορεί να προσδιορίζεται είτε από τις κοινοποιήσεις FA (σε αυτή τη περίπτωση αποκαλείται FA-CoA) ή εξωτερικούς μηχανισμούς όπως το Dynamic Host Configuration Πρωτόκολλο (DHCP). Στην τελευταία περίπτωση (CoA που βρίσκονται στον ίδιο χώρο), δεν απαιτείται FA. Ένας κόμβος (ανταποκριτής κόμβος [CN]), που επικοινωνεί με το MT

στέλνει πακέτα στο MT χρησιμοποιώντας πάντα τη home address του MT ως διεύθυνση προορισμού.

Η εξέλιξη στον τομέα του Mobile IP είναι το Fast MIPv6. Το FMIPv6, λειτουργεί, επιτρέποντας στο κινητό τερματικό (MT) την ανάκτηση πληροφοριών σχετικά με το επόμενο υποδίκτυο πριν από την διαπομπή και την χρησιμοποίηση του επόμενου συνδέσμου πριν από την ενημέρωση θέσης με το CN. Η προετοιμασία της σηματοδότησης της διαπομπής γίνεται μεταξύ του MT και του προηγούμενου FHR, καθώς και μεταξύ της προηγούμενης και της επόμενης FHRs. Η σηματοδότηση μεταξύ FHRs χρησιμοποιείται για να μεταφέρει το πλαίσιο του κινητού (στην ορολογία της διαχείρισης της κινητικότητας, ο όρος πλαίσιο χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις πληροφορίες σχετικά με τον έλεγχο της πρόσβασης, την ποιότητα των παρεχομένων υπηρεσιών [QoS] και τη συμπίεση επικεφαλίδας), την επιτάχυνση της διαμόρφωσης IP στο νέο υποδίκτυο (π.χ., ελέγχοντας την εγκυρότητα της υποψήφιας CoA), και να δημιουργήσει τις σήραγγες να διαβιβάσει τα πακέτα προς/από το MT πριν την ολοκλήρωση της διαδικασίας ενημέρωσης δρομολόγησης. Σε σύγκριση με την MIPv6 η FMIPv6 προσθέτει πολυπλοκότητα στην MT και στα FHRs αλλά έχει τη δυνατότητα να παραδώσει μία απρόσκοπτη εμπειρία διαπομπής.



Εικόνα 29: Key mobility-enabling entities in IP networks [13]

Η Hierarchical MIPv6 [13], από την άλλη πλευρά, επιτρέπει την τοπική διαχείριση της κινητικότητας (δηλαδή, τη διαχείριση των τοπολογικά μικρών κινήσεων μέσα σε ένα δίκτυο πρόσβασης) με την εισαγωγή μιας νέας λειτουργικής οντότητας που ονομάζεται τοπικός κόμβος κινητικότητας (LMAP). Η LMAP, η οποία μπορεί να βρίσκεται σε οποιοδήποτε επίπεδο σε ένα ιεραρχικό δίκτυο δρομολογητών, επιδιώκει να διαδραματίσει το ρόλο του MIPv6 HA σε ένα local domain. Ενεργώντας ως τοπικός HA, η LMAP δεσμεύει το on-link CoA του MT (δηλαδή διεύθυνση που ανήκει στον FHR) με μια διεύθυνση στο υποδίκτυο του LMAP (ονομάζεται περιφερειακό CoA). Η αναδιαμόρφωση του On-link CoA λαμβάνει χώρα όταν το MT κινείται προς μια νέα subnet, ωστόσο το περιφερειακό CoA του δεν αλλάζει, με την προϋπόθεση ότι το MT παραμένει στο ίδιο τοπικό τομέα της κινητικότητας. Προκειμένου να βασιστεί στην MIPv6 για την παγκόσμια υποστήριξη της κινητικότητας, το MT καταγράφει τις περιφερειακές CoA του με την παγκόσμια HA και το CN. Το πρωτόκολλο καλεί τους δρομολογητές να κοινοποιήσουν

την υποστήριξη της λειτουργικότητας για HMIPv6 και επιτρέπει στα MT να διατηρούν πολλές συνδέσεις με διακριτές LMAPs που βρίσκονται σε διαφορετικά επίπεδα της ιεραρχίας του δικτύου.

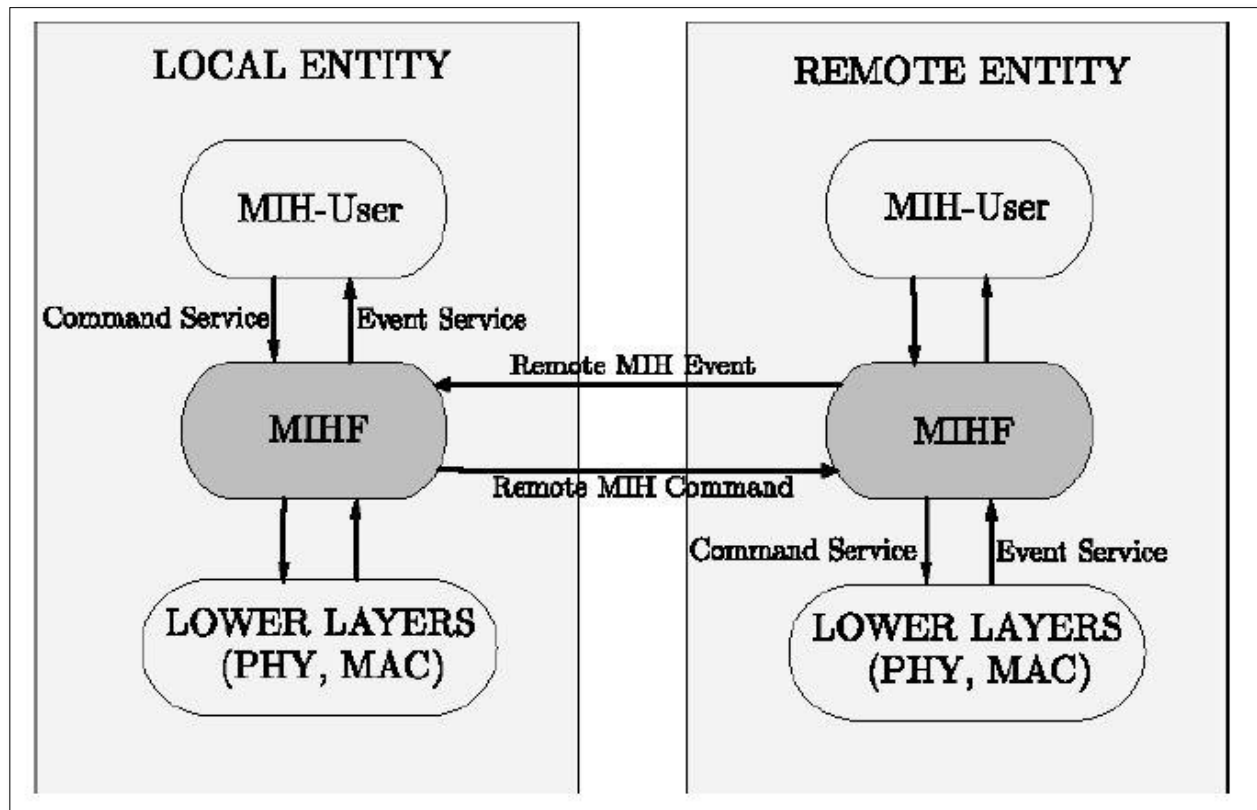
Όλα τα πρωτόκολλα που περιγράφονται μέχρι τώρα βασίζονται στην λογική ότι τα MTs πρέπει να εφαρμόσουν λειτουργικότητα της κινητικότητας που σχετίζεται με την εκτέλεση της διαπομπής και τη σηματοδότηση διαχείρισης θέσης όταν μετακινούνται μεταξύ υποδικτύων. Πρόσφατα, η IETF όρισε ένα βασισμένο στο δίκτυο πρωτόκολλο διαχείρισης της κινητικότητας που επιτρέπει στο MT να μετακινηθεί μεταξύ υποδικτύων μέσα στο ίδιο δίκτυο πρόσβασης, χωρίς να απαιτούνται αλλαγές στην IPv6 στοιβάδα πρωτοκόλλων τους. Αυτό το πρωτόκολλο, ονομάζεται Proxy MIPv6 (PMIP), απαιτεί τη λειτουργικότητα στήριξης της κινητικότητας FHRs και LMAPs (gateways κινητής πρόσβασης [Mags] και τοπικούς κόμβους κινητικότητας [LMAs], αντίστοιχα, στην ορολογία PMIP). Το πρώτο εκτελεί τη διαχείριση της κινητικότητας για λογαριασμό του κινητού, ενώ η πράξη ως ο τελευταίο ενεργεί σαν τοπική HA. Ο κύριος ρόλος του FHR είναι να παρέχει, σε συνεργασία με τις LMAP, κοινοποιήσεις δρομολογητή που κάνουν το MT να νομίζει ότι εξακολουθεί να είναι συνδεδεμένο στο οικιακό δίκτυο, στο οποίο μπορεί να κρατήσει την ίδια διεύθυνση. Το FHR ανιχνεύει τη κίνηση του MT και εκκινεί τη σηματοδότηση με το LMAP να ενημερώνει τη διαδρομή προς/από τη home address του MT. Μέρη αυτής της σηματοδότησης περιλαμβάνουν την ανάκτηση της πολιτικής του MT προφίλ που περιγράφει τις υπηρεσίες κινητικότητας που μπορούν να προσφερθούν.

Η FPMIPv6 [5, σελ. 112] μπορεί να μειώσει την HO καθυστέρηση που εμφανίζει η PMIPv6 επιτρέποντας στο MN να αρχίσει να προωθεί πακέτα μόλις ο MN ανιχνεύει μια νέα σύνδεση TN. Η FPMIPv6 λειτουργεί με την παραδοχή ότι κάθε πύλη πρόσβασης κινητικότητας (mags) έχει μια βάση δεδομένων που περιέχει πληροφορίες (π.χ., ταυτοποίηση του σημείου πρόσβασης (AP-ID), proxy care of address (Proxy-CoA), κλπ.) όλων των άλλων mags που υπάρχουν στο ίδιο δίκτυο. Ωστόσο, εάν η νέα πύλη πρόσβασης κινητικότητας (NMAG) βρίσκεται σε ένα ετερογενές δίκτυο, τότε μπορεί να μην υπάρχει τρόπος να αποκτηθεί το Proxy-CoA του NMAG εκ των προτέρων, που είναι ένα πρόβλημα που παρατηρείται να συμβαίνει κατά τη διεξαγωγή VHO μεταξύ LTE και ετερογενών δικτύων πρόσβασης (ANS). Ειδικά όταν ένα ρεύμα πακέτων πολυμέσων σε πραγματικό χρόνο χρειάζεται υποστήριξη VHO, οι πληροφορίες του NMAG που βρίσκονται στο ετερογενές δίκτυο πρέπει να είναι γνωστές εκ των προτέρων, όπως η ποιότητα των υπηρεσιών (QoS) στην πλευρά TN που μπορεί χρειαστεί να διαπραγματευτεί.

## 7.2 Αρχιτεκτονική MIH Vertical Handover



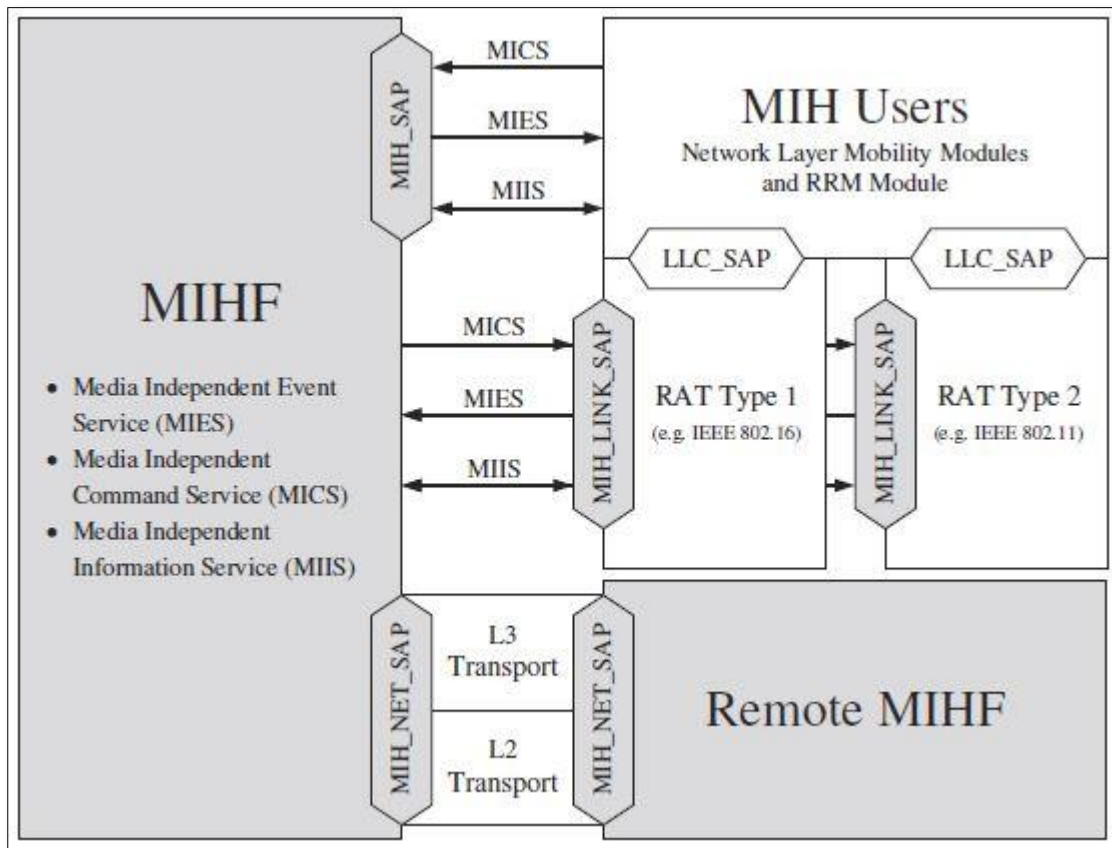
Το MIB βασίζεται κυρίως στην ανταλλαγή μηνυμάτων που αναφέρουν ένα υποσύνολο των γεγονότων στρώματος PHY/MAC . Οι λειτουργίες MIB [15] ενεργοποιούνται από μια οντότητα που ονομάζεται MIB Function (MIBF), η οποία παρέχει MIB Event Services (MIES), MIB Command Services (MICS) και MIB Information Services (MIS). Η εικόνα 30 δείχνει τις κύριες οντότητες του MIB πρωτοκόλλου, καθώς και τα γεγονότα και τις εντολές που δημιουργούνται από αυτές τις οντότητες . Η MIES ανιχνεύει μεταβολές στο επίπεδο σύνδεσης και ξεκινά από τα γεγονότα τόσο σε τοπικές όσο και σε απομακρυσμένες διασυνδέσεις. Η MICS προσφέρει τον έλεγχο MIB χρήστη πάνω στις ιδιότητες σύνδεσης που είναι σχετικές με την διαπομπή. Τέλος, η MIS παρέχει πληροφορίες σχετικά με διαφορετικά ετερογενή δίκτυα. Υπάρχουν συγκεκριμένες ενέργειες για την ειδοποίηση της πτώσης στη τροφοδοσία του link, την αποσύνδεση του link, την υποβάθμιση του καναλιού, την επικείμενη διαπομπή του link, και ούτω καθεξής. Οι διάφορες ενέργειες και εντολές ορίζονται στο MIB πρότυπο. Ανάλογα με το από πού προήλθαν οι πληροφορίες, η οντότητα MIBF θα μπορούσε να λάβει ή να μεταδώσει αναφορές σχετικά με τη διαμόρφωση και την κατάσταση του ραδιο δικτύου πρόσβασης που ανιχνεύει ο MN . Εάν η πληροφορία λαμβάνεται εξ αποστάσεως, ο τοπικός φορέας λαμβάνει MIBF πληροφορίες από την απομακρυσμένη οντότητα MIBF που βρίσκεται στο δίκτυο. Ωστόσο, μόλις λάβει πληροφορίες από τα κατώτερα στρώματα της στοίβας πρωτοκόλλου, αυτό επιτυγχάνεται μέσω υπηρεσιών που καθορίζουν στη διεπαφή. Για παράδειγμα, αν η ισχύς του σήματος που λαμβάνεται από μια απομακρυσμένη οντότητα πέσει κάτω από ένα όριο, τότε τα χαμηλότερα στρώματα το ανιχνεύουν και αποστέλλουν ένα link Going Down event στη MIBF οντότητα. Αυτή η οντότητα επικοινωνεί με τον απομακρυσμένο MIBF μέσω απομακρυσμένων MIB Events.



Εικόνα 30: Media independent handover operation [15]

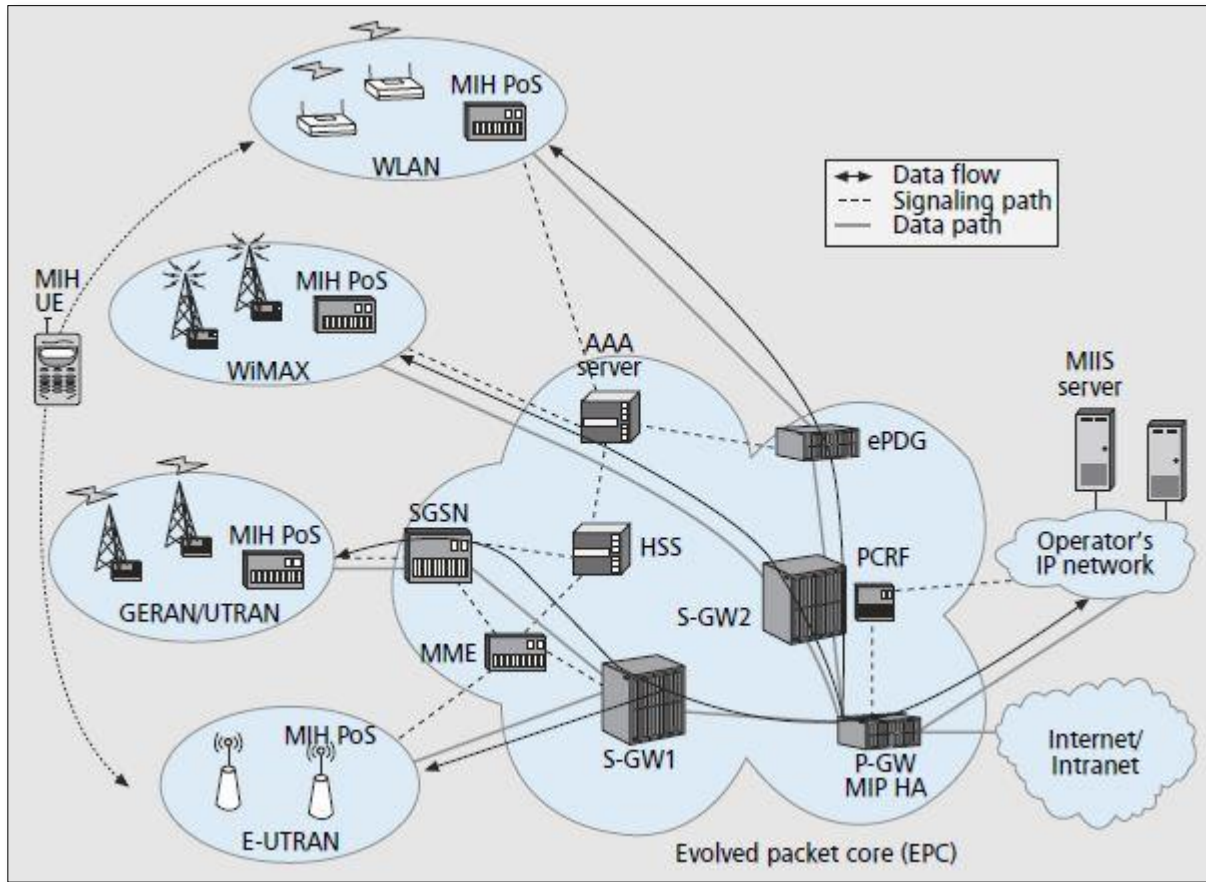
Όταν το event φθάνει στη τοπική MIHF οντότητα [15], αυτή διαβιβάζεται μέσω ενός event MIH στο MIH - χρήστη. Με τον ίδιο τρόπο όπως και με τα events, ο τοπικός MIH Χρήστης μπορεί να στείλει μια εντολή για να κάνει τα χαμηλότερα στρώματα εκτελέσουν μια συγκεκριμένη λειτουργία. Για παράδειγμα, τα όρια μπορούν να προσαρμοστούν, η ποιότητα της σύνδεσης μπορεί να μετρηθεί σε όρους του σήματος προς παρεμβολές συν θόρυβο (SINR), Bit Error Rate (BER), κλπ. Τέλος, για να ενσωματωθεί το MIH σε συστήματα 3GPP δεν υπάρχει ανάγκη για νέα πρωτόκολλα για πρόσβαση σε υπηρεσίες MIHF. Οι υπηρεσίες αυτές μπορούν να αντιστοιχιστούν στις ήδη υπάρχουσες στο 3GPP.

Η MIH Function (MIHF) [16], η οποία μπορεί να βρίσκεται μέσα στις στοίβες πρωτοκόλλου μιας οντότητας δικτύου ή πολλαπλά διασυνδεδεμένων MN. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η τοποθέτηση του MIHF στις στοίβες πρωτοκόλλου σε μία οντότητα δικτύου ή ενός MN.



Εικόνα 31: Μοντέλο αναφοράς του MIHF[16]

Κύριες οντότητες του MIH είναι τα PoS και PoA [17]. Στο πρότυπο IEEE 802.21, το AP αναφέρεται ως point-of-attachment (PoA) και περιγράφει το τελικό σημείο στην πλευρά του δικτύου που συνδέεται στο MN με σύνδεση layer 2. Το PoA που σχετίζεται με το MN ονομάζεται serving PoA, ενώ οποιοδήποτε άλλο PoA στην περιοχή του MN είναι ένα υποψήφιο PoA. Εκτός από το PoA, ο MN να επικοινωνεί με το MIHF που βρίσκεται σε ένα κόμβο του δικτύου. Αυτός ο κόμβος ονομάζεται το point-of-service (PoS) και επικοινωνεί άμεσα με την MN MIHF. Εάν ένα PoS δεν έχει άμεση ανταλλαγή μηνυμάτων MIH με ένα MN, μπορεί να ενεργεί σαν ένα POS για άλλες MNs. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι PoA και PoS μπορούν να βρίσκονται στην ίδια τοποθεσία ή το αντίθετο.

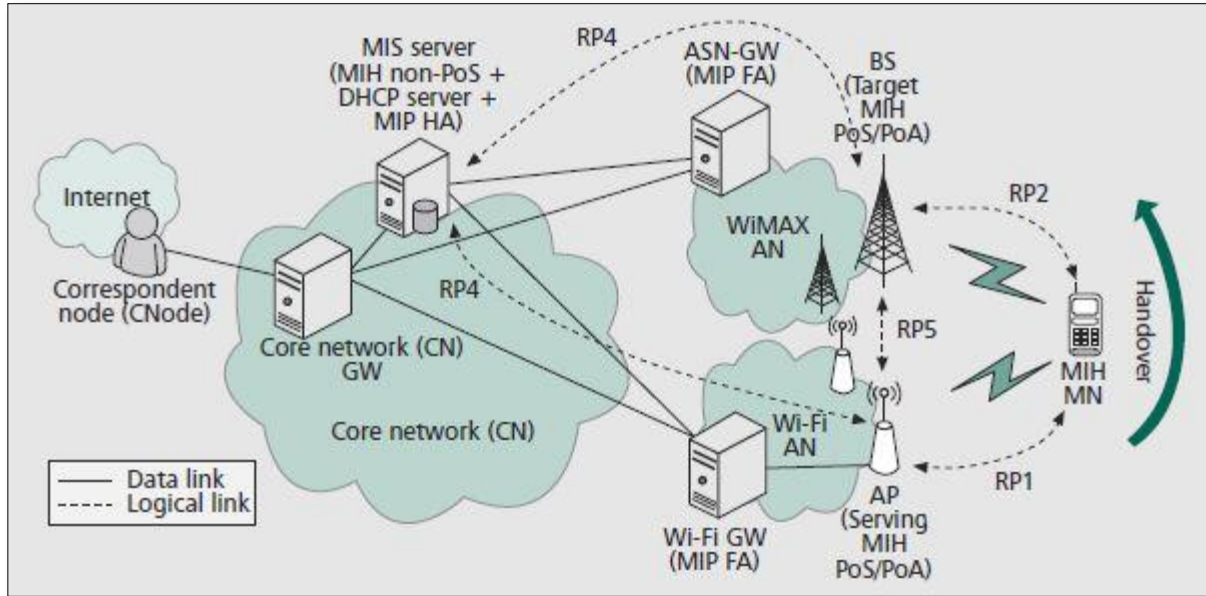


Εικόνα 32: Αρχιτεκτονική ετερογενούς δικτύου [17]

Σύμφωνα με το IEEE 802.21, δύο κύριες εναλλακτικές λύσεις προκύπτουν ως πιθανές αρχιτεκτονικές επιλογές για μελλοντικές υλοποιήσεις. Πρόκειται για τις PoA/PoS και non-PoA/PoS προσεγγίσεις [18]. Η βασική διαφορά τους αφορά τη θέση της λειτουργικότητας PoS, η οποία στην πρώτη περίπτωση τοποθετείται σε ένα PoA, ενώ ένα non PoA συστατικό επιλέγεται στη δεύτερη περίπτωση.

Πιο συγκεκριμένα, η PoA/PoS [18] προσέγγιση αφορά την ενσωμάτωση της IEEE 802.21 PoS λειτουργικότητας σε ένα κόμβο δικτύου, όπως το Wi-Fi σημείο πρόσβασης (AP) ή ένα σταθμό βάσης WiMAX (BS). Μια τέτοια προσέγγιση για ένα ενσωματωμένο Wi-Fi/WiMAX δίκτυο απεικονίζεται στην εικόνα 32. Εκεί παρατηρούμε ότι τα Wi-Fi και WiMAX δίκτυα πρόσβασης (ANs) συνδέονται σε ένα κεντρικό δίκτυο (στην υπηρεσία δικτύου σύνδεσης [CSN] στο πλαίσιο του WiMAX), προκειμένου να προσφέρουν IP συνδεσιμότητα μεταξύ ενός κόμβου

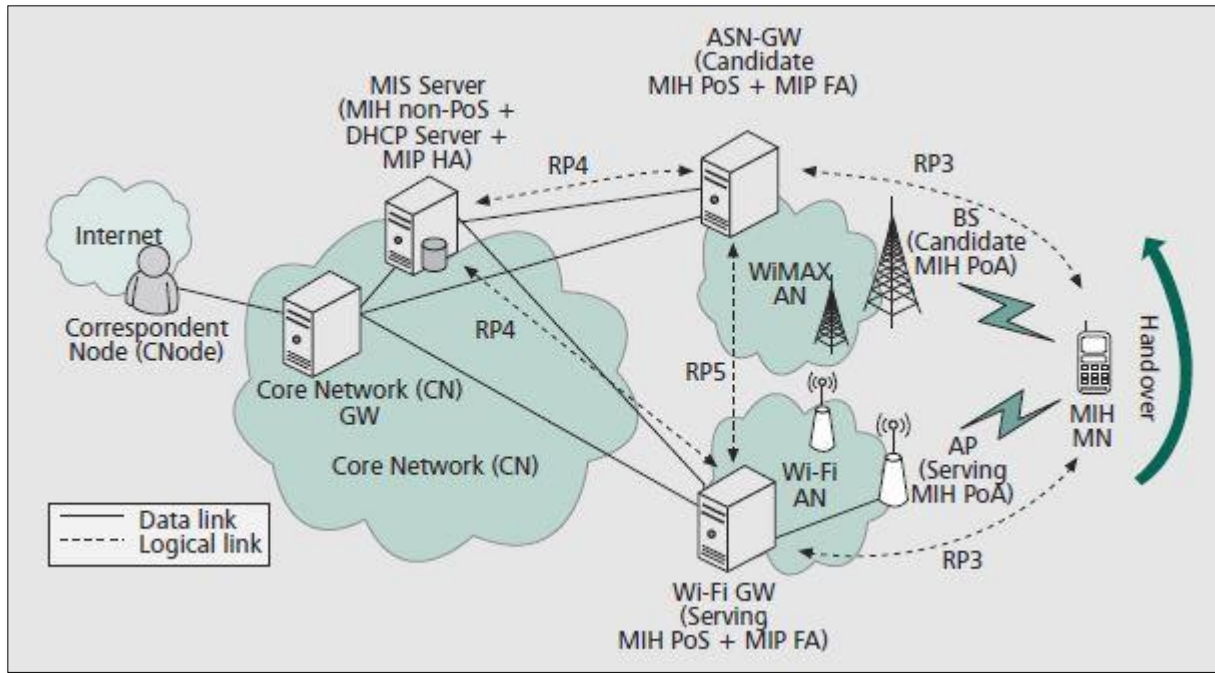
ανταποκριτή (CNode) στο Internet και ενός MIH-enabled MN (MIH MN). Πρόσβαση για το MIH MN παρέχεται στο Wi-Fi δίκτυο μέσω του AP και της Wi-Fi πύλης(Wi-Fi GW).



Εικόνα 33: Wi-Fi/WiMAX αρχιτεκτονική για την PoA/PoS προσέγγιση [18]

Το AP σε αυτή την τοπολογία είναι προσβάσιμο από το MN μέσω της διασύνδεσης RP1. Ομοίως, για το WiMAX AN, το BS που δρα ως ένα συνδυασμένο PoA/PoS προσφέρει στο MIH MN πρόσβαση στην υποδομή WiMAX (δηλαδή, WiMAX - συγκεκριμένα CN στοιχεία, όπως η πρόσβαση δικτυακής πύλης υπηρεσιών [ASN-GW]). Σύμφωνα με το μοντέλο επικοινωνίας IEEE 802.21, η διεπαφή μεταξύ της BS και του MIH MN συμβολίζεται ως διεπαφή RP2, ενώ η RP5 διασύνδεση θεωρείται μεταξύ του BS και του AP. Στο CN ο διακομιστής MIIS διατηρεί τη βάση δεδομένων που παρέχει υπηρεσίες πληροφόρησης στους κόμβους του δικτύου MIH στα ANs και MIH MN, ενώ η CN GW ενεργεί ως σύνορο του ενοποιημένου Wi-Fi/WiMAX δικτύου με το Internet. Εκτός από τη λειτουργικότητα MIH, ο MIIS διακομιστής υποστηρίζει επίσης το Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP) και τη λειτουργικότητα του MIP home agent (HA). Ως εκ τούτου, ο MIIS server είναι σε θέση να αλληλεπιδράσει με MIP foreign agents (FAs) που βρίσκονται στα ANs για τους σκοπούς της MM. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι ο διακομιστής MIIS συνδέεται λογικά με τις οντότητες PoS στην ANS μέσω των διασυνδέσεων RP4.

Εναλλακτικά, στην προσέγγιση non-PoA/PoS που απεικονίζεται στην Εικόνα 33, κάθε λειτουργία PoS στα ANs μετακινείται πιο κοντά στο CN, με την ASN-GW και την Wi-Fi GW να υποστηρίζουν τις λειτουργίες MIH. Αφού τα POSs εφαρμόζονται στους κόμβους του δικτύου που είναι ποτ PoAs, οι διασυνδέσεις RP3 χρησιμοποιούνται για ενδο-MIH πρωτόκολλο επικοινωνίας με το MIH MN, με τη βοήθεια ενός layer 3 MIH μηχανισμού μεταφοράς.

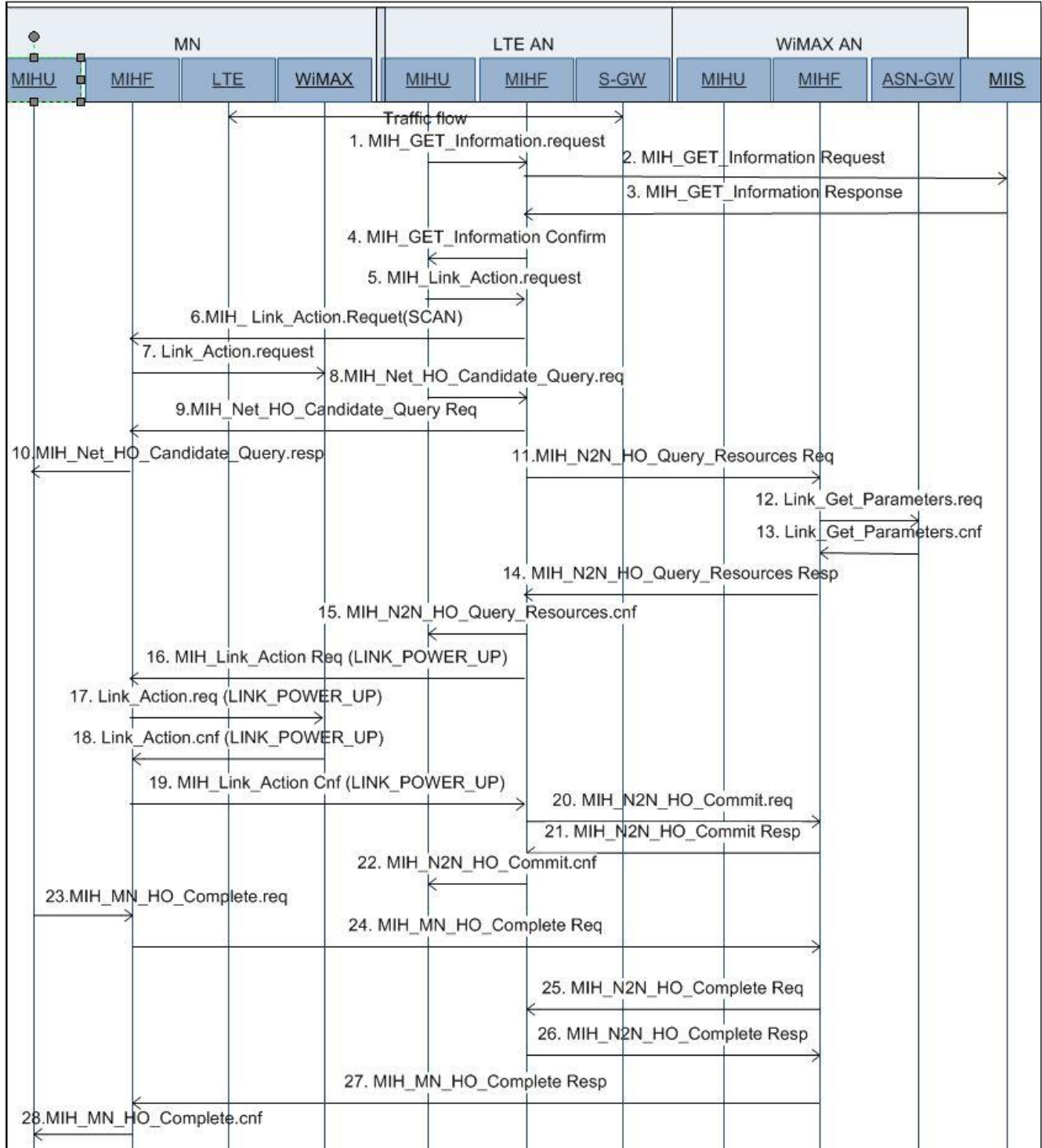


Εικόνα 34: Wi-Fi/WiMAX αρχιτεκτονική για την non PoA/PoS προσέγγιση [18]

### 7.3 MIH Vertical Handover Signaling

Ο κύριος σκοπός του IEEE 802.21 είναι να επιτρέψει το handover μεταξύ ετερογενών τεχνολογιών (συμπεριλαμβανομένων IEEE 802 και 3GPP τεχνολογιών) χωρίς διακοπή της υπηρεσίας, συμβάλλοντας στη βελτίωση της εμπειρίας του χρήστη των κινητών τερματικών. Πολλές λειτουργίες που απαιτούνται για την εξασφάλιση της συνέχειας της συνόδου εξαρτώνται από πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις που είναι ειδικές για κάθε συγκεκριμένη τεχνολογία. Το πρότυπο 802.21 παρέχει ένα πλαίσιο που επιτρέπει υψηλότερα σε επίπεδα να αλληλεπιδρούν με τα χαμηλότερα στρώματα για να εξασφαλίσουν τη συνέχεια της συνεδρίας χωρίς να ασχολούνται με τις ιδιαιτερότητες της κάθε τεχνολογίας.

### 7.3.1 MIH Vertical Handover Signaling μεταξύ LTE και WiMAX



*Εικόνα 35: MIH handover from LTE to WiMAX [18]*

Στην συνέχεια αναλύονται τα μηνύματα και οι διαδικασίες που εμπλέκονται στο handover [18]:

1-4. Με αυτά τα μηνύματα υλοποιείται η διαδικασία της ανακάλυψης των γειτονικών σημείων πρόσβασης. Ο LTE MIHU ξεκινά το φάση της προετοιμασίας του handover ενεργοποιώντας τη διαδικασία ανακάλυψης των υποψήφιων σημείων πρόσβασης. Οι πληροφορίες σχετικά με τις υποψήφιες τεχνολογίες πρόσβασης ανακτώνται με ερωτήματα από το διακομιστή MIIIS χρησιμοποιώντας MIH\_Get\_ μηνύματα πληροφορίας. Τα ερώτημα μπορεί να βασίζεται στην τρέχουσα PoA θέση και το αποτέλεσμα της επιστρέφει τα υποψήφια δίκτυα (PoAs) σε κοντινή απόσταση, μαζί με τα κύρια χαρακτηριστικά τους. Η τελευταία πληροφορία είναι πολύ χρήσιμη γιατί μπορεί να βοηθήσει το MN αργότερα στο να σαρώσει συγκεκριμένα ραδιοδίκτυα και όχι κάθε διαθέσιμο δίκτυο.

5-7. Σε αυτή τη φάση γίνεται η ενεργοποίηση (Power on) και η σάρωση για τα διαθέσιμα περιβάλλοντα δίκτυα. Ο MIIIS εξυπηρετητής δηλώνει ότι ένα δίκτυο πρόσβασης WiMAX είναι διαθέσιμο. Κατά συνέπεια, η διεπαφή WiMAX της MN είναι ενεργοποιημένη για να ξεκινήσει μια διαδικασία σάρωσης για να ελέγξει αν το WiMAX BS είναι προσβάσιμο.

8-15. Μέσα από αυτά τα μηνύματα ολοκληρώνεται η διαδικασία του ελέγχου των διαθέσιμων πόρων του WiMAX. Με την ολοκλήρωση της σάρωσης, η MN ειδοποιεί LTE MIHU ότι το δίκτυο WiMAX είναι προσβάσιμο. Στη συνέχεια, το LTE MIHU ελέγχει για τη διαθεσιμότητα του MN για το handover και ανακτά τις προτιμήσεις του MN σχετικά με το υποψήφιο AN με ανταλλαγή MIH\_Net\_HO\_Candidate\_Query μηνυμάτων με το MN. Κατόπιν, το LTE MIHU ανακτά πληροφορίες για τον πόρο από το WiMAX δίκτυο πρόσβασης μέσω του κορμού με MIH\_N2N\_HO\_Query\_Resources μηνύματα. Ο χρήστης MIH που εγκαθίσταται στο WiMAX BS (εφεξής ονομάζεται WiMAX MIHU), με τη σειρά του, χρησιμοποιεί τις MIH\_Link\_Get\_Parameters εντολές για να ελέγξει τους διαθέσιμους πόρους.

16-19. Σε αυτήν την φάση λαμβάνεται η απόφαση για το handover και ενεργοποιείται η βασική L2 WiMAX συνδεσιμότητα. Με την διαθεσιμότητα των πόρων, τα αποτελέσματα της σάρωσης, και άλλες πληροφορίες δικτύου που έχουν ανακτηθεί νωρίτερα από το διακομιστή MIIIS, το δίκτυο πρόσβασης WiMAX επιλέγεται για το handover από το LTE MIHU. Η απόφαση για το handover ενεργοποιεί επίσης την MIH\_Link\_Action (LINK\_POWER\_UP) εντολή συναλλαγής μεταξύ του LTE MIHU και του MN, προκειμένου να δημιουργηθεί σύνδεση στο στρώμα ζεύξης με το WiMAX PoA.

20-22. Εδώ περιλαμβάνεται η ενεργοποίηση των πόρων του WiMAX. Η αίτηση κράτησης (reservation request) μεταφέρεται μέχρι το WiMAX MIHU μέσω των μηνυμάτων

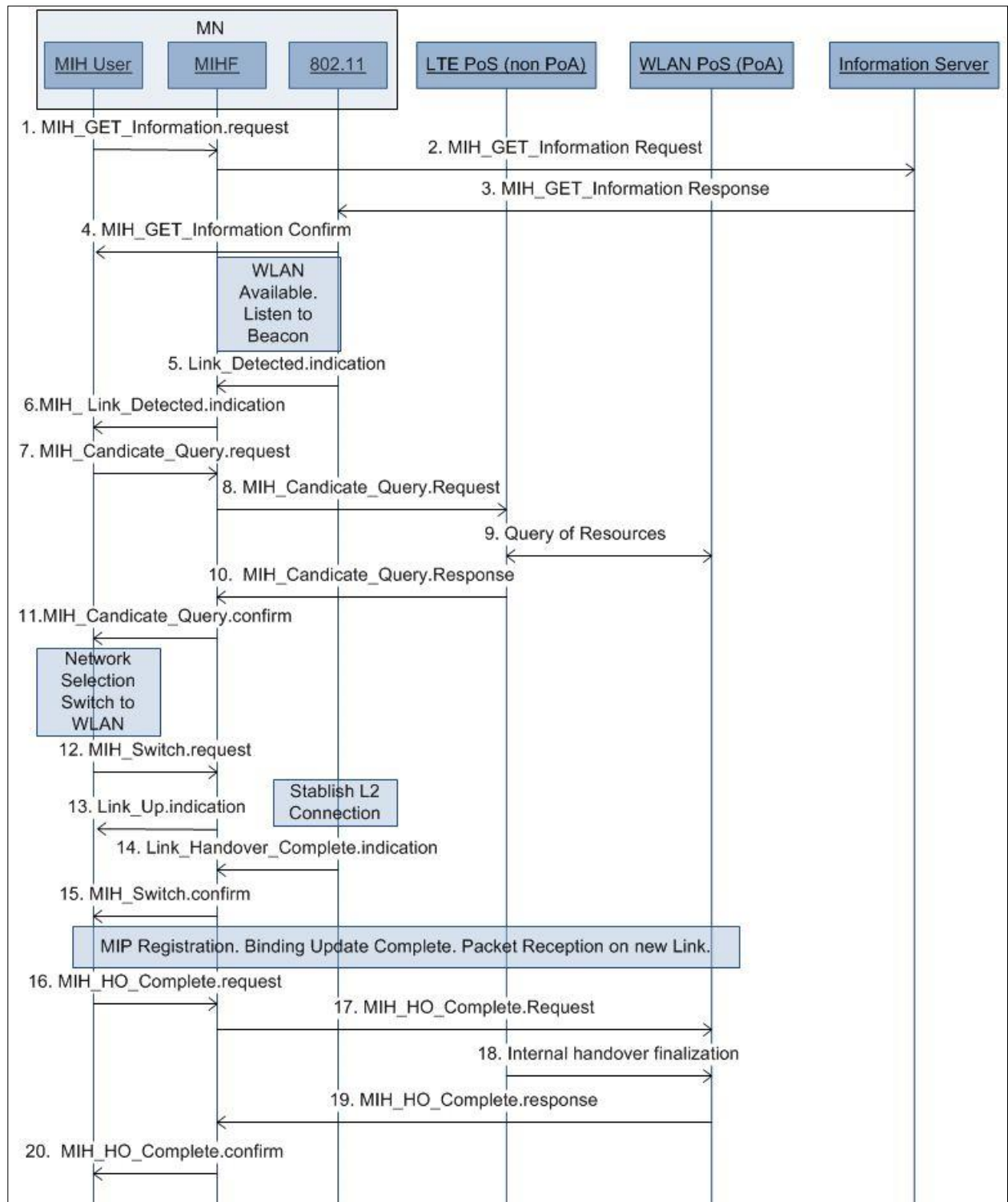


MIH\_N2N\_HO\_Commit. Στη συνέχεια, ο WiMAX MIHU ενεργοποιεί τις MIH\_Link\_Actions (QOS\_RESERVATION) εντολές για να επικοινωνήσει και να επιβάλει την απόφαση για κράτηση στο σύστημα WiMAX. Αυτές οι MIH εντολές εκτελούνται είτε τοπικά στο PoS στόχο ή απομακρυσμένα στο MN, ανάλογα με την τεχνολογία ραδιο πρόσβασης.

23-28. Μετά την ολοκλήρωση της ενεργοποίησης των, η MN ξεκινά τη φάση εκτέλεσης του handover. Αυτό σημαίνει ότι το φυσικό handover από LTE σε WiMAX υλοποιείται, καθώς και οι διαδικασίες DHCP και MM σε επίπεδο IP λαμβάνουν χώρα. Τέλος, η ip κυκλοφορία αρχίζει να ρέει μέσα από την σύνδεση WiMAX και η φάση της ολοκλήρωσης του handover ενεργοποιείται. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, χρησιμοποιώντας μηνύματα MIH\_N2N\_HO\_Complete, οι πόροι που διατίθενται στο LTE απελευθερώνονται και η διεπαφή έχει προγραμματιστεί να απενεργοποιηθεί μετά το πέρας του handover. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας MIH\_Link\_Actions (QOS\_DELETION, LINK\_POWER\_DOWN) μηνύματα.

### **7.3.2 MIH Vertical Handover Signaling μεταξύ LTE και WLAN**

Στην Εικόνα 36 φαίνεται η ανταλλαγή μηνυμάτων που εμπλέκονται σε ένα handover από 3G σε WLAN.



Εικόνα 36: MIH handover from LTE to WLAN [14]

Ακολουθεί μια λεπτομερής επεξήγηση [14] των μηνυμάτων και των διαδικασιών που εμπλέκονται στην διαδικασία του handover:

1-4. Η διαδικασία του handover ξεκινάει από το MIF User του MN ρωτώντας τον MIF που βρίσκεται στο ίδιο το MN για τα γύρω δίκτυα (μήνυμα 1). Αυτό το ερώτημα διαβιβάζεται από την MIF στο διακομιστή πληροφορίας (information server) που βρίσκεται στο δίκτυο του φορέα (ή στο δίκτυο άλλου παρόχου). Το ερώτημα ξεκινάει από το μήνυμα 1 και η απάντηση δίνεται με το μήνυμα 4. Μέσα από αυτά τα τέσσερα μηνύματα το MN παίρνει την απαιτούμενη πληροφορία, προκειμένου να αποκτήσει μια κατανόηση των δικτύων στα οποία θα εκτελέσει μια διαπομπή κατά την περιαγωγή μέσα από τη συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Δεδομένου ότι η απάντηση περιέχει πληροφορίες σχετικά με πιθανό δίκτυο WLAN, το MN αλλάζει στη διασύνδεση του WLAN και αρχίζει να ακούει για τυχόν μεταδόσεις.

5. Μόλις ληφθεί ένα μήνυμα, το IEEE 802.11 στρώμα ζεύξης θα δημιουργήσει μήνυμα Link Detected.indication. Το στρώμα ζεύξης, μέσω του IEEE 802.11 που ορίζεται, δείχνει την ανίχνευση μιας νέας σύνδεσης. Αυτό αντιστοιχίζεται στο μήνυμα μέσω της χρήσης του MIF LINK SAP.

6. Η ένδειξη αυτή διαβιβάζεται από το MIF στον MIF χρήστη.

7-8. Όταν ο MIF User λαμβάνει το MIF Link detected.indication, δίνει το έναυσμα για το handover με την αποστολή στο PoS του (που βρίσκεται στο LTE δίκτυο) της δυναμικής πληροφορίας σχετικά με τα υποψήφια δίκτυα που ανακαλύφθηκαν μέχρι αυτή στιγμή. Αυτή η πληροφορία αποστέλλεται στο μήνυμα 7 στην MIF η οποία προωθεί αυτό το ερώτημα στο Serving PoS (μήνυμα 8).

9-11. Μετά τη λήψη του μηνύματος 8, το serving PoS ξεκινά ερωτήματα προς τα υποψήφια διαθέσιμα δίκτυα (λαμβάνοντας υπόψη τις πληροφορίες που παρέχονται από το MN) ζητώντας την λίστα των διαθέσιμων πόρων, καθώς επίσης τις απαιτήσεις QoS του χρήστη (ανταλλαγή 9). Αυτό γίνεται με διαδοχική ανταλλαγή μηνυμάτων ερωτήματος πόρων με ένα ή περισσότερα υποψήφια PoSs. Το αποτέλεσμα των ερωτημάτων αποστέλλεται στο MN μέσω του μηνύματος 10 και 11. Σε αυτό το σημείο, το MN έχει αρκετές πληροφορίες για τα γύρω δίκτυα ώστε να λάβει μια απόφαση σχετικά με το δίκτυο στο οποίο θα κάνει handover.

12-15 Μόλις ο MIF User έχει αποφασίσει το δίκτυο στόχο για να εκτελέσει handover, παρέχει μια εντολή αλλαγής στο MIF (μήνυμα 12), η οποία θα ενεργοποιήσει μια σύνδεση WLAN L2. Μετά την έκδοση των εντολών για να ξεκινήσει το WLAN τη δημιουργία σύνδεσης, η MIF στέλνει ένα μήνυμα για το MIF User που δείχνει την έναρξη της σύνδεσης (μήνυμα 13). Μόλις πραγματοποιηθεί η σύνδεση, το WLAN MAC στρώμα εκδίδει μια αναφορά στο τέλος του L2 handover στο MIF (μήνυμα 14), το οποίο θα διαβιβασθεί στο MIF User (μήνυμα 15).

16. Μόλις ληφθεί το μήνυμα 15 μια υψηλότερου στρώματος διαδικασία handover μπορεί να ξεκινήσει. Στην περίπτωση αυτή το Mobile IP έχει επιλεγεί, αν και οποιοδήποτε άλλο πρωτόκολλο διαχείρισης της κινητικότητας θα ταίριαζε εξίσου.

17-18. Όταν το handover ολοκληρώνεται σε υψηλότερα στρώματα, ο MIP User στέλνει ένα μήνυμα MIP HO Complete στην MIPF το οποίο ενημερώνει το PoS στόχο (Μηνύματα 16 και 17), το οποίο γίνεται το νέο PoS εξυπηρέτησης. Σε αυτό το σημείο το PoS στόχος ενημερώνει όλες τις οντότητες του δικτύου για την οριστικοποίηση του handover (ανταλλαγή 18). Ειδικότερα, το PoS στόχος έχει να ενημερώσει το PoS εξυπηρέτησης για την ολοκλήρωση του handover έτσι ώστε να μπορεί να απελευθερώσει τυχόν πόρους.

19-20. Τέλος, το μήνυμα 19 περατώνει τη διαδικασία handover, υποδεικνύοντας στο MN ότι η διαδικασία έχει τελειώσει και το μήνυμα 20 ενημερώνει το χρήστη MIP.

## 8. Συμπεράσματα

Για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας του handover χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο προσομοίωσης δικτύων ns3. Έγιναν διαδοχικές προσομοιώσεις από LTE σε WiMAX και από LTE σε WLAN. Ο σχετικός κώδικας περιλαμβάνεται στο **Παράρτημα – Κώδικας Προσομοίωσης ns3**.

Συνοψίζοντας σε αυτή την εργασία αναλύθηκαν οι 2 βασικές κατηγορίες vertical handover στο κομμάτι του signaling ανάμεσα σε ετερογενή δίκτυα LTE , WiMAX και WLAN. Αναλύθηκαν αρχικά η αρχιτεκτονική και οι βασικές διαδικασίες του EPC vertical handover την διασύνδεση του LTE με το WiMAX και το WLAN. Μελετήσαμε έναν νέο βελτιστοποιημένο μηχανισμό handover που επιτρέπει την απρόσκοπτη κινητικότητα μεταξύ τεχνολογιών κινητής πρόσβασης με single radio κινητά τερματικά [4]. Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το single radio handover (δηλαδή, με τερματικά που δεν πρέπει να μεταδίδουν ταυτόχρονα και στα 2 σημεία πρόσβασης) μπορεί να μετριάσει τα προβλήματα συνύπαρξης ραδιοσυχνοτήτων που υπάρχουν με μηχανισμούς dual-radio handover με κόστος την περισσότερη πληροφορία που πρέπει να διακινείται στο δίκτυο και στις τερματικές συσκευές.

Στο MIH vertical handover δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στην αρχιτεκτονική με χρήση FPMIPv6 [5] που μπορεί να μειώσει την καθυστέρηση του handover που εμφανίζει η PMIPv6 επιτρέποντας στο τερματικό να αρχίσει να προωθεί πακέτα μόλις ανιχνεύει μια νέα σύνδεση δικτύου. Οι προτεινόμενες αρχιτεκτονικές και η αντίστοιχη διαδικασία handover με βάση το IEEE 802.21 προσπαθούν να προσδιορίσουν μια συνολική λύση για την καλύτερη δυνατή λειτουργία του handover. Τα βασικά χαρακτηριστικά είναι η πρακτική προσέγγιση της υλοποίησης συμπεριλαμβάνοντας την ζήτηση και τη δέσμευση πόρων σε συνδυασμό με τη σωστή διαχείριση ενέργειας που δεν καλύπτονται σήμερα από το πρότυπο IEEE 802.21.

Πεδίο για περαιτέρω μελέτη και έρευνα με βάση αυτήν την εργασία είναι η συνέχιση των προσομοιώσεων με το ns3 και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το packet loss και το handover delay για κάθε περίπτωση που αναλύθηκε.

## Αναφορές

- [1] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, and Johan Sköld, "4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband", *Academic Press*, 2011
- [2] Tara Ali-Yahiya, Understanding LTE and its Performance, *Springer*, 2011
- [3] Jeanette Wannstrom, "LTE-Advanced", [www.3gpp.org](http://www.3gpp.org) , July 2013
- [4] Pouya Taaghol, Apostolis K. Salkintzis, Jay Iyer, "Seamless Integration of Mobile WiMAX in 3GPP Networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 10, pp. 74-85, October 2008
- [5] Jong-Moon Chung, Daeyoung Lee, William J. Song, Sungho Choi, Chaegwon Lim and Taesun Yeoum, "Enhancements to FPMIPv6 for Improved Seamless VHO between LTE and Heterogeneous Access Networks", *IEEE Wireless Communications*, vol. 20 , no. 3 , pp. 112-119, June 2013
- [6] William J. Song, Jong-Moon Chung, and Daeyoung Lee, Yonsei University, Chaegwon Lim, Sungho Choi, and Taesun Yeoum, Samsung Electronics Co. LTD, "Improvements to Seamless Vertical Handover between Mobile WiMAX and 3GPP UTRAN through the Evolved Packet Core", *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 4, pp. 66-73, April 2009
- [7] Jeffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh, Rias Muhamed , "Fundamentals of WiMAX- Understanding Broadband Wireless Networking", *Prentice Hall*, February 2007
- [8] Chris G. Guy, Myasar R. Tabany, "LTE and LTE-A Interworking and Interoperability with 3GPP and non-3GPP Wireless Networks", *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, vol. 4, no. 8, pp. 649-656, Aug 2013
- [9] Alan Kavanagh, Kalyani Bogineni, Roberto David Carnero Ros, "Interworking between Next Generation Fixed and 3GPP Wireless Networks", *Broadband forum*, technical report 203, issue 1, August 2012
- [10] Wireless LAN Components and Terminology ([www.etutorials.org/](http://www.etutorials.org/))
- [11] Architecture enhancements for non-3GPP accesses ,3GPP Technical Specification 23.402 , version 11.4.0, Release 11, 2012
- [12] Frei S. , Fuhrmann W. , Rinkel A. , Ghita B.V., "Improvements to Inter System Handover in the EPC Environment", *IEEE Communications Magazine*, 4th IFIP International Conference on IEEE, pp. 1-5, February 2011

- [13] Labros Sarakis and George Kormentzas -NCSR “Demokritos”, Francisco Moya Guirao - European Commission, "Seamless Service Provision for Multi Heterogeneous Access", *IEEE Wireless Communications*, vol. 16, no. 5 , pp. 32-40, October 2009
- [14] Antonio de la Oliva, Telemaco Melia, Albert Banchs, Ignacio Soto and Albert Vidal, "IEEE 802.21 (Media Independent Handover services) Overview", *IEEE Wireless Communications*, vol. 15, no.4 , pp. 96-103, 2008
- [15] Jorge Cabrejas, Pablo Gualda, Jose F Monserrat and David Martín-Sacristán, "Application of MIH for the lightweight deployment of LTE-advanced systems through mobile relaying", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012
- [16] Sueng Jae Bae, Min Young Chung, Jungmin So, "Handover Triggering Mechanism Based on IEEE 802.21 in Heterogeneous Networks with LTE and WLAN", *Information Networking (ICOIN)*, International Conference, pp. 399-403, 2011
- [17] George Lampropoulos, Apostolis K. Salkintzis, Nikos Passas, "Media-Independent Handover for Seamless Service Provision in Heterogeneous Networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no.1 , pp. 64-71,2008
- [18] G. Lampropoulos, C. Skianis, and P. Neves, “Optimized fusion of heterogeneous wireless networks based on media-independent handover operations [accepted from open call],” *Wireless Communications IEEE*, vol. 17, no. 4, pp. 78–87, 2010.
- [19] A. Bhuvaneswari, Dr. E. George Dharma Prakash Raj, "An Overview of Vertical Handoff Decision Making Algorithms", *International Journal of Computer Network and Information Security*, vol. 4, no. 9, pp. 55-62, 2012
- [20] Overview of IEEE P802.16m Technology and Candidate RITfor IMT-advanced, *IEEE 802.16 IMT-Advanced Evaluation Group Coordination Meeting*, 13 January 2010
- [21] Architecture enhancements for non-3GPP accesses ,3GPP Technical Specification 23.402 , version 12.1.0, Release 12, 2013
- [22] General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access ,3GPP Technical Specification 23.401 , version 10.7.0, Release 10, 2012
- [23] Technical Specification Group Services and System Aspects; Policy and charging control architecture ,3GPP Technical Specification 23.203 , version 12.1.0, Release 12, 2013

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Κώδικας Προσομοίωσης NS3

### lte-wimax

```
#include "ns3/network-module.h"

#include "ns3/core-module.h"

#include "ns3/internet-module.h"

#include "ns3/dce-module.h"

#include "ns3/point-to-point-module.h"

#include "ns3/wimax-module.h"

#include "ns3/lte-module.h"

#include "ns3/mobility-module.h"

#include "ns3/applications-module.h"

#include "ns3/netanim-module.h"

#include "ns3/constant-position-mobility-model.h"

#include "ns3/config-store-module.h"

using namespace ns3;

NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("LteWiMax");

void setPos (Ptr<Node> n, int x, int y, int z)

{

Ptr<ConstantPositionMobilityModel> loc = CreateObject<ConstantPositionMobilityModel> ();

n->AggregateObject (loc);

Vector locVec2 (x, y, z);

loc->SetPosition (locVec2);

}
```



```
void
PrintTcpFlags (std::string key, std::string value)
{
    NS_LOG_INFO (key << "=" << value);
}

int main (int argc, char *argv[])
{
    LogComponentEnable ("Wimax", LOG_LEVEL_ALL);

    std::string bufSize = "";
    bool disWimax = false;
    bool disLte = false;
    double stopTime = 45.0;
    std::string p2pdelay = "10ms";

    CommandLine cmd;

    cmd.AddValue ("bufsize", "Snd/Rcv buffer size.", bufSize);
    cmd.AddValue ("disWimax", "Disable Wimax.", disWimax);
    cmd.AddValue ("disLte", "Disable LTE.", disLte);
    cmd.AddValue ("stopTime", "StopTime of simulatino.", stopTime);
    cmd.AddValue ("p2pDelay", "Delay of p2p links. default is 10ms.", p2pdelay);
    cmd.Parse (argc, argv);

    if (disWimax && disLte)
    {
        NS_LOG_INFO ("no active interface");
        return 0;
    }
}
```

```
}

GlobalValue::Bind ("ChecksumEnabled", BooleanValue (true));

NodeContainer nodes, routers;

nodes.Create (2);

routers.Create (1);

DceManagerHelper dceManager;

dceManager.SetNetworkStack ("ns3::LinuxSocketFdFactory",
                             "Library", StringValue ("liblinux.so"));

LinuxStackHelper stack;

stack.Install (nodes);

stack.Install (routers);

dceManager.Install (nodes);

dceManager.Install (routers);

PointToPointHelper pointToPoint;

NetDeviceContainer devices1, devices2;

Ptr<LteHelper> lteHelper = CreateObject<LteHelper> ();

Ptr<PointToPointEpcHelper> epcHelper = CreateObject<PointToPointEpcHelper> ();

YansWimaxPhyHelper phy;

Ipv4AddressHelper address1, address2;

std::ostringstream cmd_oss;

address1.SetBase ("10.1.0.0", "255.255.255.0");

address2.SetBase ("10.2.0.0", "255.255.255.0");
```

```
Ipv4InterfaceContainer if1, if2;

pointToPoint.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("2Mbps"));

pointToPoint.SetChannelAttribute ("Delay", StringValue (p2pdelay));

Ptr<RateErrorModel> em1 =

    CreateObjectWithAttributes<RateErrorModel> ("RanVar", StringValue
("ns3::UniformRandomVariable[Min=0.0|Max=1.0]"),

        "ErrorRate", DoubleValue (0.01),

        "ErrorUnit", EnumValue (RateErrorModel::ERROR_UNIT_PACKET)

        );

setPos (nodes.Get (0), -20, 30 / 2, 0);

setPos (nodes.Get (1), 100, 30 / 2, 0);

// LTE

if (!disLte)

{

    // Left link: H1 <-> LTE-R

    NodeContainer enbNodes;

    enbNodes.Create(1);

    lteHelper->SetEpcHelper (epcHelper);

    Ptr<Node> pgw = epcHelper->GetPgwNode ();

    setPos (enbNodes.Get (0), 60, -4000, 0);

    NetDeviceContainer enbLteDevs = lteHelper->InstallEnbDevice (enbNodes);

    NetDeviceContainer ueLteDevs = lteHelper->InstallUeDevice (nodes.Get (0));

    // Assign ip addresses

    if1 = epcHelper->AssignUeIpv4Address (NetDeviceContainer (ueLteDevs));
```

```

lteHelper->Attach (ueLteDevs.Get(0), enbLteDevs.Get(0));

// setup ip routes
cmd_oss.str ("");
cmd_oss << "rule add from " << if1.GetAddress (0, 0) << " table " << 1;
LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (0), Seconds (0.1), cmd_oss.str ().c_str ());
cmd_oss.str ("");
cmd_oss << "route add default via " << "7.0.0.1 " << " dev sim" << 0 << " table " << 1;
LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (0), Seconds (0.1), cmd_oss.str ().c_str ());

// LTE-R <-> H2
// Right link
devices2 = pointToPoint.Install (nodes.Get (1), pgw);
devices2.Get (0)->SetAttribute ("ReceiveErrorModel", PointerValue (em1));
// Assign ip addresses
if2 = address2.Assign (devices2);
address2.NewNetwork ();
// setup ip routes
cmd_oss.str ("");
cmd_oss << "rule add from " << if2.GetAddress (0, 0) << " table " << (1);
LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (1), Seconds (0.1), cmd_oss.str ().c_str ());
cmd_oss.str ("");
cmd_oss << "route add 10.2." << 0 << ".0/24 dev sim" << 0 << " scope link table " << (1);
LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (1), Seconds (0.1), cmd_oss.str ().c_str ());
setPos (pgw, 70, 0, 0);
}

```

```

if (!disWimax)
{
    // Left link: H1 <-> Wimax-R

    WimaxHelper wimax = WiMaxHelper::Default ();

    phy = YansWiMaxPhyHelper::Default ();

    YansWiMaxChannelHelper phyChannel = YansWiMaxChannelHelper::Default ();

    NqosWiMaxMacHelper mac;

    phy.SetChannel (phyChannel.Create ());

    mac.SetType ("ns3::AdhocWiMaxMac");

    Wimax.SetStandard (WIMAX_PHY_STANDARD_80211a);

    devices1 = Wimax.Install (phy, mac, NodeContainer (nodes.Get (0), routers.Get (0)));

    // Assign ip addresses

    if1 = address1.Assign (devices1);

    address1.NewNetwork ();

    // setup ip routes

    cmd_oss.str ("");

    cmd_oss << "rule add from " << if1.GetAddress (0, 0) << " table " << 2;

    LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (0), Seconds (0.1), cmd_oss.str ().c_str ());

    cmd_oss.str ("");

    cmd_oss << "route add 10.1." << 0 << ".0/24 dev sim"

        << devices1.Get (0)->GetIfIndex () << " scope link table " << 2;

    LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (0), Seconds (0.1), cmd_oss.str ().c_str ());

    cmd_oss.str ("");

    cmd_oss << "route add default via " << if1.GetAddress (1, 0) << " dev sim"

        << devices1.Get (0)->GetIfIndex () << " table " << 2;

    LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (0), Seconds (0.1), cmd_oss.str ().c_str ());

    cmd_oss.str ("");
}

```

```
cmd_oss << "route add 10.1.0.0/16 via " << if1.GetAddress (0, 0) << " dev sim0";
LinuxStackHelper::RunIp (routers.Get (0), Seconds (0.2), cmd_oss.str ().c_str ());

// Global default route
if (disLte)
{
cmd_oss.str ("");
cmd_oss << "route add default via " << if1.GetAddress (1, 0) << " dev sim"
<< devices1.Get (0)->GetIfIndex ();
LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (0), Seconds (0.1), cmd_oss.str ().c_str ());
}

// Down/Up
#if 0
cmd_oss.str ("");
cmd_oss << "link set down dev sim1";
LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (0), Seconds (1.0), cmd_oss.str ().c_str ());
cmd_oss.str ("");
cmd_oss << "link set up dev sim1";
LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (0), Seconds (10.0), cmd_oss.str ().c_str ());
#endif

// WiMAX-R <-> H2
// Right link
devices2 = pointToPoint.Install (nodes.Get (1), routers.Get (0));
devices2.Get (0)->SetAttribute ("ReceiveErrorModel", PointerValue (em1));
// Assign ip addresses
```

```
if2 = address2.Assign (devices2);

address2.NewNetwork ();

// setup ip routes

cmd_oss.str ("");

cmd_oss << "rule add from " << if2.GetAddress (0, 0) << " table " << (2);

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (1), Seconds (0.1), cmd_oss.str ().c_str ());

cmd_oss.str ("");

cmd_oss << "route add 10.2." << 1 << ".0/24 dev sim" << 1 << " scope link table " << (2);

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (1), Seconds (0.1), cmd_oss.str ().c_str ());

cmd_oss.str ("");

cmd_oss << "route add 10.1.0.0/16 via " << if2.GetAddress (1, 0) << " dev sim" << 1 << " table " << (2);

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (1), Seconds (0.1), cmd_oss.str ().c_str ());

cmd_oss.str ("");

cmd_oss << "route add 10.2.0.0/16 via " << if2.GetAddress (1, 0) << " dev sim1";

LinuxStackHelper::RunIp (routers.Get (0), Seconds (0.2), cmd_oss.str ().c_str ());

setPos (routers.Get (0), 70, 30, 0);

}

// default route

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (0), Seconds (0.1), "route add default via 7.0.0.1 dev sim0");

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (1), Seconds (0.1), "route add default via 10.2.0.2 dev sim0");

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (0), Seconds (0.1), "rule show");

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (0), Seconds (5.1), "route show table all");

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (1), Seconds (0.1), "rule show");

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (1), Seconds (5.1), "route show table all");

// debug
```

```
stack.SysctlSet (nodes, ".net.mptcp.mptcp_debug", "1");

#if 1

LinuxStackHelper::SysctlGet (nodes.Get (0), NanoSeconds (0),
    ".net.ipv4.tcp_available_congestion_control", &PrintTcpFlags);

LinuxStackHelper::SysctlGet (nodes.Get (0), NanoSeconds (0),
    ".net.ipv4.tcp_rmem", &PrintTcpFlags);

LinuxStackHelper::SysctlGet (nodes.Get (0), NanoSeconds (0),
    ".net.ipv4.tcp_wmem", &PrintTcpFlags);

LinuxStackHelper::SysctlGet (nodes.Get (0), NanoSeconds (0),
    ".net.core.rmem_max", &PrintTcpFlags);

LinuxStackHelper::SysctlGet (nodes.Get (0), NanoSeconds (0),
    ".net.core.wmem_max", &PrintTcpFlags);

LinuxStackHelper::SysctlGet (nodes.Get (0), Seconds (1),
    ".net.ipv4.tcp_available_congestion_control", &PrintTcpFlags);

LinuxStackHelper::SysctlGet (nodes.Get (0), Seconds (1),
    ".net.ipv4.tcp_rmem", &PrintTcpFlags);

LinuxStackHelper::SysctlGet (nodes.Get (0), Seconds (1),
    ".net.ipv4.tcp_wmem", &PrintTcpFlags);

LinuxStackHelper::SysctlGet (nodes.Get (0), Seconds (1),
    ".net.core.rmem_max", &PrintTcpFlags);

LinuxStackHelper::SysctlGet (nodes.Get (0), Seconds (1),
    ".net.core.wmem_max", &PrintTcpFlags);

#endif

#if 1

if (bufSize.length () != 0)

{
```



```
stack.SysctlSet (nodes, ".net.ipv4.tcp_rmem",
    bufSize + " " + bufSize + " " + bufSize);
//    "4096 87380 " +bufSize);
stack.SysctlSet (nodes, ".net.ipv4.tcp_wmem",
    bufSize + " " + bufSize + " " + bufSize);
stack.SysctlSet (nodes, ".net.core.rmem_max",
    bufSize);
stack.SysctlSet (nodes, ".net.core.wmem_max",
    bufSize);
}
#endif
```

```
DceApplicationHelper dce;
ApplicationContainer apps;

dce.SetStackSize (1 << 20);

// Launch iperf client on node 0
dce.SetBinary ("iperf");
dce.ResetArguments ();
dce.ResetEnvironment ();
dce.AddArgument ("-c");
dce.AddArgument ("10.2.0.1");
dce.ParseArguments ("-y C");
dce.AddArgument ("-i");
dce.AddArgument ("1");
```

```
dce.AddArgument ("--time");
dce.AddArgument ("40");
#if 0
if (bufSize.length () != 0)
{
    dce.AddArgument ("-w");
    dce.AddArgument (bufSize);
}
#endif

apps = dce.Install (nodes.Get (0));
apps.Start (Seconds (5.0));
// apps.Stop (Seconds (15));

// Launch iperf server on node 1
dce.SetBinary ("iperf");
dce.ResetArguments ();
dce.ResetEnvironment ();
dce.AddArgument ("-s");
dce.AddArgument ("-P");
dce.AddArgument ("1");
#if 0
if (bufSize.length () != 0)
{
    dce.AddArgument ("-w");
    dce.AddArgument (bufSize);
}
}
```

```
#endif

apps = dce.Install (nodes.Get (1));

apps.Start (Seconds (4));

pointToPoint.EnablePcapAll ("lte-wimax", false);

phy.EnablePcapAll ("lte-wimax", false);

// lteHelper->EnableTraces ();

// Output config store to txt format

Config::SetDefault ("ns3::ConfigStore::Filename", StringValue ("output-attributes.txt"));

Config::SetDefault ("ns3::ConfigStore::FileFormat", StringValue ("RawText"));

Config::SetDefault ("ns3::ConfigStore::Mode", StringValue ("Save"));

ConfigStore outputConfig2;

outputConfig2.ConfigureDefaults ();

outputConfig2.ConfigureAttributes ();

Simulator::Stop (Seconds (stopTime));

Simulator::Run ();

Simulator::Destroy ();

return 0;

}
```

#### **lte-wifi**

```
#include "ns3/network-module.h"

#include "ns3/core-module.h"

#include "ns3/internet-module.h"
```

```
#include "ns3/dce-module.h"

#include "ns3/point-to-point-module.h"

#include "ns3/wifi-module.h"

#include "ns3/lte-module.h"

#include "ns3/mobility-module.h"

#include "ns3/applications-module.h"

#include "ns3/netanim-module.h"

#include "ns3/constant-position-mobility-model.h"

#include "ns3/config-store-module.h"

using namespace ns3;

NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("DceMptcpLteWifi");

void setPos (Ptr<Node> n, int x, int y, int z)

{

    Ptr<ConstantPositionMobilityModel> loc = CreateObject<ConstantPositionMobilityModel> ();

    n->AggregateObject (loc);

    Vector locVec2 (x, y, z);

    loc->SetPosition (locVec2);

}

void

PrintTcpFlags (std::string key, std::string value)

{

    NS_LOG_INFO (key << "=" << value);

}
```

```
int main (int argc, char *argv[])
{
    LogComponentEnable ("DceMptcpLteWifi", LOG_LEVEL_ALL);

    std::string bufSize = "";

    bool disWifi = false;

    bool disLte = false;

    double stopTime = 45.0;

    std::string p2pdelay = "10ms";

    CommandLine cmd;

    cmd.AddValue ("bufsize", "Snd/Rcv buffer size.", bufSize);

    cmd.AddValue ("disWifi", "Disable WiFi.", disWifi);

    cmd.AddValue ("disLte", "Disable LTE.", disLte);

    cmd.AddValue ("stopTime", "StopTime of simulatino.", stopTime);

    cmd.AddValue ("p2pDelay", "Delay of p2p links. default is 10ms.", p2pdelay);

    cmd.Parse (argc, argv);

    if (disWifi && disLte)
    {
        NS_LOG_INFO ("no active interface");

        return 0;
    }

    GlobalValue::Bind ("ChecksumEnabled", BooleanValue (true));

    NodeContainer nodes, routers;

    nodes.Create (2);

    routers.Create (1);
```

```
DceManagerHelper dceManager;

dceManager.SetNetworkStack ("ns3::LinuxSocketFdFactory",
    "Library", StringValue ("liblinux.so"));

LinuxStackHelper stack;

stack.Install (nodes);

stack.Install (routers);

dceManager.Install (nodes);

dceManager.Install (routers);

PointToPointHelper pointToPoint;

NetDeviceContainer devices1, devices2;

Ptr<LteHelper> lteHelper = CreateObject<LteHelper> ();

Ptr<PointToPointEpcHelper> epcHelper = CreateObject<PointToPointEpcHelper> ();

YansWifiPhyHelper phy;

Ipv4AddressHelper address1, address2;

std::ostringstream cmd_oss;

address1.SetBase ("10.1.0.0", "255.255.255.0");

address2.SetBase ("10.2.0.0", "255.255.255.0");

Ipv4InterfaceContainer if1, if2;

pointToPoint.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("2Mbps"));

pointToPoint.SetChannelAttribute ("Delay", StringValue (p2pdelay));

Ptr<RateErrorModel> em1 =

    CreateObjectWithAttributes<RateErrorModel> ("RanVar", StringValue
("ns3::UniformRandomVariable[Min=0.0|Max=1.0]"),

        "ErrorRate", DoubleValue (0.01),
```

```
        "ErrorUnit", EnumValue (RateErrorModel::ERROR_UNIT_PACKET)
    );

setPos (nodes.Get (0), -20, 30 / 2, 0);

setPos (nodes.Get (1), 100, 30 / 2, 0);

// LTE

if (!disLte)

{

    // Left link: H1 <-> LTE-R

    NodeContainer enbNodes;

    enbNodes.Create(1);

    lteHelper->SetEpcHelper (epcHelper);

    Ptr<Node> pgw = epcHelper->GetPgwNode ();

    setPos (enbNodes.Get (0), 60, -4000, 0);

    NetDeviceContainer enbLteDevs = lteHelper->InstallEnbDevice (enbNodes);

    NetDeviceContainer ueLteDevs = lteHelper->InstallUeDevice (nodes.Get (0));

    // Assign ip addresses

    if1 = epcHelper->AssignUeIpv4Address (NetDeviceContainer (ueLteDevs));

    lteHelper->Attach (ueLteDevs.Get(0), enbLteDevs.Get(0));

    // setup ip routes

    cmd_oss.str ("");

    cmd_oss << "rule add from " << if1.GetAddress (0, 0) << " table " << 1;

    LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (0), Seconds (0.1), cmd_oss.str ().c_str ());
```

```

cmd_oss.str ("");

cmd_oss << "route add default via " << "7.0.0.1 " << " dev sim" << 0 << " table " << 1;

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (0), Seconds (0.1), cmd_oss.str ().c_str ());

// LTE-R <-> H2

// Right link

devices2 = pointToPoint.Install (nodes.Get (1), pgw);

devices2.Get (0)->SetAttribute ("ReceiveErrorModel", PointerValue (em1));

// Assign ip addresses

if2 = address2.Assign (devices2);

address2.NewNetwork ();

// setup ip routes

cmd_oss.str ("");

cmd_oss << "rule add from " << if2.GetAddress (0, 0) << " table " << (1);

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (1), Seconds (0.1), cmd_oss.str ().c_str ());

cmd_oss.str ("");

cmd_oss << "route add 10.2." << 0 << ".0/24 dev sim" << 0 << " scope link table " << (1);

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (1), Seconds (0.1), cmd_oss.str ().c_str ());

setPos (pgw, 70, 0, 0);

}

if (!disWifi)

{

// Left link: H1 <-> WiFi-R

WifiHelper wifi = WifiHelper::Default ();

phy = YansWifiPhyHelper::Default ();

YansWifiChannelHelper phyChannel = YansWifiChannelHelper::Default ();

```



```

NqosWifiMacHelper mac;

phy.SetChannel (phyChannel.Create ());

mac.SetType ("ns3::AdhocWifiMac");

wifi.SetStandard (WIFI_PHY_STANDARD_80211a);

devices1 = wifi.Install (phy, mac, NodeContainer (nodes.Get (0), routers.Get (0)));

// Assign ip addresses

if1 = address1.Assign (devices1);

address1.NewNetwork ();

// setup ip routes

cmd_oss.str ("");

cmd_oss << "rule add from " << if1.GetAddress (0, 0) << " table " << 2;

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (0), Seconds (0.1), cmd_oss.str ().c_str ());

cmd_oss.str ("");

cmd_oss << "route add 10.1." << 0 << ".0/24 dev sim"

    << devices1.Get (0)->GetIfIndex () << " scope link table " << 2;

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (0), Seconds (0.1), cmd_oss.str ().c_str ());

cmd_oss.str ("");

cmd_oss << "route add default via " << if1.GetAddress (1, 0) << " dev sim"

    << devices1.Get (0)->GetIfIndex () << " table " << 2;

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (0), Seconds (0.1), cmd_oss.str ().c_str ());

cmd_oss.str ("");

cmd_oss << "route add 10.1.0.0/16 via " << if1.GetAddress (0, 0) << " dev sim0";

LinuxStackHelper::RunIp (routers.Get (0), Seconds (0.2), cmd_oss.str ().c_str ());

// Global default route

if (disLte)

{

```

```
cmd_oss.str ("");

cmd_oss << "route add default via " << if1.GetAddress (1, 0) << " dev sim"
    << devices1.Get (0)->GetIfIndex ();

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (0), Seconds (0.1), cmd_oss.str ().c_str ());
}

// Down/Up

#if 0

cmd_oss.str ("");

cmd_oss << "link set down dev sim1";

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (0), Seconds (1.0), cmd_oss.str ().c_str ());

cmd_oss.str ("");

cmd_oss << "link set up dev sim1";

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (0), Seconds (10.0), cmd_oss.str ().c_str ());

#endif

// WiFi-R <-> H2

// Right link

devices2 = pointToPoint.Install (nodes.Get (1), routers.Get (0));

devices2.Get (0)->SetAttribute ("ReceiveErrorModel", PointerValue (em1));

// Assign ip addresses

if2 = address2.Assign (devices2);

address2.NewNetwork ();

// setup ip routes

cmd_oss.str ("");

cmd_oss << "rule add from " << if2.GetAddress (0, 0) << " table " << (2);

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (1), Seconds (0.1), cmd_oss.str ().c_str ());
```

```

cmd_oss.str ("");

cmd_oss << "route add 10.2." << 1 << ".0/24 dev sim" << 1 << " scope link table " << (2);

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (1), Seconds (0.1), cmd_oss.str ().c_str ());

cmd_oss.str ("");

cmd_oss << "route add 10.1.0.0/16 via " << if2.GetAddress (1, 0) << " dev sim" << 1 << " table " << (2);

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (1), Seconds (0.1), cmd_oss.str ().c_str ());

cmd_oss.str ("");

cmd_oss << "route add 10.2.0.0/16 via " << if2.GetAddress (1, 0) << " dev sim1";

LinuxStackHelper::RunIp (routers.Get (0), Seconds (0.2), cmd_oss.str ().c_str ());

setPos (routers.Get (0), 70, 30, 0);

}

// default route

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (0), Seconds (0.1), "route add default via 7.0.0.1 dev sim0");

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (1), Seconds (0.1), "route add default via 10.2.0.2 dev sim0");

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (0), Seconds (0.1), "rule show");

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (0), Seconds (5.1), "route show table all");

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (1), Seconds (0.1), "rule show");

LinuxStackHelper::RunIp (nodes.Get (1), Seconds (5.1), "route show table all");

// debug

stack.SysctlSet (nodes, ".net.mptcp.mptcp_debug", "1");

#if 1

LinuxStackHelper::SysctlGet (nodes.Get (0), NanoSeconds (0),

    ".net.ipv4.tcp_available_congestion_control", &PrintTcpFlags);

LinuxStackHelper::SysctlGet (nodes.Get (0), NanoSeconds (0),

```

```

        ".net.ipv4.tcp_rmem", &PrintTcpFlags);
LinuxStackHelper::SysctlGet (nodes.Get (0), NanoSeconds (0),
        ".net.ipv4.tcp_wmem", &PrintTcpFlags);
LinuxStackHelper::SysctlGet (nodes.Get (0), NanoSeconds (0),
        ".net.core.rmem_max", &PrintTcpFlags);
LinuxStackHelper::SysctlGet (nodes.Get (0), NanoSeconds (0),
        ".net.core.wmem_max", &PrintTcpFlags);
LinuxStackHelper::SysctlGet (nodes.Get (0), Seconds (1),
        ".net.ipv4.tcp_available_congestion_control", &PrintTcpFlags);
LinuxStackHelper::SysctlGet (nodes.Get (0), Seconds (1),
        ".net.ipv4.tcp_rmem", &PrintTcpFlags);
LinuxStackHelper::SysctlGet (nodes.Get (0), Seconds (1),
        ".net.ipv4.tcp_wmem", &PrintTcpFlags);
LinuxStackHelper::SysctlGet (nodes.Get (0), Seconds (1),
        ".net.core.rmem_max", &PrintTcpFlags);
LinuxStackHelper::SysctlGet (nodes.Get (0), Seconds (1),
        ".net.core.wmem_max", &PrintTcpFlags);

#endif

#if 1
if (bufSize.Length () != 0)
{
    stack.SysctlSet (nodes, ".net.ipv4.tcp_rmem",
        bufSize + " " + bufSize + " " + bufSize);
    //      "4096 87380 " +bufSize);
    stack.SysctlSet (nodes, ".net.ipv4.tcp_wmem",
        bufSize + " " + bufSize + " " + bufSize);
    stack.SysctlSet (nodes, ".net.core.rmem_max",

```

```
        bufSize);  
    stack.SysctlSet (nodes, ".net.core.wmem_max",  
        bufSize);  
    }  
#endif
```

```
DceApplicationHelper dce;  
ApplicationContainer apps;  
  
dce.SetStackSize (1 << 20);  
  
// Launch iperf client on node 0  
dce.SetBinary ("iperf");  
dce.ResetArguments ();  
dce.ResetEnvironment ();  
dce.AddArgument ("-c");  
dce.AddArgument ("10.2.0.1");  
dce.ParseArguments ("-y C");  
dce.AddArgument ("-i");  
dce.AddArgument ("1");  
dce.AddArgument ("--time");  
dce.AddArgument ("40");  
#if 0  
if (bufSize.length () != 0)  
{  
    dce.AddArgument ("-w");  
}
```

```
        dce.AddArgument (bufSize);
    }
#endif

apps = dce.Install (nodes.Get (0));
apps.Start (Seconds (5.0));
// apps.Stop (Seconds (15));

// Launch iperf server on node 1
dce.SetBinary ("iperf");
dce.ResetArguments ();
dce.ResetEnvironment ();
dce.AddArgument ("-s");
dce.AddArgument ("-P");
dce.AddArgument ("1");
#if 0
if (bufSize.length () != 0)
{
    dce.AddArgument ("-w");
    dce.AddArgument (bufSize);
}
#endif
apps = dce.Install (nodes.Get (1));
apps.Start (Seconds (4));

pointToPoint.EnablePcapAll ("mptcp-lte-wifi", false);
phy.EnablePcapAll ("mptcp-lte-wifi", false);
```

```
// lteHelper->EnableTraces ();

// Output config store to txt format
Config::SetDefault ("ns3::ConfigStore::Filename", StringValue ("output-attributes.txt"));
Config::SetDefault ("ns3::ConfigStore::FileFormat", StringValue ("RawText"));
Config::SetDefault ("ns3::ConfigStore::Mode", StringValue ("Save"));

ConfigStore outputConfig2;

outputConfig2.ConfigureDefaults ();
outputConfig2.ConfigureAttributes ();

Simulator::Stop (Seconds (stopTime));

Simulator::Run ();

Simulator::Destroy ();

return 0;
}
```