



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Π.Μ.Σ. «ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑ»

**Ανάπτυξη και αποτίμηση μηχανισμού για την επιλογή
δικτύου πρόσβασης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευρυδίκη-Φραγκίσκη Α. Καραγιάννη

Επιβλέπων : **Αλέξανδρος Καλόξυλος, Επίκουρος Καθηγητής**

Τρίπολη, Οκτώβριος, 2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών «Προηγμένα Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα και Δίκτυα» του τμήματος Επιστήμης και Τεχνολογίας Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου. Το αντικείμενο μελέτης της είναι η ανάλυση μηχανισμών και αλγορίθμων επιλογής δικτύου πρόσβασης στις ασύρματες επικοινωνίες. Το έναυσμα για τη μελέτη του θέματος αυτού προήλθε από την παρακολούθηση του μαθήματος «Δίκτυα Κινητών και Ασύρματων Επικοινωνιών».

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
1.1 Ανασκόπηση κινητών επικοινωνιών.....	10
1.2 Ετερογενή δίκτυα.....	12
2.ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ 3 ^{ης} ΚΑΙ 4 ^{ης} ΓΕΝΙΑΣ.....	14
2.1 UMTS.....	14
2.1.1 Αρχιτεκτονική δικτύου.....	14
2.2 LTE/SAE.....	17
2.2.1 Απαιτήσεις και στόχοι.....	17
2.2.2 Φάσμα συχνοτήτων.....	23
2.2.3 Τεχνολογία του LTE.....	25
2.2.4 Αρχιτεκτονική δικτύου.....	27
2.2.5 Κανάλια μεταφοράς σηματοδότησης και δεδομένων στο LTE.....	31
2.2.6 Μέθοδοι ελέγχου σφάλματος και επαναμετάδοσης.....	33
2.3 Πρότυπο 3GPP Lte-Advanced (Release 10).....	34
2.4 Femtocell.....	35
3. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΑ ΕΤΕΡΟΓΕΝΗ ΔΙΚΤΥΑ....	38
3.1 ANDSF.....	38
3.2 Proxy Mobile IP (PMIP).....	41
4. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ.....	46
4.1 Κατηγορίες μεταπομπών.....	46
4.2 Κριτήρια για VHO.....	47
4.3 Στάδια διαχείρισης και εφαρμογής των VHO.....	50
4.4 Μέτρα αποδοτικότητας της εφαρμογής των VHO αλγορίθμων.....	51
4.5 Αλγόριθμοι VHO.....	52
4.5.1 Αλγόριθμοι VHO με βάση το RSS.....	53
4.5.2 Αλγόριθμοι VHO με βάση το bandwidth.....	56

4.5.3	Αλγόριθμοι VHO με συναρτήσεις κόστους.....	59
4.5.4	Συνδυαστικοί αλγόριθμοι.....	62
4.5.4.1	Fuzzy logic systems.....	63
4.5.4.2	Neural networks.....	66
4.5.4.3	Αλγόριθμοι πολλαπλών χαρακτηριστικών (MAD).....	67
4.5.4.4	Ανθρωποκεντρικός αλγόριθμος για non-real time υπηρεσίες (User-centric VHO algorithm).....	72
4.5.4.5	Αλγόριθμοι VHO για LTE και WLAN.....	75
4.5.4.6	Αλγόριθμοι VHO για δίκτυα LTE και femtocells..	78
4.5.4.7	Αλγόριθμοι VHO για δίκτυα WLAN και UMTS....	84
5.	Συγκριτική ανάλυση των αλγορίθμων VHO.....	88
	Βιβλιογραφία.....	97

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1:Εξέλιξη διείσδυσης δικτύων τρίτης γενιάς.....	12
Εικόνα 1.2:Ετερογενή δίκτυα.....	13
Εικόνα 2.1:Αρχιτεκτονική δικτύου UMTS.....	14
Εικόνα 2.2:Δίκτυο κορμού UMTS-Core network.....	16
Εικόνα 2.3:LTE Peak data rates(Mbps)/No error rate coding.....	19
Εικόνα 2.4:LTE Peak data rates(Mbps)/ 5/6 error rate coding.....	19
Εικόνα 2.5:Καθυστέρηση στη μετάδοση δεδομένων.....	21
Εικόνα 2.6:Καθυστέρηση στη μετάβαση καταστάσεων.....	22
Εικόνα 2.7:Κατηγορίες User Equipment LTE.....	23
Εικόνα 2.8:Μπάντες λειτουργίας LTE FDD.....	24
Εικόνα 2.9:Μπάντες λειτουργίας LTE TDD.....	24
Εικόνα 2.10:Τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης.....	25
Εικόνα 2.11:Παράδειγμα MIMO κεραιών.....	26
Εικόνα 2.12:Ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική EPS.....	27
Εικόνα 2.13:Αρχιτεκτονική E-UTRAN.....	28
Εικόνα 2.14:Αρχιτεκτονική δικτύου LTE/SAE.....	29
Εικόνα 2.15:Λειτουργίες eNB και MME-Gateway.....	31
Εικόνα 2.16:Τα λογικά κανάλια ελέγχου στο LTE.....	32
Εικόνα 2.17:Κανάλια μεταφοράς δεδομένων στο LTE.....	32
Εικόνα 2.18:Λειτουργία πρωτοκόλλου HARQ.....	33
Εικόνα 2.19:Σύγκριση φασματικής απόδοσης LTE και LTE-Advanced.....	35
Εικόνα 2.20:Αρχιτεκτονική 3G femtocell.....	36
Εικόνα 2.21:Αρχιτεκτονική LTE femtocell.....	37
Εικόνα 3.1:ANDSF.....	39
Εικόνα 3.2:Λειτουργία ANDSF.....	40
Εικόνα 3.3: PMIP	42
Εικόνα 3.4: PMIP-Σηματοδοσία σύνδεσης τερματικού.....	43
Εικόνα 3.5: PMIP-Σηματοδοσία handover.....	44
Εικόνα 3.6: PMIP-Handover.....	44

Εικόνα 3.7: Αρχιτεκτονική EPC για την υποστήριξη του πρωτοκόλλου PMIP.....	45
Εικόνα 4.1:Κατηγορίες handover και υπηρεσιών.....	47
Εικόνα 4.2:Κριτήριο ταχύτητας τερματικού.....	49
Εικόνα 4.3:Αλγόριθμος VHO Zahran-Liang.....	54
Εικόνα 4.4:Αλγόριθμος VHO Yan.....	56
Εικόνα 4.5:Αλγόριθμος VHO-Lee.....	57
Εικόνα 4.6:Αλγόριθμος VHO-Yang.....	58
Εικόνα 4.7:Αλγόριθμος VHO-Chi.....	60
Εικόνα 4.8:Αλγόριθμος VHO Zhu – McNair.....	61
Εικόνα 4.9:Αλγόριθμος VHO – Hasswa.....	61
Εικόνα 4.10:Αλγόριθμος VHO – Tawil.....	62
Εικόνα 4.11:Αρχιτεκτονική συστήματος fuzzy logic.....	63
Εικόνα 4.12:Αλγόριθμος VHO με χρήση συστημάτων fuzzy logic.....	64
Εικόνα 4.13:Membership functions για a)RSSI, b)bandwidth, c)κάλυψη d)προτιμώμενο δίκτυο.....	65
Εικόνα 4.14:Membership function για Handover.....	65
Εικόνα 4.15:Vertical handover manager.....	66
Εικόνα 4.16:Πολυεπίπεδο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο.....	67
Εικόνα 4.17: Μοντέλο επιλογής δικτύου (WLAN/UMTS) με μεθόδους AHP- GRA.....	70
Εικόνα 4.18:Συντελεστές βαρύτητας ανά κατηγορία κίνησης.....	71
Εικόνα 4.19:Τιμές παραμέτρων για 4 υποψήφια δίκτυα.....	72
Εικόνα 4.20: Επιλογή δικτύου για μεταβαλλόμενους συντελεστές βαρύτητας (αριστερά jitter-δεξιά BER).....	72
Εικόνα 4.21:User-centric algorithm	74
Εικόνα 4.22:Αλγόριθμος VHO από δίκτυο LTE σε WLAN και αντίστροφα.....	76
Εικόνα 4.23:Αλγόριθμος VHO από δίκτυο WLAN σε LTE.....	77
Εικόνα 4.24:Αλγόριθμος VHO από δίκτυο LTE σε WLAN.....	78
Εικόνα 4.25: Τύποι handover σε δίκτυο femtocell.....	79
Εικόνα 4.26: Αλγόριθμος SQ.....	80
Εικόνα 4.27:Αλγόριθμος VHO από δίκτυο LTE σε femtocell με χρήση του αλγορίθμου SQ.....	81

Εικόνα 4.28:Αλγόριθμος VHO από δίκτυο LTE σε femtocell με πρόβλεψη κινητικότητας.....	83
Εικόνα 4.29:Αλγόριθμος VHO για LTE/femtocell με διαχωρισμό CSG/non-CSG χρηστών.....	84
Εικόνα 4.30:Αλγόριθμος RS-VDA από δίκτυο WLAN σε UMTS.....	86
Εικόνα 4.31:Αλγόριθμος RS-VDA από δίκτυο UMTS σε WLAN.....	87

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κύριος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση αλγορίθμων επιλογής δικτύου πρόσβασης (VHO) στα ετερογενή δίκτυα. Οι συνδρομητές μπορούν να μετακινούνται από το ένα δίκτυο στο άλλο χρησιμοποιώντας τεμαχικά με πολλαπλές διεπαφές πρόσβασης. Για το σκοπό αυτό έχουν προταθεί διάφορες στρατηγικές επιλογής δικτύου ώστε να παρέχεται η απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσιών και η αδιάλειπτη κινητικότητα.

Αρχικά παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των δικτύων 3^{ης} και 4^{ης} γενιάς. Κατόπιν, εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο υλοποιείται το VHO με τη βοήθεια των μηχανισμών ANDSF και PMIP. Ύστερα, αναλύεται η διαδικασία υλοποίησης των μεταπομπών (handover) από δίκτυο σε δίκτυο, δηλαδή τα κριτήρια που λαμβάνονται υπ' όψιν, τα στάδια διαχείρισης και εφαρμογής του VHO και τα μέτρα αποδοτικότητας. Παρουσιάζονται διάφοροι αλγόριθμοι VHO, οι οποίοι κατηγοριοποιούνται με βάση τα κριτήρια που χρησιμοποιούν για τη λήψη της απόφασης και το είδος των δικτύων που εφαρμόζονται. Έτσι εξετάζονται αλγόριθμοι με βάση το RSS και το bandwidth, με διάφορες συναρτήσεις κόστους, συνδυαστικοί αλγόριθμοι, αλλά και αλγόριθμοι που απευθύνονται σε δίκτυα LTE/WLAN, LTE/femtocells και WLAN/UMTS. Τελικά γίνεται μια σύγκριση των αλγορίθμων αυτών με σκοπό να βρεθεί ο καταλληλότερος για την κάθε περίπτωση.

ABSTRACT

The main purpose of this study is the analysis of vertical handover decision strategies in heterogeneous networks. Subscribers can move from one network to another, using terminals with multiple access interfaces. For this purpose, various vertical handover algorithms (VHOs) have been proposed to provide the required QoS and seamless mobility.

Firstly, the main characteristics of 3rd and 4th generation networks are presented. We examine the implementation of the VHOs using the ANDFS and PMIP mechanisms. Then the implementation process of the handover between heterogeneous networks is analyzed, such as the criteria taken into account, the management stages and the performance evaluation metrics. Various VHOs algorithms are explained which are categorized based on the main handover decision criteria and the type of the available networks. We analyze RSS-based algorithms, bandwidth-based, cost function based, combination VHOs and algorithms for HOs between LTE/WLAN, LTE/femtocells and WLAN/UMTS. Finally a comparison is made between these algorithms in order to find the appropriate for each case.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ανασκόπηση κινητών επικοινωνιών

Η βιομηχανία της κινητής τηλεφωνίας όπως και η εξέλιξη των ευρυζωνικών επικοινωνιών μέσω των δικτύων κινητής τηλεφωνίας παγκοσμίως, γνώρισε τρομερή ανάπτυξη την τελευταία δεκαετία φτάνοντας τα 4 δισεκατομμύρια συνδρομητές παγκοσμίως. Ας ξεκινήσουμε όμως από την αρχή την αναφορά στην εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας από τα 1^{ης} γενιάς αναλογικά συστήματα κινητής τηλεφωνίας στα μέσα της δεκαετίας του 1980, τα οποία υποστήριζαν περιορισμένες δυνατότητες μετακίνησης όπως το AMPS (Advanced Mobile Phone System) στην Αμερική και το NRT (Nordic Mobile Telephone) στην Σκανδιναβία. Τα 2^{ης} γενιάς συστήματα κινητών επικοινωνιών υπόσχονταν μεγαλύτερη χωρητικότητα και καλύτερες υπηρεσίες φωνής στον χρήστη. Τα δύο ευρέως υλοποιημένα συστήματα 2^{ης} γενιάς κινητής τηλεφωνίας υπήρξαν το GSM (Global System for Mobile Communications) και το CDMA (Code Division Multiple Access), τα οποία σχεδιάστηκαν εξ' αρχής ως τεχνολογίες μεταγωγής κυκλώματος για να μεταφέρουν φωνή και όχι δεδομένα, εκτός από τις μετέπειτα εκδόσεις των προτύπων που υποστήριζαν μεταφορά δεδομένων αλλά σε ταχύτερες μικρότερες από τις αντίστοιχες των dial-up συνδέσεων εκείνης της εποχής.

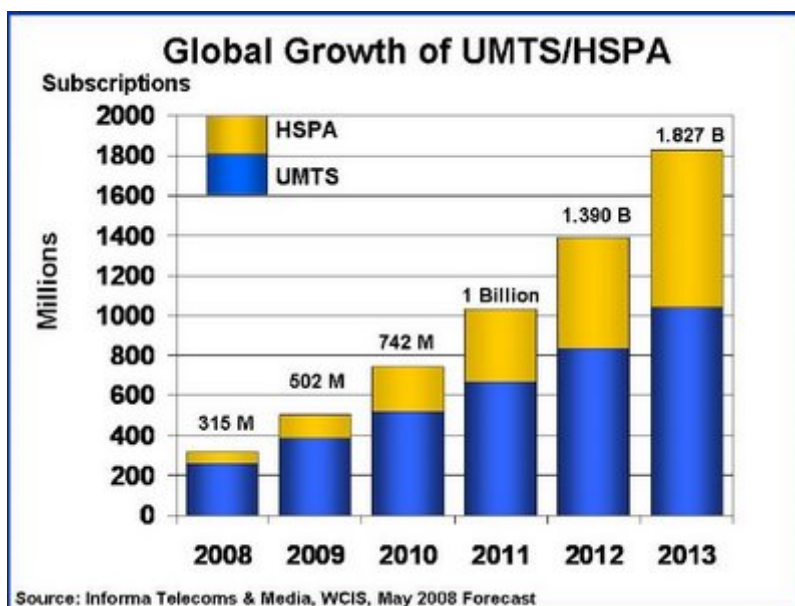
Ο δρόμος προς τα δίκτυα 3^{ης} γενιάς άνοιξε με το IMT-2000 πρότυπο από το ITU-R (International Telecommunications Union – Radio communications), οργανισμό των Ηνωμένων Εθνών υπεύθυνο για θέματα ράδιο-επικοινωνιών. Με στόχους την παροχή ταχυτήτων 2 Mbps και την υποστήριξη για μετάδοση δεδομένων σε κινητούς σταθμούς με υψηλή κινητικότητα, οι 2 ομάδες προτύπων GSM και CDMA δημιούργησαν 2 ξεχωριστές ομάδες εργασίας (3GPP και 3GPP2 αντίστοιχα) για να αναπτύξουν πρότυπα συμβατά με τις απαιτήσεις του IMT-2000 προτύπου βασισμένα στην CDMA τεχνική πολλαπλής πρόσβασης. Το πρότυπο του 3GPP ονομάστηκε WCDMA επειδή χρησιμοποιεί φέρον εύρους ζώνης 5MHz σε αντίθεση με τα 1,25 MHz του 3GPP2 CDMA προτύπου. Στις αρχές βέβαια τα συστήματα 3^{ης} γενιάς δεν

ικανοποίησαν με την απόδοση τους για μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας καθώς οι ταχύτητες στην πράξη ήταν αρκετά χαμηλές. Έτσι οι ομάδες έργων 3GPP και 3GPP2 αντίστοιχα δημιούργησαν βελτιωμένα πρότυπα, όπως το 3GPP HSPA με υποστήριξη για πρωτόκολλα VoIP (Voice over IP) και ικανοποιητικές ταχύτητες για μετάδοση δεδομένων μέχρι 3,6 Mbps.

Η ανάγκη για τη μελέτη του 3G Long Term Evolution(LTE) εκδηλώθηκε στο τέλος του 2004 στο 3GPP, με σκοπό τη διατήρηση της ανταγωνιστικής θέσης των UMTS τεχνολογιών στο μέλλον. Έτσι αποφασίστηκε να μελετηθεί η αρχιτεκτονική του συστήματος και η εξέλιξη του δικτύου πρόσβασης.

Αυτή την στιγμή σε όλο τον κόσμο τρεις είναι οι κυρίαρχες εκδόσεις των δικτύων 3^{ης} γενιάς: UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) το οποίο δημιουργήθηκε και χρησιμοποιείται στην Ευρώπη και την Ιαπωνία, το CDMA2000 που χρησιμοποιείται στην Αμερική και το TD-SCDMA (Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access) που αναπτύχθηκε στην Κίνα.

Όπως φαίνεται και στο επόμενο σχεδιάγραμμα, η διείσδυση των δικτύων 3^{ης} γενιάς υπήρξε καθολική και σε παγκόσμια κλίμακα με τους παρόχους να υλοποιούν δίκτυα UMTS και την φυσική εξέλιξη αυτών, δηλ. HSDPA, HSUPA, HSPA και πιο πρόσφατα HSPA+. Οι ταχύτητες ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του 2000 ήταν παραπλήσιες με αυτές των σταθερών δικτύων ADSL με τα HSDPA δίκτυα να επιτυγχάνουν ταχύτητες των 3,6 Mbps. Πλέον υπάρχουν ήδη περισσότερα από 376 υλοποιημένα δίκτυα HSPA σε 150 χώρες παγκοσμίως με ακόμη 128 παρόχους να διαθέτουν δίκτυα υπό κατασκευή ή σε περίοδο δοκιμών. Υπολογίζεται ότι όλοι οι πάροχοι UMTS δικτύων θα αναβαθμίσουν τα δίκτυα τους μελλοντικά με το πρότυπο HSPA στον δρόμο προς τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς.



Εικόνα 1.1: Εξέλιξη διείσδυσης δικτύων τρίτης γενιάς

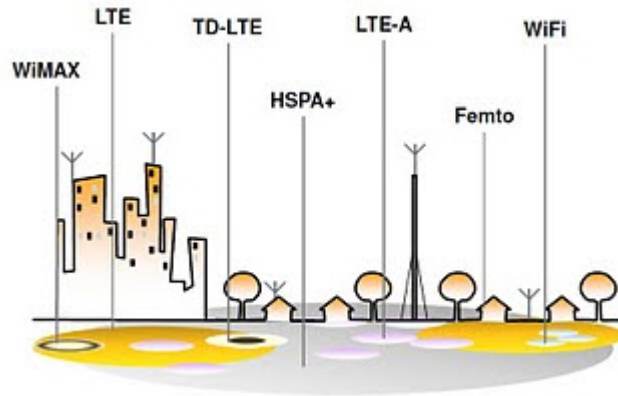
1.2 Ετερογενή δίκτυα

Πέρα όμως από τα δίκτυα κινητής δεύτερης, τρίτης και τέταρτης γενιάς (GSM, GPRS, UMTS, WCDMA, LTE), υπάρχουν και άλλα ασύρματα δίκτυα, όπως για παράδειγμα τα μητροπολιτικά δίκτυα (WiMAX), τα τοπικά ασύρματα δίκτυα (WLAN) και τα προσωπικά δίκτυα (Bluetooth). Όλα αυτά τα δίκτυα είναι ετερογενή, καθώς έχουν διαφορετικές τεχνολογίες στα δίκτυα πρόσβασης, χρησιμοποιούν διαφορετικά πρωτόκολλα και γενικά ο τρόπος λειτουργίας τους είναι διαφορετικός.

Τα κινητά, και γενικότερα οι τερματικές συσκευές που χρησιμοποιούν πλέον οι χρήστες είναι εξοπλισμένα έτσι ώστε να μπορούν να έχουν πρόσβαση σε διάφορες τεχνολογίες. Παρέχουν δηλαδή στο χρήστη μεγάλη ευελιξία σύνδεσης σε δίκτυα ώστε να έχουν την καλύτερη δυνατή ποιότητα υπηρεσίας. Όμως παράλληλα παρουσιάζεται και το πρόβλημα της κινητικότητας ανάμεσα σε διαφορετικά δίκτυα. Οι χρήστες πρέπει να διατηρούν τη σύνδεσή τους χωρίς διακοπές όταν αλλάζουν δίκτυο, δηλαδή όταν πρέπει να γίνεται μεταπομπή (handover). Το handover από δίκτυο σε δίκτυο γίνεται για διάφορους λόγους με σκοπό κάθε φορά την καλύτερη εξυπηρέτηση των χρηστών. Παρακάτω θα εξετάσουμε διάφορους αλγόριθμους για την εύρεση

Ανάπτυξη και αποτίμηση μηχανισμού για την επιλογή δικτύου πρόσβασης

του καταλληλότερου δικτύου για handover(HO) και για τη βέλτιστη εφαρμογή του ώστε η επικοινωνία του χρήστη να είναι αδιάλειπτη. Πρώτα όμως θα αναφερθούμε στις κυριότερες τεχνολογίες τρίτης και τέταρτης γενιάς.



Εικόνα 1.2:Ετερογενή δίκτυα [35]

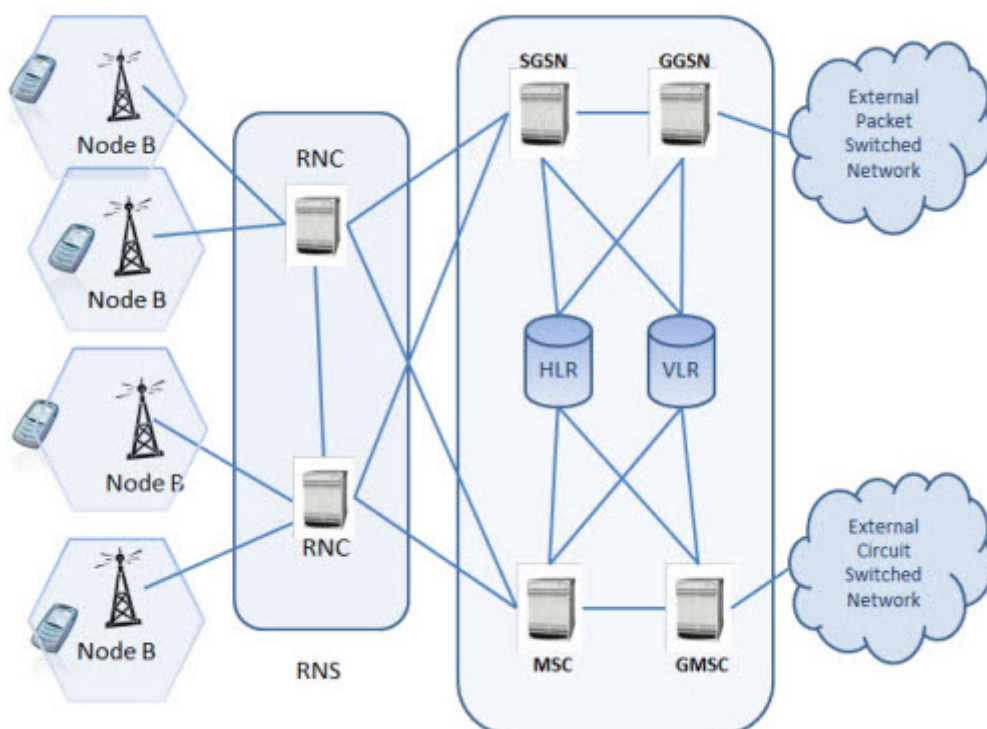
2.ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ 3^{ης} ΚΑΙ 4^{ης} ΓΕΝΙΑΣ

2.1 UMTS

Το UMTS, ή αλλιώς WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access), είναι μία σημαντική εξέλιξη στην ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Είναι η εξέλιξη των δικτύων κινητής επικοινωνίας δεύτερης γενιάς(2G) όπως το GSM και των enhanced 2G όπως το GPRS τόσο στο είδος των υποστηριζόμενων υπηρεσιών όσο και στην ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων.

2.1.1 Αρχιτεκτονική δικτύου

Το UMTS, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.1 αποτελείται από το δίκτυο πρόσβασης (UTRAN-UMTS Terrestrial Radio Access Network) και από το δίκτυο κορμού (CN-Core Network).



Εικόνα 2.1:Αρχιτεκτονική δικτύου UMTS

Δίκτυο πρόσβασης-UTRAN

Το δίκτυο πρόσβασης αποτελείται από ένα πλήθος RNS(Radio Network Sub-systems) τα οποία με τη σειρά τους περιέχουν διάφορους σταθμούς βάσης(Node B) και ένα ελεγκτή ασύρματου δικτύου(RNC-Radio Network Controller). Οι Node B είναι οι αντίστοιχοι σταθμοί βάσης μετάδοσης και λήψης που υπάρχουν στο δίκτυο πρόσβασης του GSM. Η αρμοδιότητά τους είναι η μετατροπή των σημάτων που λαμβάνουν από την ασύρματη διεπαφή σε μια ροή δεδομένων την οποία προωθούν προς το RNC που ανήκουν μέσω της διεπαφής Iub και αντίστροφα. Ο RNC είναι ο κεντρικός κόμβος του δικτύου πρόσβασης και αντιστοιχεί στον ελεγκτή σταθμών βάσεων(BSC-Base Station Controller) του GSM RAN. Ο κάθε κόμβος RNC ελέγχει τους Node B που βρίσκονται υπό την εποπτεία του και είναι υπεύθυνος για την διαχείριση των πόρων του δικτύου. Επίσης η κρυπτογράφηση και η αποκρυπτογράφηση των δεδομένων γίνεται στους RNCs. Μεταξύ τους επικοινωνούν μέσω της διεπαφής Iur και με το δίκτυο κορμού μέσω της Iu.

Δίκτυο κορμού-Core Network

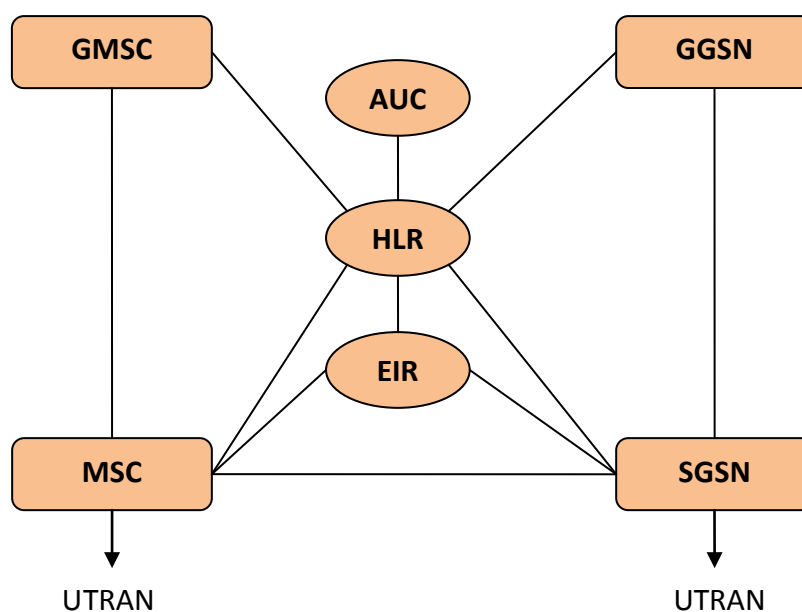
Το δίκτυο κορμού είναι υπεύθυνο για την μεταγωγή και δρομολόγηση των υπηρεσιών φωνής και δεδομένων μεταξύ του δικτύου πρόσβασης και των εξωτερικών δικτύων μεταγωγής πακέτου και κυκλώματος. Χωρίζεται σε δύο μέρη, το ένα αποτελείται από στοιχεία μεταγωγής κυκλώματος και το άλλο από στοιχεία μεταγωγής πακέτου. Ακόμα, αποτελείται και από κάποια κοινά στοιχεία δικτύου, τα οποία σχετίζονται κυρίως με την εγγραφή.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.2 τα στοιχεία μεταγωγής κυκλώματος είναι το MSC(Mobile Switching Center) και το GMSC(Gateway MSC). Όπως και στο GSM, το MSC διαχειρίζεται όλες τις υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος, είναι υπεύθυνο για την σηματοδότηση για την εγκατάσταση, τη διατήρηση και το τερματισμό των συνδέσεων, για την διανομή των ασύρματων καναλιών και την δρομολόγηση των κλήσεων. Το GMSC αναλαμβάνει την επικοινωνία με τα άλλα εξωτερικά δίκτυα, όπως για παράδειγμα τα PLMNs, PSTNs, ISDNs.

Τα στοιχεία μεταγωγής πακέτου είναι το SGSN(Serving GPRS Support Node) και το GGSN(Gateway GPRS Support Node). Το SGSN αρχικά υλοποιήθηκε στα δίκτυα GPRS. Παρέχει διάφορες λειτουργίες όπως διαχείριση κινητικότητας, παρέχοντας πληροφορίες για το τερματικό με βάση την τρέχουσα θέση του, η διασύνδεση με τα υπόλοιπα στοιχεία του δικτύου, η υλοποίηση πολιτικής χρεώσεων, η δρομολόγηση των πακέτων και η διαχείριση της πιστοποίησης. Το GGSN είναι η διεπαφή με τα εξωτερικά δίκτυα μεταγωγής πακέτου όπως για παράδειγμα τα LANs,WANs,GPRS κ.α. Όταν το GGSN λαμβάνει δεδομένα για κάποιο χρήστη, ελέγχει εάν βρίσκεται σε ενεργή κατάσταση και τότε προωθεί τα δεδομένα στο SGSN που διαχειρίζεται το συγκεκριμένο χρήστη.

Τα κοινά στοιχεία του δικτύου κορμού είναι η βάση δεδομένων HLR(Home Location Register), το EIR(Equipment Identity Register) και το AUC(Authentication Center). Η βάση HLR περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για το κάθε συνδρομητή καθώς και την τρέχουσα θέση του. Έτσι το δίκτυο είναι σε θέση να δρομολογεί τις κλήσεις προς το αρμόδιο RNC και Node B.

Core Network



Εικόνα 2.2:Δίκτυο κορμού UMTS-Core network

2.2 LTE/SAE

Τα αρχικά συστήματα 2G σχεδιάστηκαν για εφαρμογές μεταγωγής κυκλώματος (κυρίως για φωνή) και για υποστήριξη χαμηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Με τα δίκτυα Evolved UMTS(LTE), όλα τα συστήματα επικοινωνιών θα θεωρούνται ως πακέτα δεδομένων, επιτρέποντας ενοποιημένη και απλοποιημένη αρχιτεκτονική του δικτύου.

Το πρότυπο LTE Release 8 είναι από τις πρώτες τεχνολογίες κινητών επικοινωνιών βασισμένες στο OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) και σχεδιάστηκε για να παρέχει μέγιστες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων 300 Mb/s στο downlink και 75 Mb/s στο uplink για εύρος ζώνης καναλιού από 1,4 MHz έως 20 MHz.

2.2.1 Απαιτήσεις και στόχοι

Οι γενικές απαιτήσεις για την υλοποίηση του LTE είναι οι εξής:

- Μειωμένες καθυστερήσεις
- Αυξημένος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων
- Μειωμένο κόστος ανά bit
- Βελτιωμένη φασματική απόδοση
- Ευέλικτη χρήση του φάσματος
- Απλοποιημένη αρχιτεκτονική δικτύου
- Συνεχή κινητικότητα ακόμα και μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών
- Οικονομική κατανάλωση ενέργειας στο κινητό
- Βελτιωμένη απόδοση συστήματος

Τα νέα χαρακτηριστικά σε σχέση με τις τεχνολογίες UMTS-WCDMA που εισήγαγε το πρότυπο LTE (Release 8) στο κομμάτι του δικτύου πρόσβασης είναι:

- Χρήση της OFDM διαμόρφωσης του σήματος στο επίπεδο downlink και της SC-FDMA στο επίπεδο uplink.
- Υποστήριξη TDD και FDD πολυπλεξίας.
- Βαθμωτό μέγεθος εύρους ζώνης 1.25, 2.5, 5, 10 και 20 MHz.
- Υποστήριξη MIMO, τόσο σε επίπεδο ενός χρήστη (SU-MIMO) δηλ. 1x2, 2x2, 4x2, 2x4, 4x4 MIMO όσο και σε επίπεδο πολλών χρηστών ταυτόχρονα (MU-MIMO)
- Υψηλές επιδόσεις τόσο στο downlink (326 Mbps με 20MHz bandwidth, 4x4 MIMO, κωδικοποίηση 64 QAM) όσο και στο uplink (60 Mbps με κωδικοποίηση 16QAM).
- Υποστήριξη του πολύ γρήγορου πρωτοκόλλου αναμετάδοσης Hybrid-ARQ.
- Προσαρμοσμένη κωδικοποίηση μέχρι 64QAM στο downlink και 16QAM στο uplink.
- Χαμηλή καθυστέρηση στην μετάδοση των πακέτων (μέχρι 10 ms) και στις αλλαγές κατάστασης των κινητών σταθμών (100 ms από idle σε active)

Συγκεκριμένα, η βελτιωμένη απόδοση του συστήματος είναι μία από τις βασικές απαιτήσεις των παρόχων δικτύου έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ανταγωνιστικότητα του LTE απέναντι στις υπόλοιπες υπάρχουσες τεχνολογίες. Για την επίτευξη αυτού, πρέπει να ικανοποιούνται οι παρακάτω απαιτήσεις:

Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης(peak rate)

Αναφέρεται στο μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ανά χρήστη που μπορεί να επιτευχθεί. Ο ρυθμός αυτός εξαρτάται από το φάσμα που χρησιμοποιείται, και για τα συστήματα MIMO, όπως το LTE, εξαρτάται και από το πλήθος των κεραιών εκπομπής και λήψης. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης ανάλογα με τις τιμές των 2 αυτών παραγόντων.

Type of antenna	5MHz	10MHz	20MHz
MIMO 2x2	43	86	173
MIMO 4x4	82	163	326

Εικόνα 2.3:LTE Peak data rates(Mbps)/No error rate coding

Όμως αυτοί οι μέγιστοι ρυθμοί είναι σε θεωρητικό επίπεδο καθώς δεν έχει υπολογιστεί η κωδικοποίηση σφάλματος η οποία είναι απαραίτητη στο πραγματικό περιβάλλον καθώς χωρίς αυτήν θα έπρεπε πολλά από τα bits να ξανασταλούν αρκετές φορές μειώνοντας έτσι την απόδοση αρκετά. Για αυτό το λόγο, αν υπολογιστεί και κωδικοποίηση σφάλματος 5/6, οι τιμές του peak data rate διαμορφώνονται ως εξής:

Type of antenna	5MHz	10MHz	20MHz
MIMO 2x2	29	59	117
MIMO 4x4	55	113	226

Εικόνα 2.4:LTE Peak data rates(Mbps)/ 5/6 error rate coding

Ευελιξία και μέγιστη αποδοτικότητα φάσματος

Ένας από τους μεγαλύτερους λειτουργικούς περιορισμούς του δικτύου UMTS είναι η ευελιξία του φάσματος. Αντίθετα, το LTE μπορεί να λειτουργεί σε κατανομές φάσματος διαφορετικών μεγεθών, συμπεριλαμβάνοντας τα 1.25, 2.5, 5, 10, 20 MHz, για την κάτω και την πάνω ζεύξη. Η πρόθεση είναι να επιτραπεί η ευέλικτη υλοποίηση και λειτουργία του φάσματος σύμφωνα με την αναμενόμενη κίνηση και τις απαιτήσεις των υπηρεσιών. Η ευελιξία αυτή βοηθά επίσης στη διαδικασία ανάθεσης συχνοτήτων από τις κατά τόπους ρυθμιστικές αρχές.

Απόδοση κυψέλης και φασματική απόδοση

Η απόδοση σε επίπεδο κυψέλης είναι ένα σημαντικό κριτήριο καθώς σχετίζεται άμεσα με το πλήθος των κυψελών που απαιτούνται και κατ' επέκταση με το απαιτούμενο κόστος για την ανάπτυξη του συστήματος. Ο υπολογισμός της απόδοσης αυτής γίνεται βάση των παρακάτω ποσοτήτων:

- Μέση απόδοση κυψέλης(bps/cell) και φασματική απόδοση(bps/Hz/cell)
- Μέση απόδοση χρήστη (bps/user) και φασματική απόδοση (bps/Hz/user)

Απόδοση για υπηρεσίες ομιλίας

Σε αντίθεση με τις υπηρεσίες κίνησης ουράς, όπως για παράδειγμα η μεταφορά αρχείων, οι οποίες είναι ανεκτικές στις καθυστερήσεις, οι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου όπως το Voice over IP(VoIP) έχουν πολύ μικρές ανοχές στις καθυστερήσεις. Για αυτό λοιπόν είναι απαραίτητο να είναι καθορισμένες οι απαιτήσεις αποδοτικότητας για αυτές τις υπηρεσίες, καθώς το LTE είναι σύστημα που βασίζεται στην μεταγωγή πακέτου. Η αποδοτικότητα υπολογίζεται από το πλήθος των ικανοποιημένων χρηστών υπηρεσιών VoIP για δεδομένο μοντέλο κίνησης και περιορισμούς καθυστέρησης.

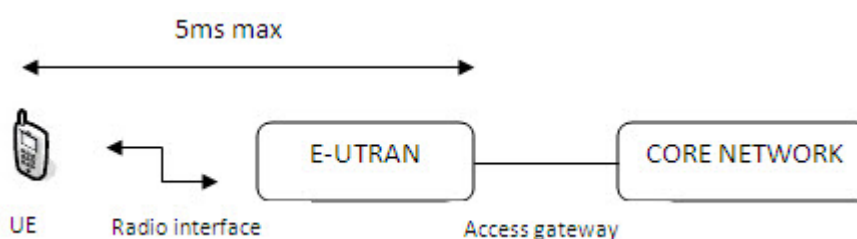
Κινητικότητα και μέγεθος ακτίνας

Το LTE πρέπει να είναι σε θέση να παρέχει επικοινωνία σε τερματικά τα οποία κινούνται με ταχύτητες έως 350χλμ/ώρα ή ακόμα και 500χλμ/ώρα αναλόγως με την συχνότητα που χρησιμοποιείται. Αυτό σημαίνει ότι οι μεταπομπές ανάμεσα στις κυψέλες θα πρέπει να γίνονται πολύ γρήγορα και χωρίς διακοπή, με ανεπαίσθητες καθυστερήσεις και απώλειες πακέτων στις υπηρεσίες φωνής και με αξιόπιστες μεταδόσεις στις υπηρεσίες δεδομένων.

Καθυστέρηση στο επίπεδο χρήστη(user plane)

Η καθυστέρηση παίζει πολύ μεγάλο ρόλο στην απόδοση των διαδραστικών υπηρεσιών και των real-time υπηρεσιών. Στο φυσικό επίπεδο η καθυστέρηση ορίζεται ως ο μέσος χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ της πρώτης μετάδοσης ενός πακέτου δεδομένων και της παραλαβής μιας επιβεβαίωσης(ACK). Το

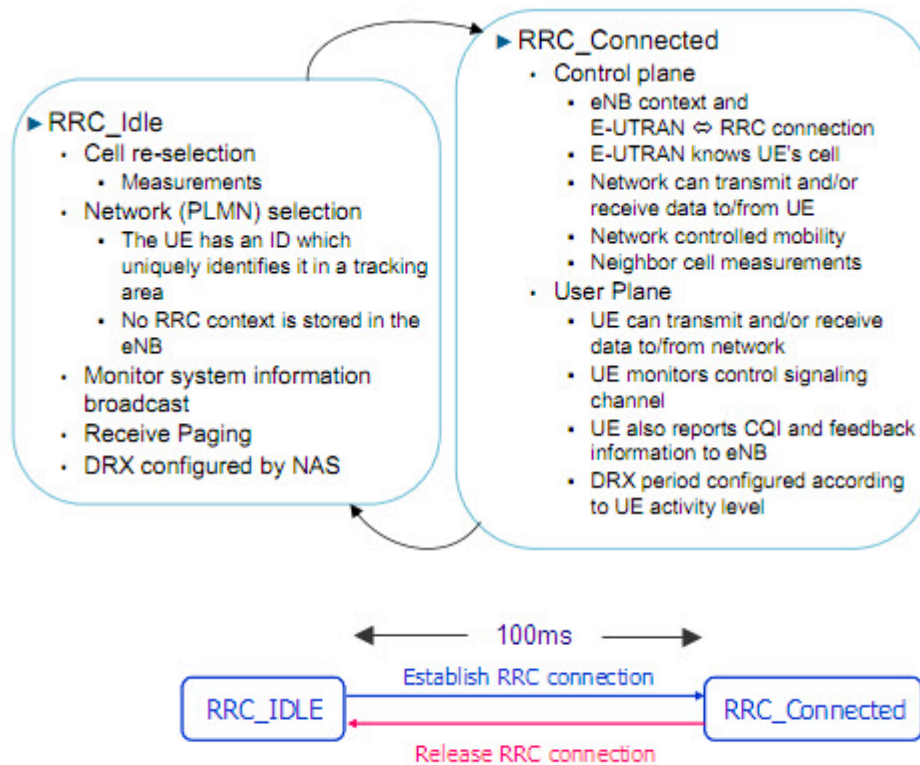
LTE πρέπει να λειτουργεί με καθυστέρηση πακέτου στο IP επίπεδο έως 5ms σε ιδανικές συνθήκες στο δίκτυο πρόσβασης σε μη φορτωμένο δίκτυο. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στη μέγιστη καθυστέρηση μετάδοσης μεταξύ του E-UTRAN Gateway και του τερματικού του χρήστη(εικόνα 2.5), συμπεριλαμβάνοντας την καθυστέρηση μεταφοράς μεταξύ των κόμβων μέσα στο δίκτυο πρόσβασης και την ασύρματη ραδιομετάδοση. Τελικά όμως η πραγματική καθυστέρηση σε ένα σύστημα που λειτουργεί κάτω από κανονικές συνθήκες εξαρτάται από τις συνθήκες διάδοσης και από το φόρτο του συστήματος.



Εικόνα 2.5:Καθυστέρηση στη μετάδοση δεδομένων

Καθυστέρηση στο επίπεδο ελέγχου(control plane)

Ο χρόνος που απαιτείται για την εγκαθίδρυση των κλήσεων πρέπει να είναι αρκετά μειωμένος σε σχέση με το χρόνο που χρειάζονται τα άλλα συστήματα. Αυτό προσφέρει στο χρήστη θετικές εντυπώσεις αφού η κλήση πραγματοποιείται πιο γρήγορα, και γίνεται και εξοικονόμηση μπαταρίας στο τερματικό. Αυτό επιτυγχάνεται με τη γρήγορη εναλλαγή από την αδρανή κατάσταση στην ενεργή. Επομένως η καθυστέρηση στο επίπεδο ελέγχου ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί η μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη, και πιο συγκεκριμένα από την RRC_IDLE στην RRC_CONNECTED(εικόνα 2.6). Η καθυστέρηση αυτή πρέπει να είναι μικρότερη από 100ms.



Εικόνα 2.6: Καθυστέρηση στη μετάβαση καταστάσεων [5]

Χωρητικότητα στο επίπεδο ελέγχου(control plane)

Η χωρητικότητα του συστήματος εξαρτάται από το πλήθος των χρηστών που βρίσκονται ταυτόχρονα σε μια κυψέλη, οι οποίοι μπορούν να υποστηριχθούν από την σηματοδότηση ελέγχου. Το LTE πρέπει να υποστηρίζει τουλάχιστον 200 χρήστες που να βρίσκονται σε ενεργή κατάσταση ανά κυψέλη για εκχώρηση φάσματος μέχρι τα 5 MHz και τουλάχιστον 400 ενεργούς χρήστες ανά κυψέλη για μεγαλύτερες εκχωρήσεις φάσματος. Όμως ένας μικρός αριθμός από τους χρήστες θα πρέπει να λαμβάνει ή να μεταδίδει δεδομένα ταυτόχρονα κάθε δεδομένη στιγμή. Βέβαια μπορεί να υποστηριχθεί σε κάθε κυψέλη και ένας μεγαλύτερος αριθμός χρηστών που να βρίσκονται σε μη ενεργή κατάσταση, οι οποίοι βέβαια μπορούν να αλλάξουν κατάσταση και να ξεκινήσουν μετάδοση δεδομένων με χαμηλή καθυστέρηση.

Κατηγορίες LTE (Release 8) User Equipment

Το πρότυπο LTE (Release 8) διαχωρίζει 5 κατηγορίες κινητών σταθμών ανάλογα με τις δυνατότητες τους. Αυτή η κατηγοριοποίηση είναι απαραίτητη

Ευρυδίκη-Φραγκίσκη Α. Καραγιάννη

ώστε να διασφαλιστεί ότι ο σταθμός βάσης eNB επικοινωνεί σωστά με τον κινητό σταθμό γνωρίζοντας το επίπεδο απόδοσης και τις τεχνικές μετάδοσης που μπορεί να υλοποιήσει. Για παράδειγμα κινητός σταθμός επιπέδου 1 δεν υποστηρίζει MIMO μετάδοση, ενώ κινητός σταθμός επιπέδου 5 υποστηρίζει 4x4 MIMO μετάδοση.

Category		1	2	3	4	5
Peak rate Mbps	DL	10	50	100	150	300
	UL	5	25	50	50	75
Capability for physical functionalities						
RF bandwidth		20MHz				
Modulation	DL	QPSK, 16QAM, 64QAM				
	UL	QPSK, 16QAM				QPSK, 16QAM, 64QAM
Multi-antenna						
2 Rx diversity		Assumed in performance requirements.				
2x2 MIMO		Not supported	Mandatory			
4x4 MIMO		Not supported				Mandatory

Εικόνα 2.7:Κατηγορίες User Equipment LTE [3]

2.2.2 Φάσμα συχνοτήτων

Το πρότυπο LTE μπορεί να λειτουργήσει τόσο στις ήδη υπάρχουσες μπάντες συχνοτήτων από τα 2G και UMTS δίκτυα όσο και σε νέες περιοχές του φάσματος όπως τα 2,6 GHz καθώς και στις συχνότητες του ψηφιακού μερίσματος στα 700/800 MHz που μένουν ελεύθερες από την μετάβαση στην ψηφιακή εκπομπή του τηλεοπτικού σήματος. Οι μπάντες λειτουργίας που ορίστηκαν από την ITU για χρήση για το πρότυπο LTE φαίνονται στο σχήμα 2.8. Στην FDD διαμόρφωση γνωρίζουμε ότι κάθε μπάντα συχνοτήτων μετάδοσης περιλαμβάνει 2 ζώνες μετάδοσης, μία για το downlink και μία για το uplink.

LTE BAND NUMBER	UPLINK (MHZ)	DOWNLINK (MHZ)	MAIN REGIONS OF USE
1	1920 - 1980	2110 - 2170	Asia, Europe
2	1850 - 1910	1930 - 1990	Americas, Asia
3	1710 - 1785	1805 -1880	Americas, Asia, Europe
4	1710 - 1755	2110 - 2155	Americas
5	824 - 849	869 - 894	Americas
6	830 - 840	875 - 885	Japan
7	2500 - 2570	2620 - 2690	Asia, Europe
8	880 - 915	925 - 960	Asia, Europe
9	1749.9 - 1784.9	1844.9 - 1879.9	Japan
10	1710 - 1770	2110 - 2170	Americas
11	1427.9 - 1452.9	1475.9 - 1500.9	Japan
12	698 - 716	728 - 746	USA
13	777 - 787	746 - 756	USA
14	788 - 798	758 - 768	USA
17	704 - 716	734 - 746	USA
18	815 - 830	860 - 875	Japan
19	830 - 845	875 - 890	Japan
20	832 - 862	791 - 821	Europe
21	1447.9 - 1462.9	1495.5 - 1510.9	Japan
22	3410 - 3500	3510 - 3600	

Εικόνα 2.8:Μπάντες λειτουργίας LTE FDD [41]

Αντίθετα στο LTE TDD (πολυπλεξίας χρόνου) οι μπάντες δεν περιλαμβάνουν ζευγάρια συχνοτήτων αφού το επίπεδο downlink όσο και το uplink χρησιμοποιούν το ίδιο πακέτο συχνοτήτων και πολυπλέκονται στο πεδίο του χρόνου.

LTE BAND NUMBER	ALLOCATION (MHZ)	MAIN REGIONS OF USE
33	1900 - 1920	Asia (not Japan), Europe
34	2010 - 2025	Asia, Europe
35	1850 - 1910	Americas
36	1930 - 1990	Americas
37	1910 - 1930	
38	2570 - 2620	Europe
39	1880 - 1920	China
40	2300 - 2400	Asia, Europe
41	3400 - 3600	USA

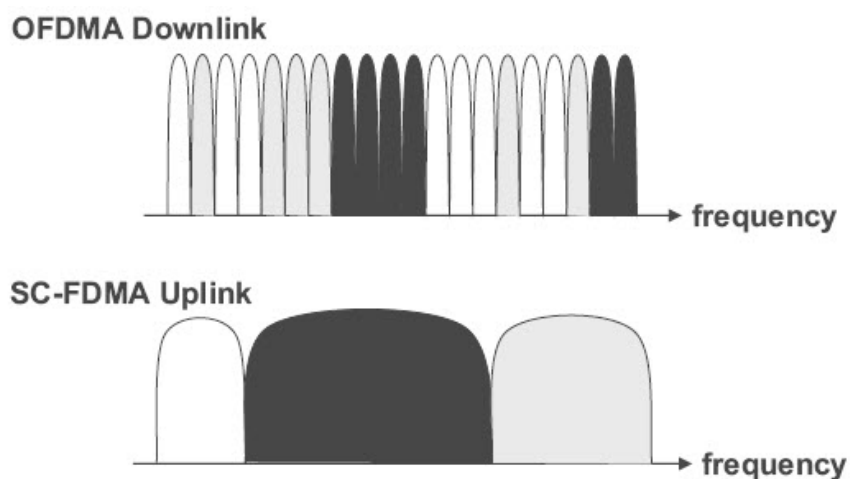
Εικόνα 2.9:Μπάντες λειτουργίας LTE TDD [41]

2.2.3 Τεχνολογία του LTE

Η σχεδίαση του LTE βασίζεται σε 3 βασικές τεχνολογίες: α) την τεχνολογία των πολλαπλών φερόντων, β) των πολλαπλών κεραιών και γ) της εφαρμογής της μεταγωγής πακέτου στην ασύρματη διεπαφή.

Τεχνολογία πολλαπλών φερόντων

Υπήρξαν διάφορες προτάσεις για το ποια τεχνολογία πολλαπλών φερόντων θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Τελικά για το downlink επικράτησε το Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA) και για το uplink το Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access (SC-FDMA).



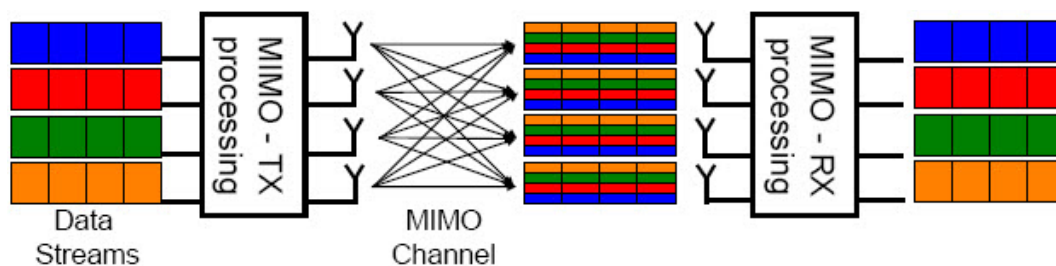
Εικόνα 2.10: Τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης [7]

Το OFDMA επεκτείνει την τεχνολογία OFDM για να παρέχει ένα ευέλικτο σύστημα πολλαπλής πρόσβασης. Το OFDM είναι μια τεχνική διαμόρφωσης πολλαπλών φερόντων (MCM MultiCarrier Modulation) και έχει χρησιμοποιηθεί από διάφορες τεχνολογίες όπως το ADSL, το Digital Audio Broadcasting (DAB), Digital Video Broadcasting-Terrestrial (DVB-T) και Digital Mobile Broadcasting (DMB). Το OFDM βασίζεται στην πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDM), δηλαδή στη διαίρεση μιας ζώνης συχνοτήτων σε μικρότερα κανάλια, τα φέροντα (subcarriers), με σκοπό την ταυτόχρονη μετάδοση πληροφορίας από αυτά. Η διαφορά τους είναι ότι τα subcarriers του FDM είναι το ένα μετά το άλλο στο φάσμα συχνοτήτων, ενώ στο OFDM επικαλύπτονται ώστε να υπάρχει κέρδος στο bandwidth αλλά με τέτοιο τρόπο

ώστε να μην χάνεται η πληροφορία. Για να είναι δυνατή η επικάλυψη των φερόντων χωρίς να χάνεται πληροφορία πρέπει οι κυματομορφές των subcarriers να είναι ορθογώνιες μεταξύ τους ώστε να μην προκαλούν παραμόρφωση και η μετάδοση των σημάτων OFDM να γίνεται χωρίς σφάλματα. Στο OFDMA αυτή η διαίρεση του διαθέσιμου φάσματος αξιοποιείται μοιράζοντας τα φέροντα μεταξύ των χρηστών. Κάποια από τα βασικά πλεονεκτήματα του OFDM είναι η υψηλή απόδοση σε κανάλια διασποράς χρόνου, οι χαμηλές πολυπλοκότητας δέκτες και ο απλός συνδυασμός των σημάτων από πολλαπλούς πομπούς σε δίκτυα μετάδοσης. Το SC-FDMA έχει πολλά κοινά με το OFDMA, κυρίως την ευελιξία στις συχνότητες και την ενσωμάτωση ενός διαστήματος(guard interval) στην αρχή κάθε μεταδιδόμενου συμβόλου.

Τεχνολογία πολλαπλών κεραιών

Η χρήση πολλαπλών κεραιών προσφέρει υψηλούς μέγιστους ρυθμούς δεδομένων, μεγάλη χωρητικότητα και εκτεταμένη κάλυψη. Για κάθε μια περίπτωση χρησιμοποιείται και μια διαφορετική υλοποίηση. Για παράδειγμα, υψηλοί ρυθμοί δεδομένων επιτυγχάνονται με 2x2 ή 4x4 κεραίες πολλαπλής εισόδου-πολλαπλής εξόδου(MIMO), ενώ εκτεταμένη κάλυψη μπορεί να επιτευχθεί με beamforming.



Εικόνα 2.11: Παράδειγμα MIMO κεραιών [42]

Μεταγωγή πακέτου στην ασύρματη διεπαφή

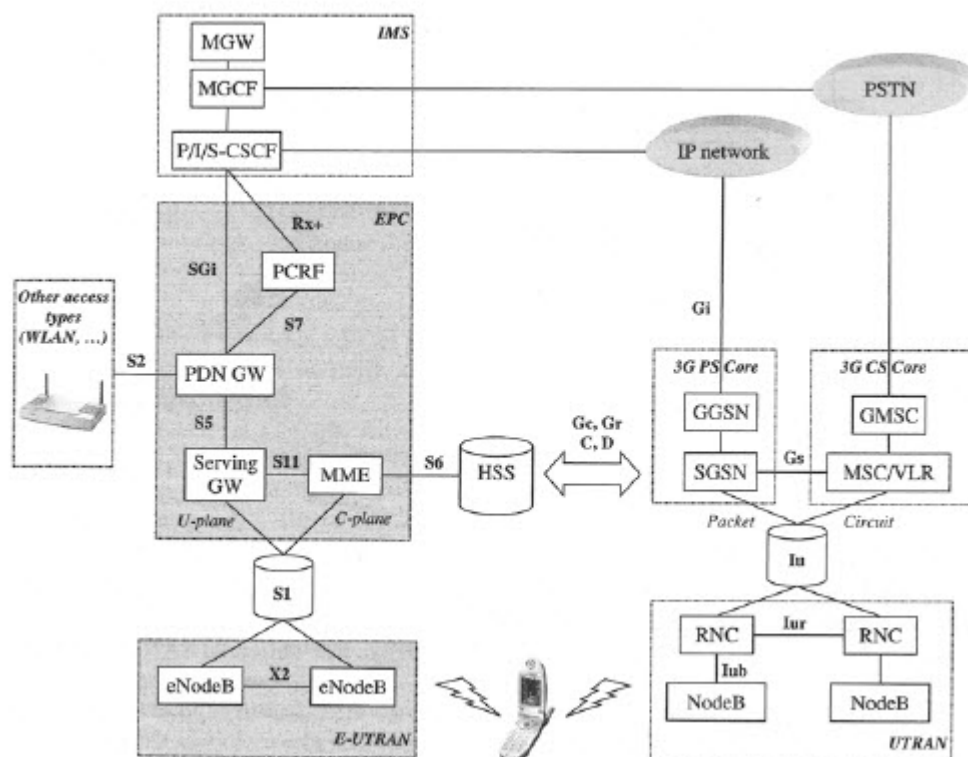
Το LTE είναι σχεδιασμένο ως ένα σύστημα πολλαπλών υπηρεσιών και βασίζεται μόνο στη μεταγωγή πακέτου. Αυτό είχε ξεκινήσει από το HSDPA, όπου μπορεί να γίνει μετάδοση μικρών πακέτων με σύντομη διάρκεια. Στο

Ανάπτυξη και αποτίμηση μηχανισμού για την επιλογή δικτύου πρόσβασης

LTE, για να μειωθεί η καθυστέρηση του συστήματος, η διάρκεια των πακέτων έχει ελαττωθεί από τα 2ms που ήταν στο HSDPA στο 1 ms.

2.2.4 Αρχιτεκτονική δικτύου

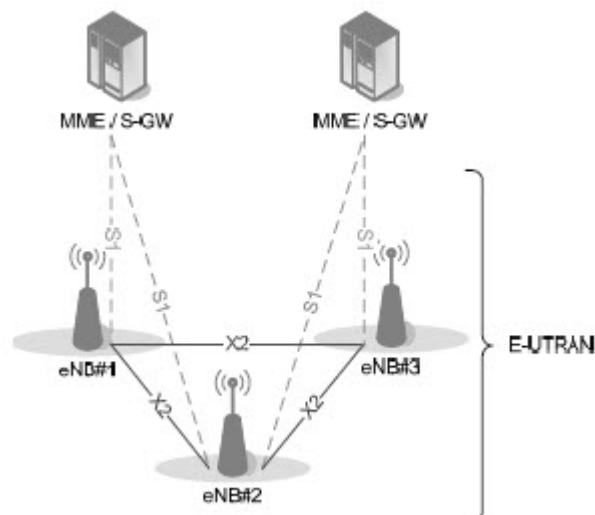
Το δίκτυο αποτελείται από το δίκτυο πρόσβασης Evolved UTRAN(E-UTRAN) και το δίκτυο κορμού Evolved Packet Core(EPC), ή αλλιώς System Architecture Evolution(SAE). Τα νέα αυτά συστατικά αποτελούν το Evolved Packet System. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ολοκληρωμένα η αρχιτεκτονική του δικτύου, η οποία περιλαμβάνει όχι μόνο το EPS αλλά επίσης και άλλα υποσυστήματα για να φανεί η συσχέτιση μεταξύ τους. Απεικονίζονται επίσης και τα υπόλοιπα συστατικά της κλασικής UMTS αρχιτεκτονικής, όπως το UTRAN (το UMTS δίκτυο πρόσβασης) και τα δίκτυα κορμού PS και CS που είναι αντίστοιχα συνδεδεμένα με το δημόσιο IP και τηλεφωνικό δίκτυο.



Εικόνα 2.12:Ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική EPS [13]

Δίκτυο πρόσβασης(E-UTRAN)

Το δίκτυο E-UTRAN αποτελείται μόνο από μια ομάδα σταθμών βάσης eNodeB, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.13.



Εικόνα 2.13:Αρχιτεκτονική E-UTRAN [7]

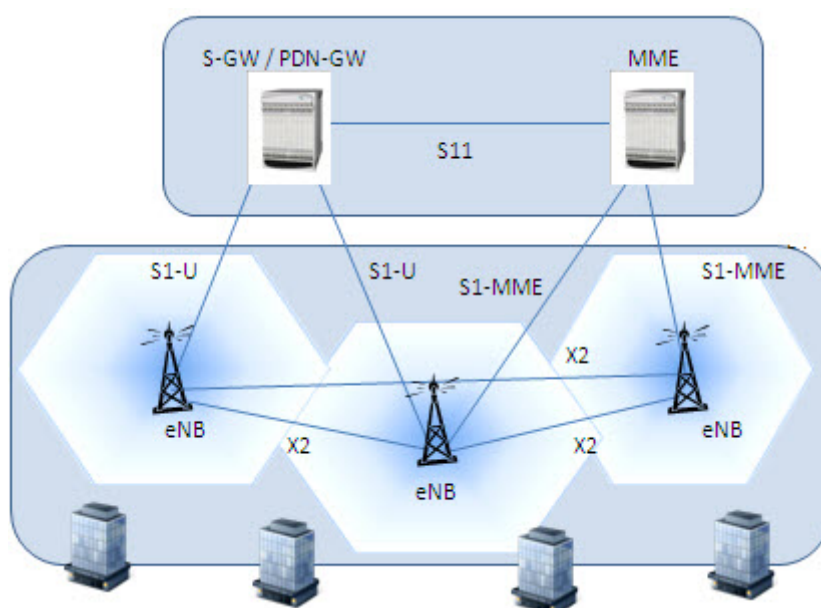
Οι eNodeB συνδέονται μεταξύ τους μέσω της διεπαφής X2, και ο καθένας συνδέεται με το EPC με τη διεπαφή S1. Είναι υπεύθυνοι για την ασύρματη μετάδοση και λήψη από τις κυψέλες στα τερματικά και με τη διεπαφή X2 ελαχιστοποιείται η πιθανότητα απώλειας πακέτων κατά την κινητικότητα των χρηστών. Το δίκτυο E-UTRAN είναι υπεύθυνο για την συνολική διαχείριση των ράδιο-πόρων στο LTE και περιλαμβάνει τις λειτουργίες που είχε το Radio Resource Control πρωτόκολλο των 3G δικτύων. Όταν ένας κινητός σταθμός θέλει να συνδεθεί στο δίκτυο, ο eNB είναι υπεύθυνος για όλες τις διαδικασίες π.χ. έλεγχο, καθορισμό και απόδοση του καναλιού στον κινητό σταθμό, κρυπτογράφηση των δεδομένων του χρήστη, έλεγχος επιπέδου QoS. Ακόμη λειτουργίες όπως προγραμματισμός και μετάδοση σημάτων ενημέρωσης, καθολικών μηνυμάτων ελέγχου υλοποιούνται επίσης από τον σταθμό βάσης eNB.

Δίκτυο κορμού EPC/SAE

Μαζί με τις αλλαγές που προωθήθηκαν στο επίπεδο του δικτύου πρόσβασης με το πρότυπο LTE, σημαντικές είναι οι αλλαγές στο επίπεδο του δικτύου

κορμού. Το αναβαθμισμένο δίκτυο κορμού πλέον αναφέρεται ως SAE (System Architecture Evolution). Το SAE σχεδιάστηκε ώστε να είναι συμβατό με το πρότυπο LTE-Advanced (Rel. 10) δηλαδή να υποστηρίζει τις κατά πολύ υψηλότερες ταχύτητες δεδομένων καθώς και το χαμηλό επίπεδο καθυστέρησης στην μετάδοση δεδομένων.

Βασικό χαρακτηριστικό και σημαντικότερη καινοτομία στο δίκτυο κορμού του LTE είναι η All-IP αρχιτεκτονική του SAE. Το SAE βασίζεται εξ' ολοκλήρου στο πρωτόκολλο IP, αντικαθιστώντας πλήρως και μη παρέχοντας υποστήριξη για συνδέσεις μεταγωγής κυκλώματος δηλ. για την κύρια τεχνολογία στα συστήματα τρίτης γενιάς και κυρίως για την μετάδοση ομιλίας στο δίκτυο κορμού. Το κυρίως μέρος του δικτύου κορμού είναι το EPC (Evolved Packet Core) το οποίο είναι αυτό που συνδέεται με τους σταθμούς βάσης eNB.



Εικόνα 2.14: Αρχιτεκτονική δικτύου LTE/SAE

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα το LTE SAE αποτελείται από 4 κυρίως στοιχεία:

- το Mobility Management Entity (MME), που είναι ο κεντρικός κόμβος ελέγχου για το δίκτυο πρόσβασης του LTE SAE και διαχειρίζεται αρκετά χαρακτηριστικά του δικτύου όπως handover μέσα στο δίκτυο LTE, επιλογή SGW για τον κινητό σταθμό, authenticating χρήστη σε συνεργασία με το HSS, διαδικασίες

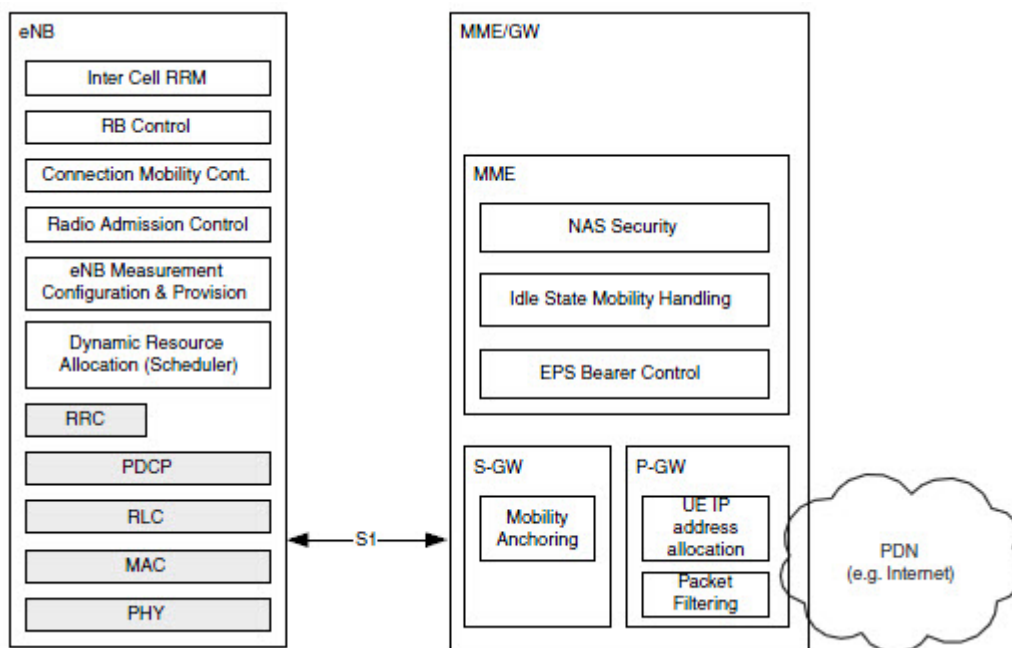
ειδοποίησης κινητού σταθμού κ.α. Συνδέεται με το eNB χρησιμοποιώντας IP πρωτόκολλο μέσω της διεπαφής S1-C στο επίπεδο ελέγχου (Control Plane).

- το Serving Gateway (SGW), που είναι στοιχείο του επιπέδου δεδομένων μέσα στο SAE. Ο κύριος σκοπός του είναι η διαχείριση της κινητικότητας των κινητών σταθμών (είναι δηλαδή η διεπαφή ανάμεσα στο δίκτυο πρόσβασης και στο δίκτυο κορμού) και η διατήρηση των συνδέσεων δεδομένων ανάμεσα στους σταθμούς βάσης eNB και στο PDN Gateway. Συνδέεται με το σταθμό βάσης eNB μέσω της διεπαφής S1-U στο επίπεδο χρήστη (User Plane) χρησιμοποιώντας IP πρωτόκολλο.
- το PDN Gateway παρέχει διασύνδεση με τα εξωτερικά σταθερά δίκτυα μεταγωγής πακέτου (Packet Data Network) για τα δεδομένα του κινητού σταθμού. Ένας κινητός σταθμός μπορεί να είναι συνδεδεμένος με πολλαπλά PDN-Gateway ανάλογα με τα εξωτερικά δίκτυα που αποστέλλονται τα δεδομένα.
- Policy and Charging Rules Function (PCRF), είναι ο γενικός όρος για την οντότητα μέσα στο SAE/EPC που επιβλέπει την ροή της πληροφορίας και υλοποιεί την πολιτική χρεώσεων. Σε περιπτώσεις που απαιτείται δυναμική πολιτική ή έλεγχος χρεώσεων χρησιμοποιείται το στοιχείο δικτύου Applications Function (AF).

Η μεγάλη αλλαγή στην οργάνωση του δικτύου πρόσβασης που επέφερε η μετάβαση από τα δίκτυα 3^{ης} γενιάς UMTS/WCDMA στο LTE SAE/EPC είναι η αφαίρεση του επιπέδου RNC (Radio Network Controller) που ήταν επιφορτισμένο με την διαχείριση των πόρων του δικτύου από τους σταθμούς βάσης. Πλέον η διαχείριση των ράδιο-πόρων ενσωματώνεται στους σταθμούς βάσης eNB που συνδέονται απευθείας με το δίκτυο κορμού μέσω της νέας διεπαφής S1. Έτσι, λειτουργίες όπως διαχείριση κινητικότητας μέσα στο δίκτυο (υλοποίηση handover), έλεγχος εγγραφής και διαχείρισης του φόρτου του δικτύου υλοποιούνται από τους σταθμούς βάσης με ελάχιστη επιβάρυνση

Ανάπτυξη και αποτίμηση μηχανισμού για την επιλογή δικτύου πρόσβασης

στο δίκτυο κορμού. Παρακάτω στην εικόνα 2.15 παρουσιάζεται ο διαχωρισμός στις λειτουργίες που επιτελεί ο σταθμός βάσης eNB και το MME-Gateway.

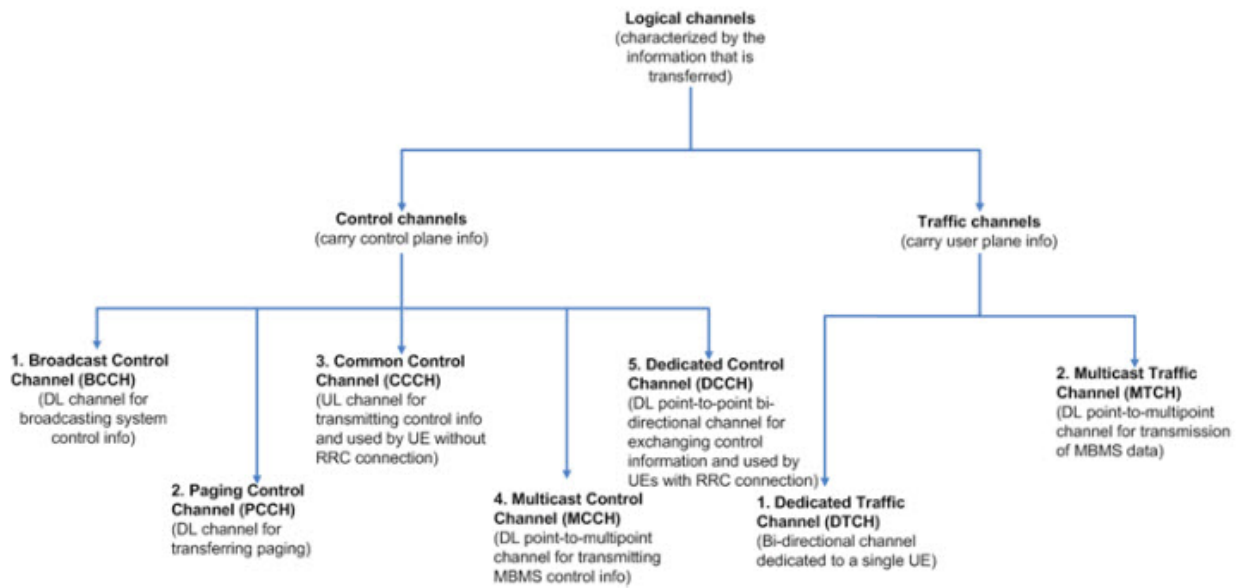


Εικόνα 2.15:Λειτουργίες eNB και MME-Gateway [3]

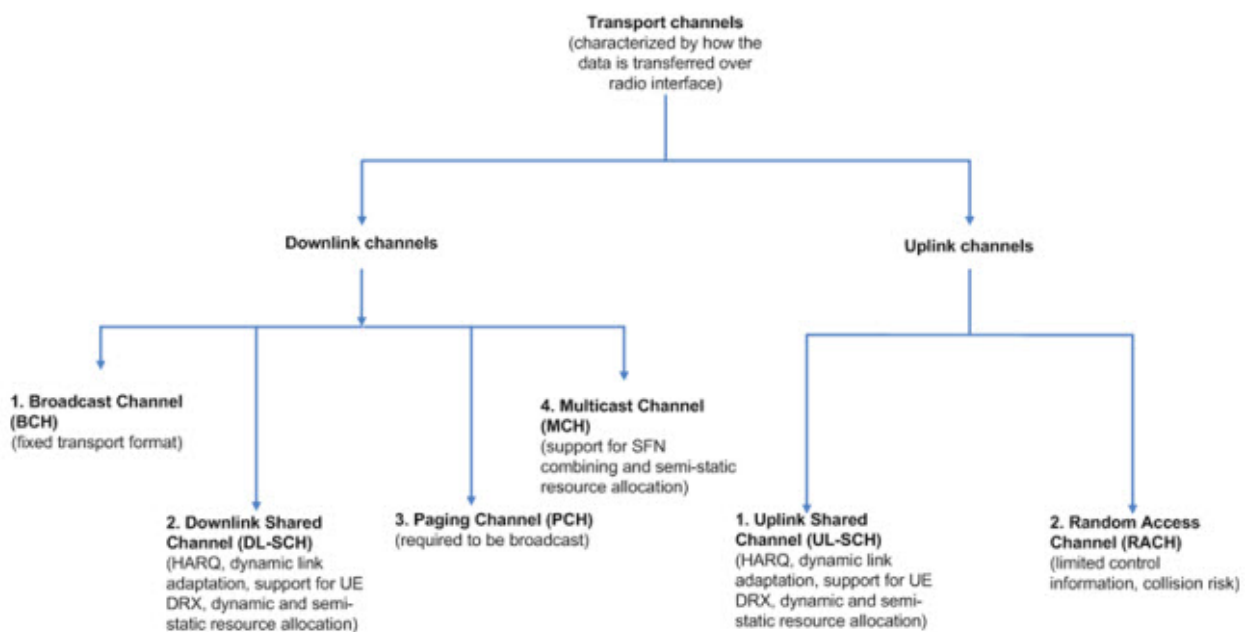
2.2.5 Κανάλια μεταφοράς σηματοδosis και δεδομένων στο LTE

Ανάλογα με την πληροφορία που μεταδίδεται ανάμεσα στον σταθμό βάσης eNB και τον κινητό σταθμό χρησιμοποιείται το αντίστοιχο λογικό κανάλι το οποίο διεκπεραιώνει την διαδικασία μεταφοράς και την ξεχωρίζει από τις υπόλοιπες. Τα λογικά κανάλια διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τα κανάλια κίνησης τα οποία μεταφέρουν δεδομένα του χρήστη και τα κανάλια ελέγχου τα οποία μεταφέρουν την σηματοδosis του συστήματος. Στα δύο σχεδιαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα λογικά κανάλια και τα κανάλια μεταφοράς δεδομένων που χρησιμοποιούνται στο φυσικό επίπεδο του προτύπου 3GPP LTE (Release 8).

Ανάπτυξη και αποτίμηση μηχανισμού για την επιλογή δικτύου πρόσβασης



Εικόνα 2.16: Τα λογικά κανάλια ελέγχου στο LTE [4]



Εικόνα 2.17: Κανάλια μεταφοράς δεδομένων στο LTE [4]

2.2.6 Μέθοδοι ελέγχου σφάλματος και επαναμετάδοσης

Το πρότυπο LTE παρέχει 2 μεθόδους επαναμετάδοσης σε περίπτωση λανθασμένης μετάδοσης πακέτου για να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία και η γρήγορη διόρθωση του λάθους. Το Hybrid Automatic Repeat reQuest (HARQ) στο επίπεδο MAC και το ARQ στο RLC επίπεδο. Το HARQ επίπεδο ελέγχου σφάλματος και επαναμετάδοσης έχει υλοποιηθεί με απλό τρόπο με χρήση μηχανισμού 1-bit εντοπισμού σφάλματος ώστε η επαναμετάδοση του πακέτου να γίνεται με την ελάχιστη καθυστέρηση. Οι εκπομπές HARQ γίνονται ασύγχρονα στο downlink και σύγχρονα στο uplink. Σύγχρονη εκπομπή στο HARQ σημαίνει ότι τα επαναμεταδιδόμενα πακέτα εκπέμπονται στα προκαθορισμένα slot χωρίς να χρειάζεται πρόσθετη σηματοδοσία για να ενημερωθεί ο δέκτης για την επαναμετάδοση των πακέτων. Αντίθετα στο ασύγχρονο HARQ ο χρονοπρογραμματισμός της επαναμετάδοσης των πακέτων μπορεί να γίνει για οποιαδήποτε στιγμή ανάλογα τις συνθήκες φόρτου του καναλιού. Αξίζει να σημειώσουμε ότι η επαναμετάδοση των πακέτων στο HARQ δεν χρειάζεται να είναι απολύτως σωστή, αρκεί το πακέτο να μπορεί να υπολογιστεί σωστά με μαθηματικούς υπολογισμούς από τον δέκτη χρησιμοποιώντας σαν δεδομένο και την προηγούμενη λανθασμένη εκπομπή του πακέτου ώστε ο έλεγχος CRC να επαληθευτεί. Παρακάτω παρουσιάζεται μία απλοποιημένη μορφή της λειτουργίας του HARQ και πως συνδυάζονται τα δύο πακέτα στον δέκτη.



Εικόνα 2.18:Λειτουργία πρωτοκόλλου HARQ [4]

2.3 Πρότυπο 3GPP LTE-Advanced (Release 10)

Το πρότυπο 3GPP LTE Release 10 ή αλλιώς LTE-Advanced δημιουργήθηκε ώστε να ικανοποιήσει τις διάφορες απαιτήσεις των προηγμένων εφαρμογών που θα εμφανιστούν στο κοντινό μέλλον. Ακόμη θα μειώσει σημαντικά το Capex και τα λειτουργικά έξοδα (OPEX) των μελλοντικών ασύρματων ευρυζωνικών δικτύων και βεβαίως θα παρέχει συμβατότητα με το πρότυπο LTE (Release 8).

Ουσιαστικά το πρότυπο LTE-Advanced (Release 10) δεν αποτελεί νέα τεχνολογία αλλά είναι η εξέλιξη του προτύπου LTE (Release 8) ώστε να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις φασματικής απόδοσης και ταχυτήτων μετάδοσης του IMT-Advanced. Πέραν από τις μπάντες λειτουργίας του φάσματος που ορίστηκαν στο πρότυπο LTE (Release 8), στο LTE-Advanced προβλέπεται η χρήση νέων ζωνών του φάσματος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το πρότυπο οι οποίες είναι:

- 450-470 MHz
- 698-862 MHz
- 790-862 MHz
- 2,3-2,4 GHz
- 3,4-3,6 GHz

Παρακάτω παρουσιάζονται οι επιδόσεις του προτύπου LTE-Advanced σε σχέση με τις αντίστοιχες του LTE.

	Downlink/ Uplink	Antenna configuration	Rel. 8 LTE achievement	LTE-Advanced	IMT-Advanced
Peak data rate	Downlink	—	300 Mb/s	1 Gb/s	1 Gb/s
	Uplink	—	75 Mb/s	500 Mb/s	
Peak spectrum efficiency [b/s/Hz]	Downlink	—	15	30	15
	Uplink	—	3.75	15	6.75
Capacity [b/s/Hz/cell]	Downlink	2 × 2	1.69	2.4	—
		4 × 2	1.87	2.6	2.2*
		4 × 4	2.67	3.7	—
	Uplink	1 × 2	0.74	1.2	—
		2 × 4	—	2.0	1.4*
Cell edge user throughput [b/s/Hz/cell/user]	Downlink	2 × 2	0.05	0.07	—
		4 × 2	0.06	0.09	0.06*
		4 × 4	0.08	0.12	—
	Uplink	1 × 2	0.024	0.04	—
		2 × 4	—	0.07	0.03*
*Required values in base coverage urban test environment					

Εικόνα 2.19: Σύγκριση φασματικής απόδοσης LTE και LTE-Advanced

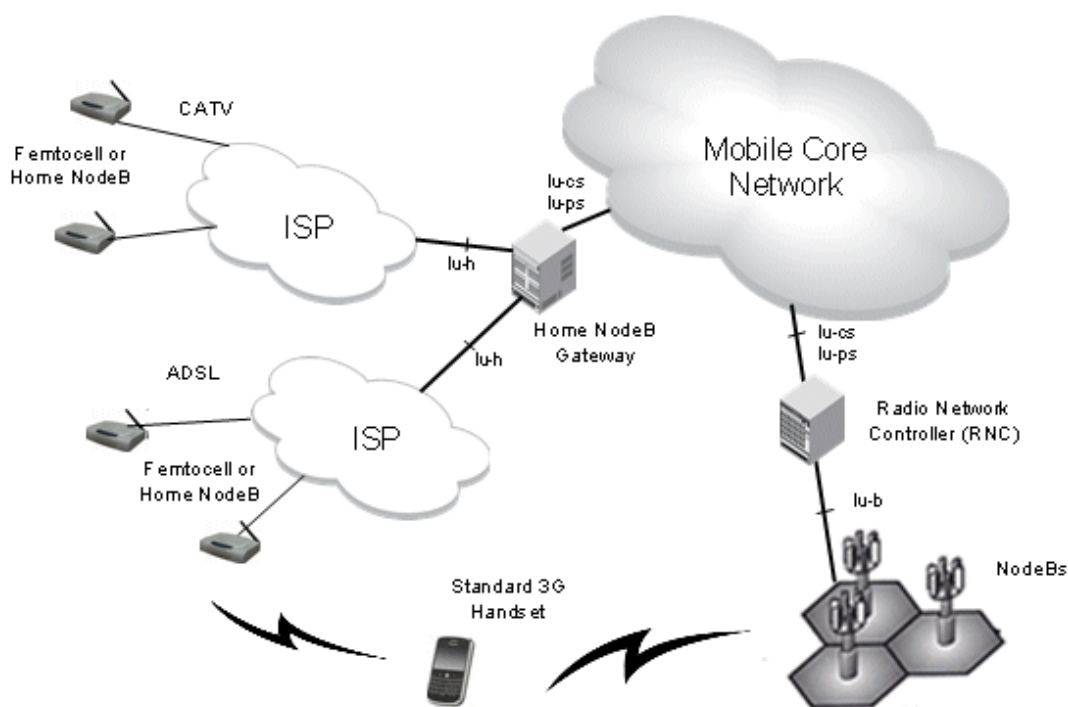
Οι αρχές που οδήγησαν την ανάπτυξη της αρχιτεκτονικής του LTE-Advanced είχαν ως πυρήνα την βελτίωση της χωρητικότητας του δικτύου. Οι αλλαγές επικεντρώθηκαν κυρίως στην βελτίωση της αρχιτεκτονικής του δικτύου πρόσβασης και των τεχνικών μετάδοσης των δεδομένων προς τον κινητό σταθμό αφού οι αλλαγές στο δικτύου κορμού (SAE/EPC) στο πρότυπο LTE καλύπτουν τις απαιτήσεις για το LTE-Advanced.

2.4 Femtocell

Τα femtocells είναι μικροί σταθμοί βάσης κινητών επικοινωνιών που μπορούν να εγκατασταθούν σε οικιακούς ή επαγγελματικούς χώρους με σκοπό να παρέχουν βελτιωμένη κάλυψη δικτύου μέσα στα κτίρια. Στους εσωτερικούς χώρους τυχαίνει αρκετές φορές να μην έχουν πολύ καλό σήμα τα τερματικά κάνοντας την επικοινωνία δύσκολη έως και αδύνατη. Χρησιμοποιώντας τα

femtocells επιτυγχάνεται μεγαλύτερη κάλυψη και βελτιωμένη απόδοση. Τα femtocells συνδέονται με το δίκτυο κορμού χρησιμοποιώντας broadband IP, για παράδειγμα DSL. Μπορούν να ενσωματωθούν σε διάφορες τεχνολογίες, όπως το UMTS, το CDMA2000 και το LTE. Η αρχιτεκτονική τους είναι παρόμοια για όλες τις παραπάνω τεχνολογίες.

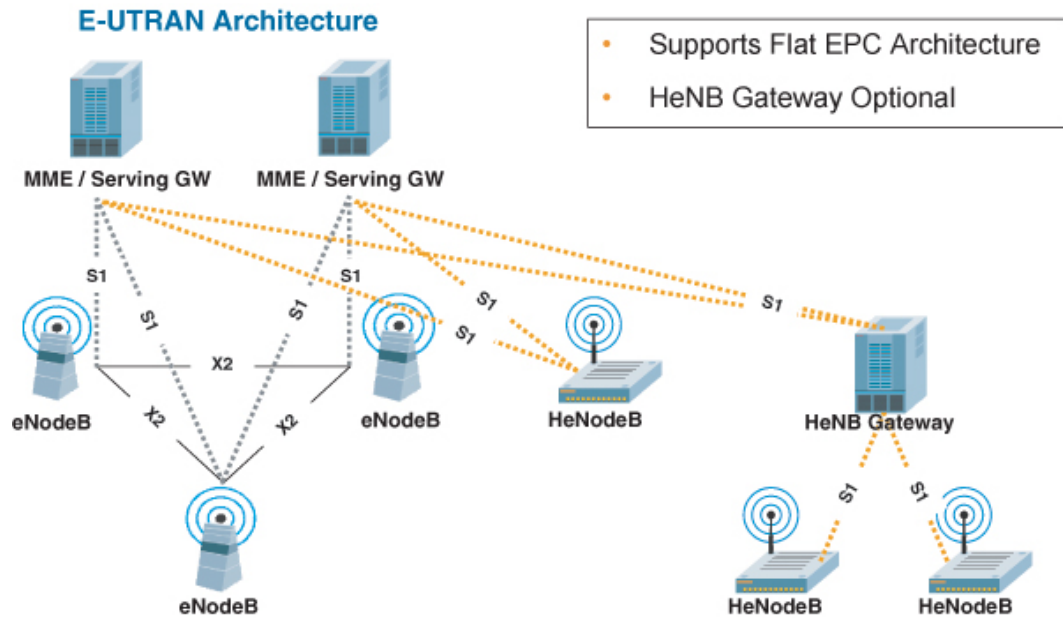
Στην εικόνα 2.20 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική femtocell για 3G δίκτυα. Τα HNB(Home NodeB) είναι τα σημεία πρόσβασης μέσα στο κτίριο, τα οποία ενσωματώνουν τις δυνατότητες των σταθμών βάσης Node B του δικτύου UMTS καθώς και μια λειτουργία του RNC, δηλαδή τη διαχείριση των ασύρματων πόρων. Το επόμενο στοιχείο της αρχιτεκτονικής είναι το HNB Gateway(HNB-GW) το οποίο είναι το σημείο σύνδεσης με το δίκτυο κορμού. Η σύνδεση αυτή γίνεται μέσω των ήδη υπάρχοντων διεπαφών Iu-CS και Iu-PS. Το HNB-GW αναλαμβάνει την πιστοποίηση ώστε να επιτρέψει τη μεταφορά δεδομένων από και προς τα εξουσιοδοτημένα HNB μόνο. Τέλος, η σύνδεση μεταξύ των δύο προηγούμενων στοιχείων γίνεται μέσω της διεπαφής Iu-h, η οποία περιέχει και ένα νέο πρωτόκολλο, το HNB Application Protocol(HNBAP).



Εικόνα 2.20:Αρχιτεκτονική 3G femtocell [38]

Ανάπτυξη και αποτίμηση μηχανισμού για την επιλογή δικτύου πρόσβασης

Στην αρχιτεκτονική των femtocells για το δίκτυο LTE, τα σημεία πρόσβασης λέγονται HeNBs και η διεπαφή Iu-h δεν υπάρχει. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, τα HeNBs συνδέονται με το HeNB-GW και με το δίκτυο κορμού EPC με τη διεπαφή S1 που υπάρχει ήδη στο LTE ενώ απουσιάζει εντελώς η διεπαφή X2.

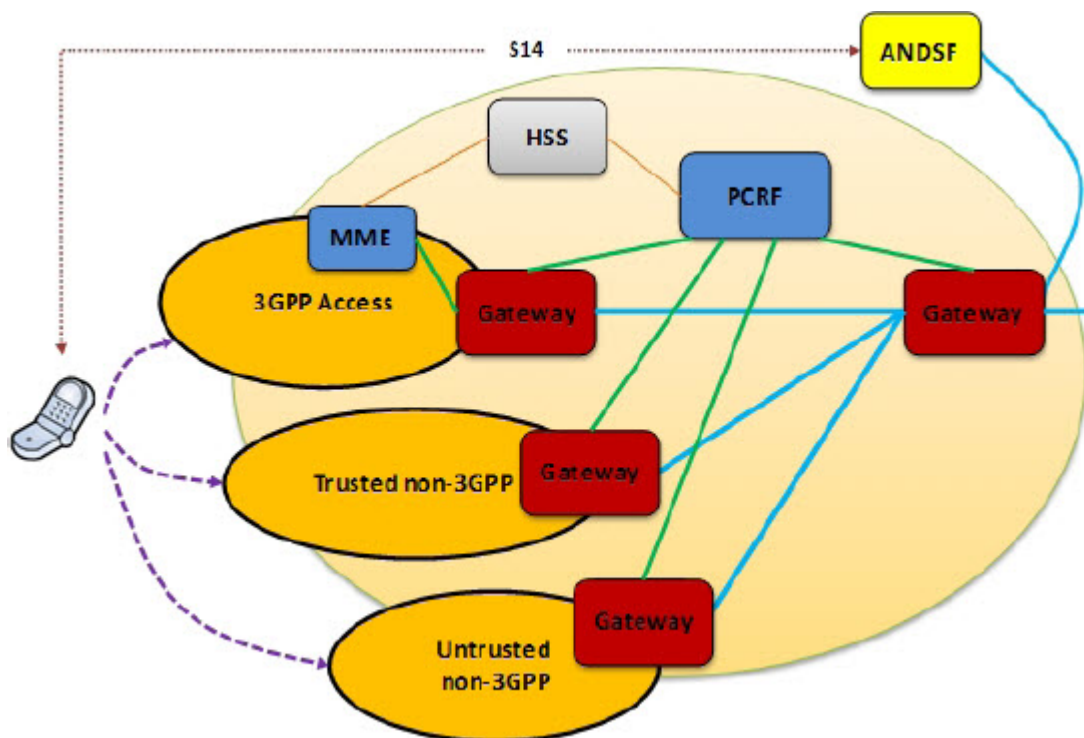


Εικόνα 2.21: Αρχιτεκτονική LTE femtocell [40]

3. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΑ ΕΤΕΡΟΓΕΝΗ ΔΙΚΤΥΑ

3.1 ANDSF

Στο δίκτυο κορμού EPC επιτρέπεται η πρόσβαση τόσο από τα 3GPP δίκτυα(για παράδειγμα 2G, GPRS, 3G, LTE, LTE-A), όσο και από τα μη-3GPP δίκτυα(όπως WiMAX, WLAN). Καθώς όλα αυτά τα δίκτυα έχουν πρόσβαση στο EPC, η διαδικασία επιλογής δικτύου κατά το handover γίνεται περίπλοκη αφού υπάρχουν πολλά πιθανά υποψήφια δίκτυα. Για αυτό το λόγο ένα νέο συστατικό προστέθηκε στο 3GPP standard 23.402, το ANDSF(Access Network Discovery and Selection Function), με σκοπό την ανταλλαγή πληροφοριών για την εύρεση δικτύων με το τερματικό. Το ANDSF είναι προσβάσιμο στα τερματικά και από τα 3GPP δίκτυα πρόσβασης αλλά και από τα μη-3GPP, και προσφέρει πρόσβαση στο EPC. Με το ANDSF οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι είναι σε θέση να διαχειρίζονται τα δίκτυα, να θέτουν προτεραιότητες και να ελέγχουν πότε και κάτω από ποιες συνθήκες και σε ποιο δίκτυο θα συνδεθεί κάποιος χρήστης. Έτσι μπορούν να επιλέξουν που να δρομολογήσουν την κίνηση είτε ανάλογα με το είδος της εφαρμογής που εκτελείται είτε για να παρέχουν την βέλτιστη ποιότητας υπηρεσίας στο χρήστη.



Εικόνα 3.1:ANDSF [12]

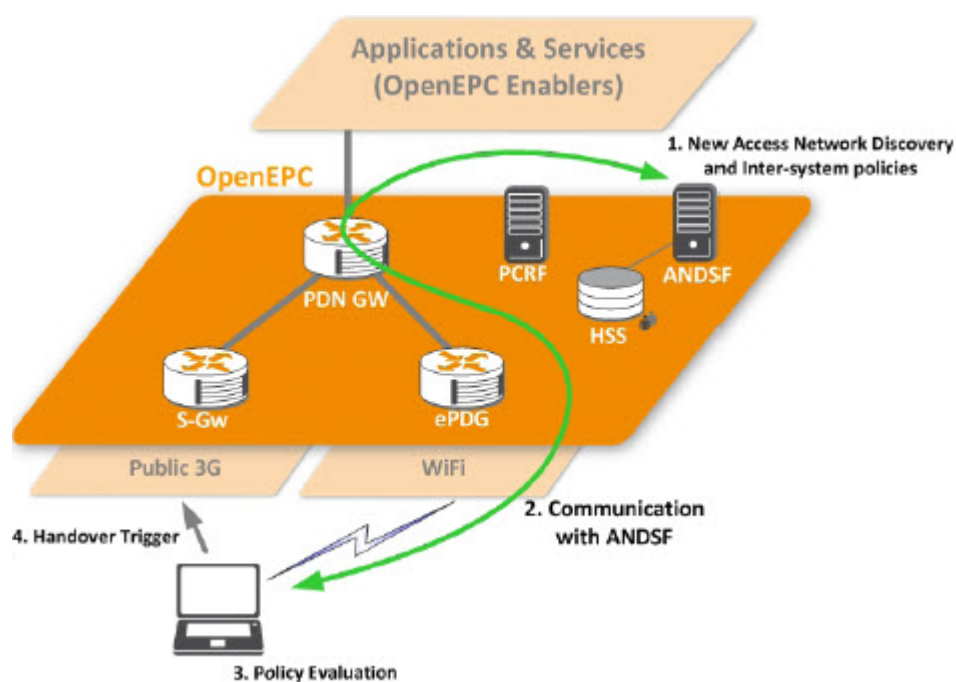
Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.1, η λειτουργικότητα του δικτύου υποστηρίζεται από ένα πλήθος πυλών που επιτρέπουν την κίνηση των δεδομένων με τα τερματικά. Το PCRF διαχειρίζεται όλες αυτές τις πύλες. Για τη διαχείριση της κινητικότητας μέσα στο LTE, το EPC διαθέτει το MME, για τις συνδέσεις όμως με τα άλλα μη-3GPP δίκτυα χρησιμοποιεί το ANDSF. Το τερματικό είναι σε θέση να λαμβάνει πληροφορίες από το ANDSF μέσω της διεπαφής S14. Οι πληροφορίες που παρέχει είναι οι εξής:

- Κινητικότητα μεταξύ των συστημάτων
- Πληροφορίες εύρεσης δικτύων πρόσβασης
- Δρομολόγηση μεταξύ των συστημάτων

Το ANDSF παρέχει μία λίστα από τα διαθέσιμα δίκτυα πρόσβασης για το τερματικό, όπως επίσης και το είδος της τεχνολογίας, το αναγνωριστικό του δικτύου(όπως για παράδειγμα το SSID στην περίπτωση των WLAN δικτύων) και άλλες ειδικές πληροφορίες για το κάθε δίκτυο. Το τερματικό μεταδίδει στο ANDSF την τρέχουσα θέση του, είτε ως γεωγραφική θέση, είτε ως

πληροφορία σε ποιο δίκτυο είναι εκείνη τη στιγμή συνδεδεμένο. Για παράδειγμα, αν το τερματικό έχει συνδεθεί με το LTE, η πληροφορία που θα μεταδώσει θα περιέχει τον πάροχο, το Tracking Area Code και το αναγνωριστικό της κυψέλης. Τότε, το ANDSF στέλνει στο τερματικό ένα πλήθος πληροφοριών, όπως τη παραπάνω λίστα με τα διαθέσιμα δίκτυα, το διάστημα του χρόνου που θα είναι διαθέσιμα και μια σειρά προτεραιότητας των υποψήφιων δικτύων βασισμένη στις απαιτήσεις των παρόχων.

Στην εικόνα 3.2 φαίνεται ένα παράδειγμα λειτουργίας του ANDSF. Το τερματικό είναι αρχικά συνδεδεμένο με το δίκτυο WLAN. Κάποια στιγμή το ANDSF ανανεώνει την στρατηγική για την εύρεση των διαθέσιμων δικτύων με βάση τις νέες πληροφορίες που λαμβάνει για τους συνδρομητές από το HSS, τις αλλαγές των θέσεών τους (τις λαμβάνει από τα τερματικά), τις μεταβολές του χάρτη κάλυψης των δικτύων και διαχειριστικές μεταβολές. Η νέα στρατηγική με τη λίστα των δικτύων μεταφέρεται στο τερματικό, όπου γίνεται αξιολόγηση της στρατηγικής αυτής ώστε τελικά να γίνει το handover προς το δίκτυο 3G.

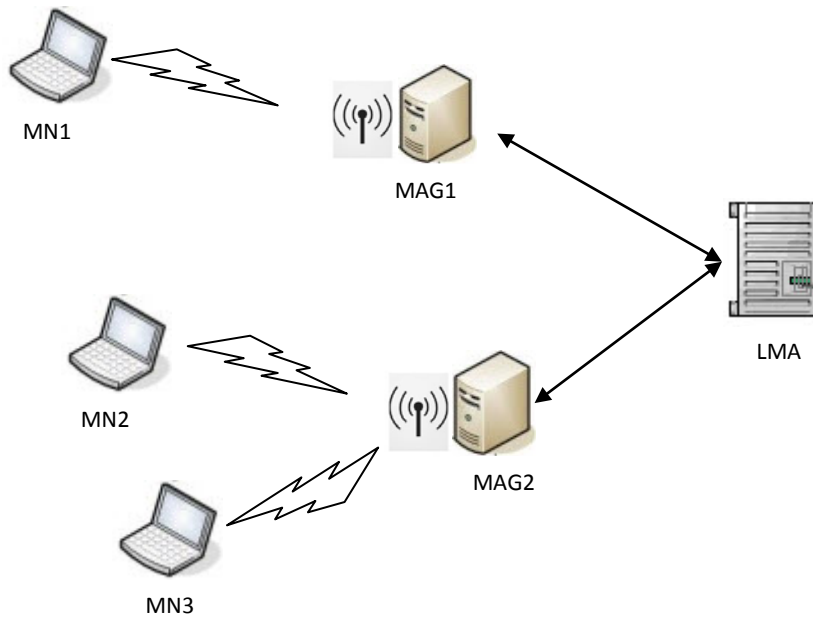


Εικόνα 3.2:Λειτουργία ANDSF [12]

3.2 Proxy Mobile IP (PMIP)

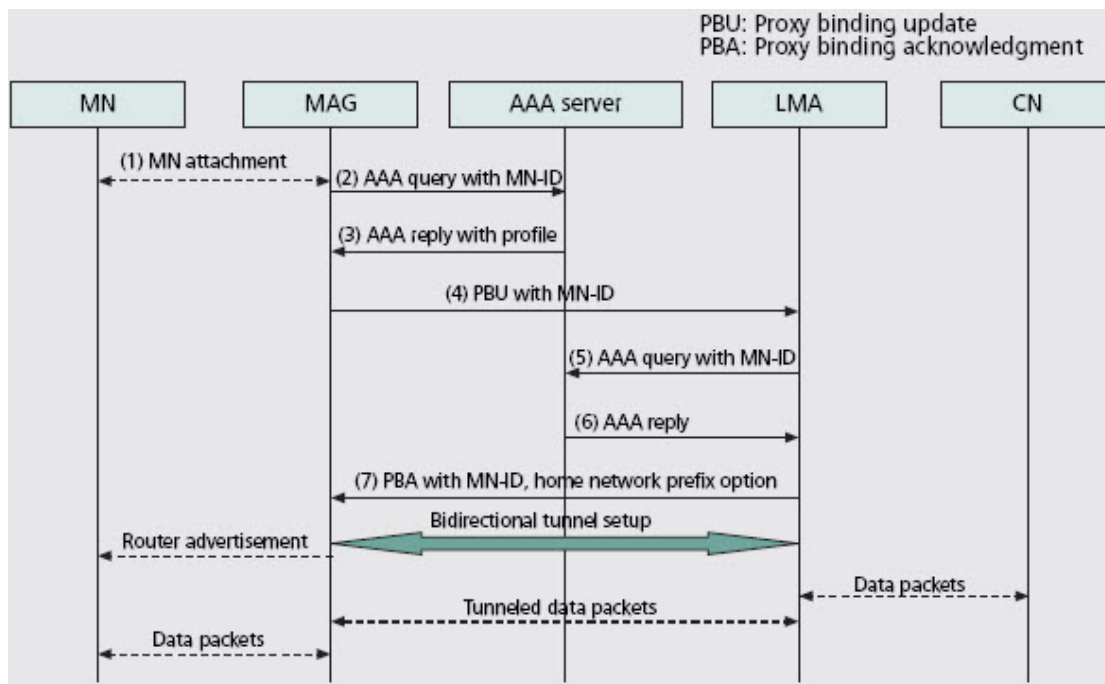
Όπως είδαμε και νωρίτερα, το δίκτυο κορμού EPC είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να υποστηρίζει την πρόσβαση τόσο στα 3GPP ασύρματα δίκτυα πρόσβασης όσο και στα μη-3GPP ασύρματα δίκτυα. Μια βασική απαίτηση για τη λειτουργία του EPC είναι η υποστήριξη της απρόσκοπτης κινητικότητας των χρηστών ανάμεσα στα διάφορα δίκτυα πρόσβασης διατηρώντας την ποιότητα των υπηρεσιών καθ' όλη τη διάρκεια των μετακινήσεων. Στην παράγραφο 3.1 αναφερθήκαμε στο ANDSF, το οποίο βοηθά το τερματικό στην εύρεση των υποψήφιων δικτύων πρόσβασης και τελικά στην επιλογή του κατάλληλου δικτύου για να μετακινηθεί. Για τις μετακινήσεις αυτές το EPC χρησιμοποιεί ένα πρωτόκολλο διαχείρισης κινητικότητας, το Proxy Mobile IP (PMIP), το οποίο προτυποποιήθηκε από την IETF (Internet Engineering Task Force). Πρόκειται για ένα network-based πρωτόκολλο που επιτρέπει την κινητικότητα των χρηστών ανάμεσα σε διαφορετικές τεχνολογίες δικτύων πρόσβασης, χωρίς όμως να εμπλέκει το κινητό στη σηματοδότηση επιπέδου IP που σχετίζεται με τη κινητικότητα. Αυτή είναι η κύρια διαφορά του από άλλα host-based πρωτόκολλα, όπως το MIPv6, δηλαδή το PMIP αναλαμβάνει εξολοκλήρου τη σηματοδότηση με το δίκτυο για λογαριασμό του τερματικού.

Για την υλοποίηση του πρωτοκόλλου εισάγονται δύο νέα στοιχεία στο δίκτυο (εικόνα 3.3), το Mobile Access Gateway (MAG) και το Local Mobility Anchor (LMA). Το MAG είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση της κινητικότητας για λογαριασμό του τερματικού. Όλη η απαιτούμενη σηματοδότηση με το LMA για την ενημέρωση της τρέχουσας θέσης του τερματικού γίνεται μέσω του MAG. Δηλαδή, ανιχνεύει την κίνηση του τερματικού, ξεκινά την αποστολή της σηματοδότησης στο LMA και επιβεβαιώνει ότι το τερματικό έχει πιστοποιηθεί. Ακόμα εγκαθιστά ένα δίαυλο επικοινωνίας με το LMA.



Εικόνα 3.3: PMIP

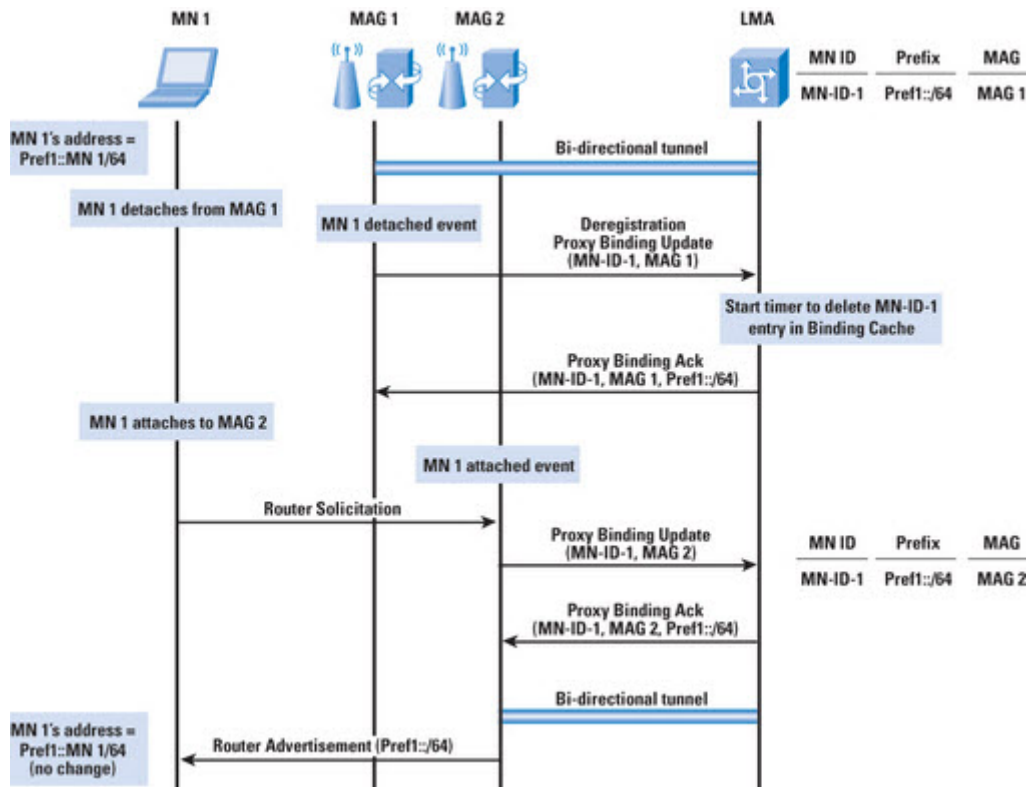
Όταν ένα τερματικό συνδέεται αρχικά με ένα δίκτυο, αφού πιστοποιηθεί, ζητά μια διεύθυνση IP. Τότε το MAG, αφού επιλέξει το κατάλληλο LMA, το ενημερώνει για τη θέση του τερματικού μέσω ενός μηνύματος PBU (Proxy Binding Update), το οποίο περιέχει μεταξύ άλλων και τη διεύθυνση IP του MAG, Proxy CoA (Care of Address). Έτσι το LMA δημιουργεί ένα συσχετισμό ανάμεσα στην IP διεύθυνση του τερματικού, HoA (Home Address) και την Proxy CoA και στέλνει με ένα μήνυμα PBA (Proxy Binding Acknowledgement) ένα πρόθεμα IPv6 για το τερματικό (εικόνα 3.4). Από εκεί και ύστερα, όσες μετακινήσεις κάνει το τερματικό σε άλλα δίκτυα θα διατηρεί την ίδια διεύθυνση IP που του ανατέθηκε αρχικά. Το μήνυμα PBA που λαμβάνει το MAG περιέχει, εκτός από το πρόθεμα, και όλες τις απαιτούμενες πληροφορίες που χρειάζεται έτσι ώστε να μπορεί να εξομοιώσει το αρχικό δίκτυο σύνδεσης στο κινητό. Επομένως το τερματικό δεν μπορεί να ανιχνεύσει κάποια αλλαγή στη σύνδεση ακόμα και αν έχει αλλάξει σημείο πρόσβασης. Τα πακέτα δεδομένων που στέλνονται από το τερματικό περνούν αρχικά από το MAG και από εκεί προωθούνται προς το LMA μέσω του διαύλου επικοινωνίας, το οποίο τελικά τα στέλνει στον τελικό προορισμό. Αντίστοιχα, τα πακέτα που στέλνονται στο τερματικό με διεύθυνση HoA ακολουθούν την αντίστροφη πορεία.



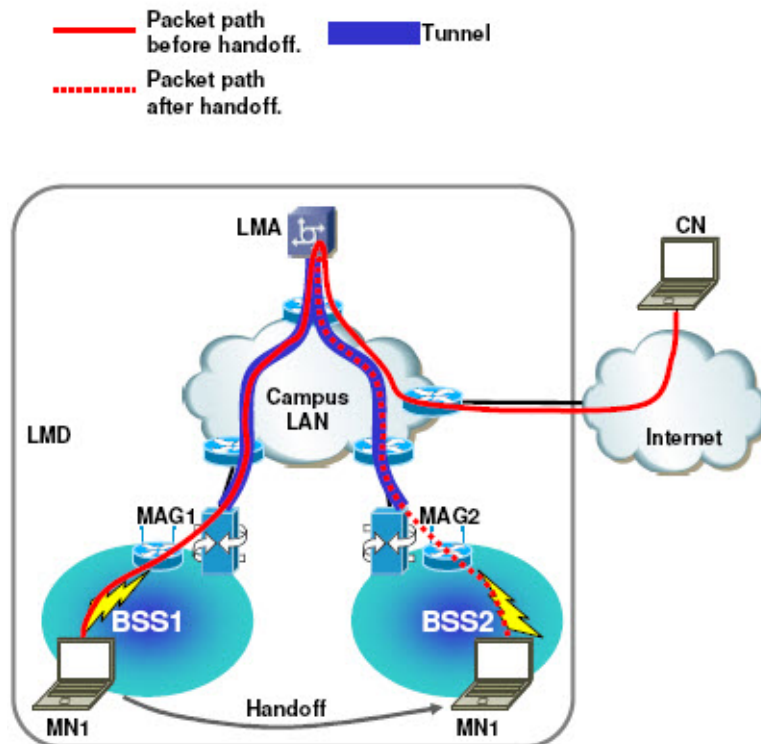
Εικόνα 3.4: PMIP-Σηματοδότηση σύνδεσης τερματικού [15]

Όταν το τερματικό κινείται, κάποια στιγμή θα συνδεθεί με ένα άλλο δίκτυο πρόσβασης, είτε της ίδιας τεχνολογίας είτε διαφορετικής, και η διαδικασία σύνδεσης στο νέο δίκτυο θα πρέπει να υλοποιηθεί ξανά. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.5, αρχικά το τερματικό αποσυνδέεται από το αρχικό MAG, το οποίο ειδοποιεί το LMA. Το MAG του νέου δικτύου εντοπίζει το τερματικό που έχει εισέλθει στην περιοχή του και έχει συνδεθεί. Για να λειτουργούν οι υπηρεσίες που εκτελεί ο χρήστης εκείνη τη στιγμή απρόσκοπτα, το νέο MAG στέλνει προς το LMA ένα μήνυμα PBU για να ανανεώσει την σύνδεσή του με αυτό και να το ενημερώσει για τη νέα θέση του τερματικού. Το PBU περιέχει και τη διεύθυνση του νέου MAG, τη νέα Proxy CoA. Το LMA ανανεώνει τη μεταξύ τους σύνδεση, και στέλνει στο νέο MAG την αρχική διεύθυνση του τερματικού HoA, η οποία όπως είπαμε δεν αλλάζει παρ' όλες τις μετακινήσεις, καθώς και άλλες πληροφορίες μέσω ενός PBA. Το MAG αναθέτει την διεύθυνση αυτή στο τερματικό, το οποίο εξακολουθεί να λειτουργεί απρόσκοπτα σαν να ήταν συνδεδεμένο ακόμα στο αρχικό δίκτυο. Η ροή των δεδομένων τώρα γίνεται μέσω του νέου MAG (εικόνα 3.6).

Ανάπτυξη και αποτίμηση μηχανισμού για την επιλογή δικτύου πρόσβασης

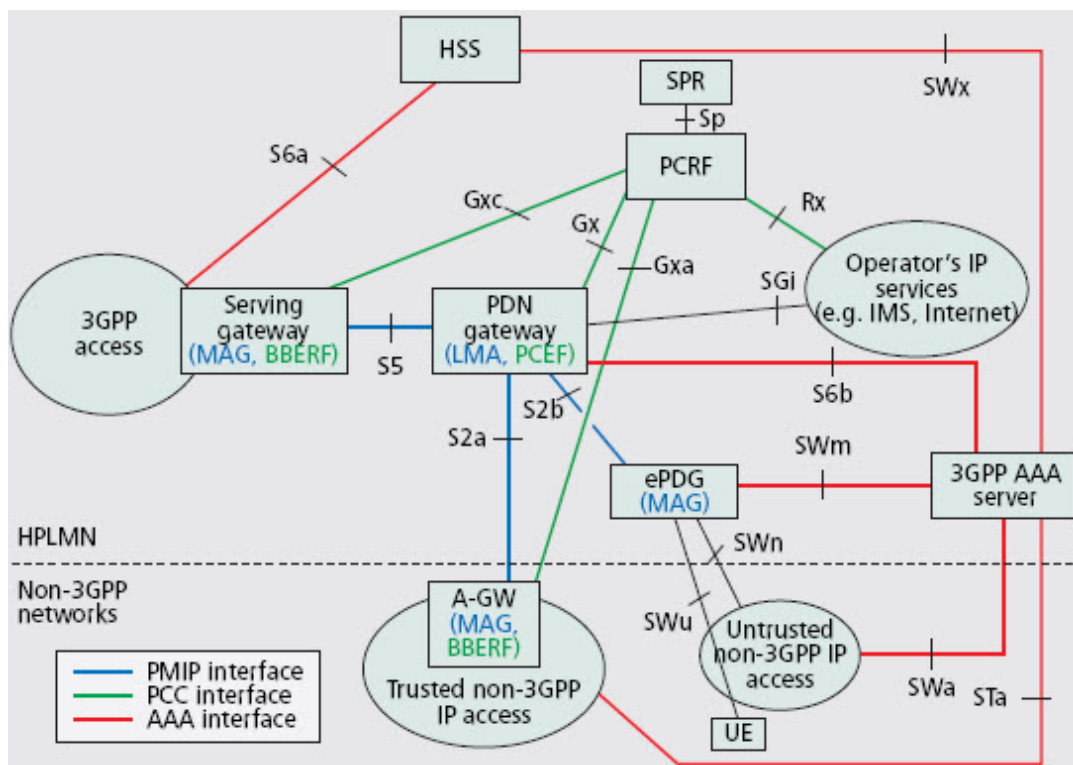


Εικόνα 3.5: PMIP-Σηματοδοσία handover [14]



Εικόνα 3.6: PMIP-Handover [16]

Στην εικόνα 3.7 φαίνεται η ενοποιημένη αρχιτεκτονική του EPC ώστε να υποστηρίζει την κινητικότητα σε όλα αυτά τα δίκτυα (3GPP και μη-3GPP δίκτυα πρόσβασης) μέσω του πρωτοκόλλου PMIP. Το PDN Gateway (PDN GW) παρέχει πρόσβαση στα διάφορα δίκτυα δεδομένων αναθέτοντας μια διεύθυνση IP στα τερματικά. Ως προς τη λειτουργία του πρωτοκόλλου PMIP συμπεριφέρεται ως ένα LMA. Το Serving Gateway (S-GW) περιέχει τις λειτουργίες του MAG για τη διαχείριση της κινητικότητας του τερματικού και επικοινωνεί με το PDN GW μέσω της διεπαφής S5. Αντίστοιχα, την ίδια χρήση έχει και το Access Gateway (A-GW) για τα trusted non-3GPP δίκτυα και χρησιμοποιεί την διεπαφή S2a για επικοινωνία με το PDN GW. Τα non-trusted non-3GPP δίκτυα (όπως για παράδειγμα ένα public WiFi) χρειάζεται για την σύνδεσή τους στο δίκτυο κορμού ένα ePDG (evolved Packet Data Gateway) το οποίο προσφέρει την απαραίτητη ασφάλεια, δηλαδή την πιστοποίηση του τερματικού και την κρυπτογράφηση των δεδομένων. Σχετικά με το PMIP, το ePDG λειτουργεί σαν MAG και η διεπαφή σύνδεσης με το PDN GW είναι η S2b. Οι διεπαφές S5, S2a και S2b είναι οι δίαυλοι επικοινωνίας ανάμεσα στα MAG και LMA για την αποστολή σηματοδότησης αλλά και δεδομένων.



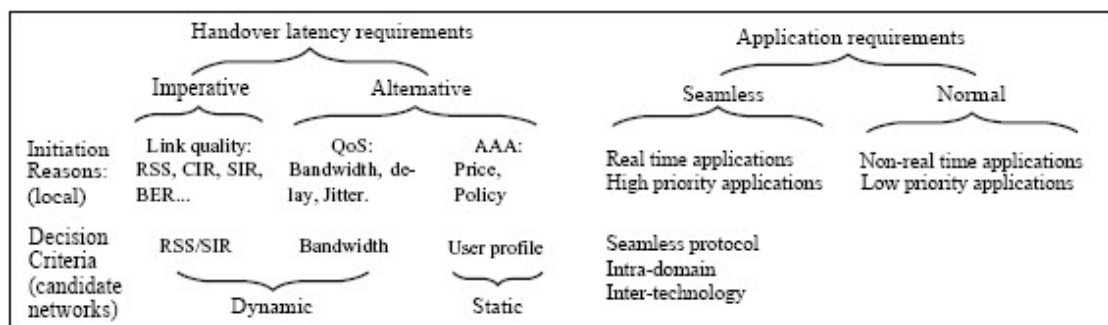
Εικόνα 3.7: Αρχιτεκτονική EPC για την υποστήριξη του πρωτοκόλλου PMIP [17]

4. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

4.1 Κατηγορίες μεταπομπών

Όταν ο χρήστης κινείται σε δίκτυο που χρησιμοποιεί την ίδια τεχνολογία, για παράδειγμα όταν αλλάζει κυψέλη σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, τότε το handover λέγεται οριζόντιο (horizontal handover HHO). Αντίθετα, όταν το handover γίνεται σε ετερογενή δίκτυα τότε λέγεται κάθετο (vertical handover VHO). Ο κύριος λόγος που οδηγεί ένα τερματικό να κάνει HHO είναι η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος, ενώ το VHO γίνεται για διάφορους λόγους που θα αναλύσουμε στη συνέχεια.

Τα vertical handovers μπορούν να διαχωριστούν με δύο τρόπους. Σύμφωνα με τον πρώτο τα VHO διακρίνονται στα επιτακτικά και στα κατ' επιλογήν. Τα επιτακτικά συμβαίνουν λόγω χαμηλού λαμβανόμενου σήματος, και η εκτέλεσή τους πρέπει να είναι γρήγορη ώστε να μην διακοπεί η σύνδεση. Τα κατ' επιλογήν VHO γίνονται για να προσφέρουν στο χρήστη καλύτερη απόδοση και εκτέλεση της υπηρεσίας που χρησιμοποιεί εκείνη τη στιγμή (για παράδειγμα μεγαλύτερο εύρος ζώνης, μικρότερο κόστος κ.α.). Άρα η μετάβαση αυτή σε ένα άλλο δίκτυο μπορεί να γίνει ακόμα και αν το λαμβανόμενο σήμα από το πρώτο δίκτυο είναι πολύ καλό. Τα κατ' επιλογήν handovers μπορούν να αντέξουν μεγαλύτερη καθυστέρηση από ότι τα επιτακτικά. Η καθυστέρηση βέβαια έχει σχέση και με το είδος της υπηρεσίας, δηλαδή handovers που αφορούν υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και υψηλής προτεραιότητας πρέπει να εκτελεστούν άμεσα, να μην γίνεται αντιληπτή η μετάβαση από το ένα δίκτυο στο άλλο. Ενώ για άλλες υπηρεσίες η μετάβαση μπορεί να γίνει με πιο φυσιολογικούς ρυθμούς.



Εικόνα 4.1:Κατηγορίες handover και υπηρεσιών [18]

Ο δεύτερος τρόπος διακρίνει τα VHO σε ανοδικά και καθοδικά. Τα ανοδικά VHO είναι τα handovers που γίνονται από ένα δίκτυο με μικρή κάλυψη και υψηλό ρυθμό δεδομένων σε ένα άλλο δίκτυο με ευρύτερη κάλυψη αλλά μικρότερο ρυθμό δεδομένων. Ένα παράδειγμα τέτοιων δικτύων είναι το WLAN(μικρή κάλυψη/υψηλός ρυθμός δεδομένων) με το 3G(μεγάλη κάλυψη/μικρότερος ρυθμός δεδομένων). Τα καθοδικά VHO είναι τα handovers που γίνονται προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Για την σωστή εξυπηρέτηση των χρηστών, οι υπηρεσίες που χρησιμοποιούν πρέπει να είναι αδιάκοπες και αξιόπιστες. Γι' αυτό το λόγο τα VHO από το ένα δίκτυο στο άλλο πρέπει να γίνονται πολύ γρήγορα, με την ελάχιστη δυνατή απώλεια πακέτων και με πολύ μικρή καθυστέρηση. Επίσης, πολύ σημαντικό είναι τα handovers να συμβαίνουν την κατάλληλη στιγμή και ακόμα να επιλέγεται το σωστό δίκτυο στο οποίο τελικά γίνεται η μεταπομπή. Όλα αυτά μαζί αποτελούν μια στρατηγική απόφασης εκτέλεσης VHO.

4.2 Κριτήρια για VHO

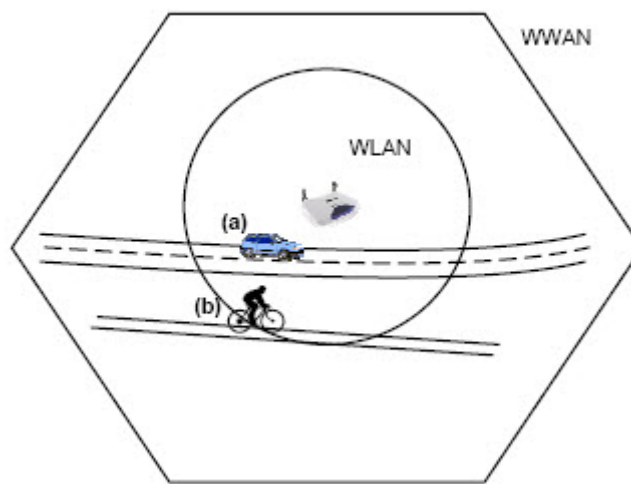
Στην απόφαση εκτέλεσης VHO σημαντικό ρόλο παίζουν διάφορα κριτήρια που υποδεικνύουν αν ένα handover είναι απαραίτητο ή όχι. Τα κριτήρια είναι διαφορετικά για την κάθε περίπτωση, και μπορούν να χωριστούν σε διάφορες κατηγορίες. Μία απ' αυτές είναι τα κριτήρια που σχετίζονται με την κατάσταση του δικτύου, όπως για παράδειγμα η κάλυψη, το εύρος ζώνης, η καθυστέρηση, το κόστος, η ασφάλεια και η ποιότητα της σύνδεσης(Received Signal Strength-RSS, Signal to Interferences Ratio-SIR, Bit Error Rate-BER). Άλλη κατηγορία είναι τα κριτήρια που σχετίζονται με το τερματικό, δηλαδή την

ταχύτητα, την τοποθεσία, την κατανάλωση της μπαταρίας. Ακόμα υπάρχουν κριτήρια που βασίζονται στις προτιμήσεις του χρήστη και άλλα που σχετίζονται με την ποιότητα και τις ικανότητες των υπηρεσιών που προσφέρονται. Όλα αυτά μπορούν να διαχωριστούν και ως στατικά και δυναμικά κριτήρια ανάλογα με τη συχνότητα που αλλάζουν τιμές. Για παράδειγμα δυναμικά μπορούν να χαρακτηριστούν η ταχύτητα του τερματικού και το RSS, ενώ στατικά οι προτιμήσεις του χρήστη και το κόστος πρόσβασης του κάθε δικτύου. Παρακάτω αναλύουμε κάποια από αυτά τα κριτήρια:

- Η ισχύς λαμβανόμενου σήματος είναι ένα από τα πιο γνωστά κριτήρια και χρησιμοποιείται κυρίως και από το HHO. Είναι εύκολο να μετρηθεί και σχετίζεται άμεσα με την ποιότητα της υπηρεσίας και με την απόσταση του τερματικού από το σημείο πρόσβασης. Υπάρχουν διάφορες περιπτώσεις απόφασης, για παράδειγμα handover μπορεί να γίνει όταν ισχύει: $RSS_{new} > RSS_{old}$, ή όταν $RSS_{new} > RSS_{old}$ και $RSS_{old} < T$, όπου T ένα συγκεκριμένο όριο κ.α.
- Το διαθέσιμο φάσμα είναι οι διαθέσιμοι πόροι για την μεταφορά των δεδομένων και μετριέται σε bit/s. Είναι ενδεικτικό για την κίνηση του δικτύου πρόσβασης και αφορά κυρίως υπηρεσίες ευαίσθητες στις καθυστερήσεις.
- Το κόστος των υπηρεσιών είναι ένα από τα πιο σημαντικά κριτήρια απόφασης για το χρήστη. Η χρέωση για μια υπηρεσία συνήθως είναι διαφορετική από δίκτυο σε δίκτυο και πολλές φορές γίνεται handover για αυτό το λόγο.
- Η ασφάλεια των μεταδιδόμενων δεδομένων για κάποιες υπηρεσίες είναι πολύ σημαντική. Σε αυτές τις περιπτώσεις δίκτυα με υψηλότερο επίπεδο ασφάλειας είναι προτιμότερα έναντι άλλων δικτύων.
- Η κατανάλωση μπαταρίας του τερματικού παίζει ρόλο κυρίως όταν είναι σε χαμηλά επίπεδα, όπου είναι προτιμότερο να παραμείνει ή να μεταβεί σε ένα δίκτυο που εξοικονομεί όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια.

Για παράδειγμα το κινητό θα μπορούσε να μεταβεί από ένα δίκτυο WLAN σε ένα WWAN.

- Η ταχύτητα του τερματικού όταν είναι μεγάλη και το τερματικό περνά από περιοχή όπου υπάρχει επικαλυπτόμενο δίκτυο, είναι ανώφελο να γίνει handover στο δίκτυο αυτό αφού σε λίγο θα πρέπει να μεταβεί ξανά στο αρχικό δίκτυο. Το ίδιο ισχύει ακόμα και αν η ταχύτητα είναι χαμηλή αλλά το τερματικό κινείται στα όρια του δικτύου αυτού(εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.2:Κριτήριο ταχύτητας τερματικού [19]

Στην απόφαση για το αν θα πραγματοποιηθεί τελικά ένα handover, τότε και σε ποιο δίκτυο, τις περισσότερες φορές παίζουν ρόλο ένας συνδυασμός των παραπάνω κριτηρίων και όχι μόνο ένα από αυτά.

Πέρα από τα κριτήρια και το είδος του handover που θα γίνει, υπάρχει ακόμα ένα θέμα: πού παίρνεται η απόφαση για τη διαδικασία μεταπομπής. Ο μηχανισμός απόφασης λοιπόν μπορεί να βρίσκεται είτε στο τερματικό είτε στο δίκτυο. Για να ληφθεί η απόφαση λαμβάνονται διάφορες πληροφορίες και γίνονται μετρήσεις πάνω στα εκάστοτε κριτήρια, τα οποία γίνονται είτε στο δίκτυο, είτε στο κινητό είτε και στα δύο. Επομένως όταν το δίκτυο έχει τον έλεγχο του μηχανισμού έχουμε Network-Controlled Handover(NCHO), και αντίστοιχα για το κινητό Mobile-Controlled Handover(MCHO). Όταν όμως οι πληροφορίες και οι μετρήσεις από το κινητό χρησιμοποιούνται από το δίκτυο για να ληφθεί η απόφαση, όπως γίνεται στο GSM, τότε έχουμε Mobile-

Assisted Handover(MAHO), και στην αντίθετη περίπτωση έχουμε το Network-Assisted Handover(NAHO).

4.3 Στάδια διαχείρισης και εφαρμογής των VHO

Η διαδικασία εφαρμογής ενός VHO από ένα δίκτυο σε άλλο περιλαμβάνει 3 στάδια:

- Συλλογή πληροφοριών(HO Information Gathering): συλλέγονται πληροφορίες που χρησιμεύουν στην ανίχνευση ανάγκης για handover. Το τερματικό αποφασίζει ποια δίκτυα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και ποιες υπηρεσίες υποστηρίζει το κάθε ένα. Τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να διαφημίζουν τον προσφερόμενο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για τις διάφορες υπηρεσίες. Το στάδιο αυτό λέγεται και αλλιώς ανακάλυψη συστήματος ή έναρξη handover.
- Απόφαση για HO(HO Decision): λαμβάνεται η απόφαση για το αν και πως θα γίνει το HO, διαλέγοντας το καταλληλότερο δίκτυο πρόσβασης με βάση τα κριτήρια και τις προτιμήσεις του χρήστη και δίνονται εντολές στο επόμενο βήμα. Το στάδιο αυτό λέγεται και επιλογή δικτύου.
- Εκτέλεση του HO(HO Execution): υλοποιείται το HO στο νέο δίκτυο σύμφωνα με τις οδηγίες που δόθηκαν από το δεύτερο στάδιο, οι συνδέσεις δρομολογούνται από το πρώτο δίκτυο στο καινούριο, και γίνεται η πιστοποίηση και η εξουσιοδότηση.

Στην ουσία το πρώτο στάδιο παίρνεται η απόφαση για το ποια είναι η κατάλληλη στιγμή να ξεκινήσει η διαδικασία του handover, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επιβάρυνση της σηματοδότησης, να αποφευχθούν τα περιττά handovers και να προβλεφθούν οι αποσυνδέσεις. Στο δεύτερο στάδιο η απόφαση που θα ληφθεί θα πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του συστήματος και του χρήστη διαλέγοντας το πιο κατάλληλο δίκτυο ανάμεσα σε πολλά άλλα που είναι διαθέσιμα για μια συγκεκριμένη υπηρεσία με τη βοήθεια κάποιου αλγορίθμου κατάλληλου για την κάθε περίπτωση. Επομένως, η εφαρμογή ενός handover είναι μια περίπλοκη διαδικασία αφού πρέπει να συνδυαστούν τα κριτήρια, να συγκριθούν μεταξύ τους, να επιλεγθεί ο

κατάλληλος αλγόριθμος για την επιλογή του δικτύου, όπως θα δούμε παρακάτω, καθώς κάθε περίπτωση είναι διαφορετική, ώστε όλα αυτά να βελτιστοποιήσουν την απόδοση του handover.

4.4 Μέτρα αποδοτικότητας της εφαρμογής των VHO αλγορίθμων

Η αποδοτικότητα των αλγορίθμων φαίνεται από το πλήθος των VHO που αποφασίζουν να υλοποιήσουν, από τη μέση και τη μέγιστη καθυστέρησή τους, από το πλήθος των αποτυχημένων VHOs που οφείλονται σε λανθασμένες αποφάσεις και από τη συνολική απόδοση του συστήματος κατά τη διάρκεια ενός VHO. Πιο συγκεκριμένα:

- Πλήθος VHO: Τα συχνά VHOs προκαλούν σπατάλη των πόρων του δικτύου, επομένως είναι επιθυμητό να μην γίνονται άσκοπα. Για παράδειγμα, όταν ένα HO πρέπει να γίνει μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα ξανά στο αρχικό δίκτυο σύνδεσης που βρισκόταν νωρίτερα.
- Καθυστέρηση: είναι η διάρκεια ανάμεσα στην αρχικοποίηση και την ολοκλήρωση ενός HO. Ο χρόνος αυτός σχετίζεται με την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου και είναι πολύ σημαντικός κυρίως για υπηρεσίες φωνής και πολυμέσων (real-time services) που είναι ευαίσθητες στις καθυστερήσεις.
- Πιθανότητα αποτυχημένου VHO: Ένα handover είναι αποτυχημένο όταν ξεκινά η διαδικασία μεταπομπής σε ένα δίκτυο το οποίο τελικά δεν έχει επαρκείς πόρους για να την ολοκληρώσει. Ακόμα συμβαίνει και όταν το τερματικό, καθώς κινείται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτής, βγαίνει εκτός της περιοχής κάλυψης του τελικού δικτύου πριν προλάβει να ολοκληρωθεί το HO.
- Απόδοση συστήματος: Είναι ο ρυθμός με τον οποίο μεταδίδονται τα δεδομένα στο τερματικό από το δίκτυο. Επομένως προτιμότερα είναι τα HO σε δίκτυα με υψηλότερες αποδόσεις.

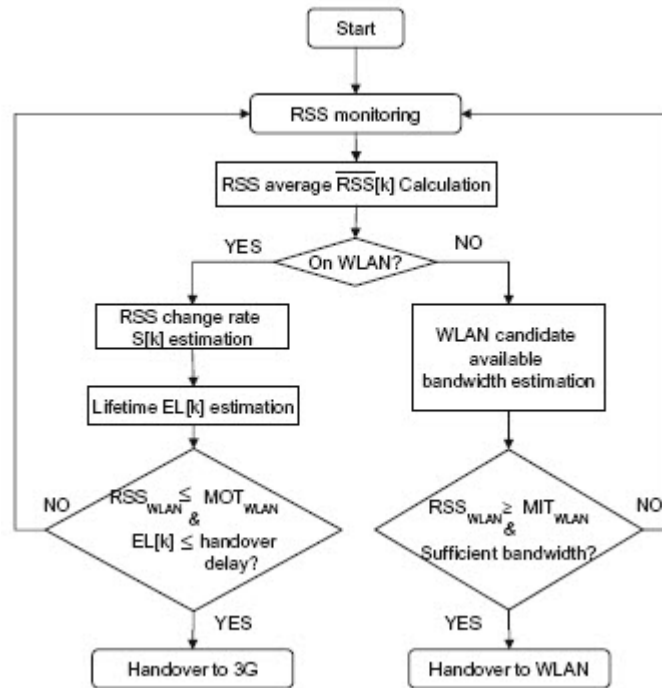
4.5 Αλγόριθμοι VHO

Έχουν προταθεί πολλοί αλγόριθμοι για την επιλογή του κατάλληλου δικτύου σε ένα handover. Άλλοι χρησιμοποιούν ένα μόνο κριτήριο για την επιλογή και άλλοι ένα συνδυασμό κριτηρίων. Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να κατηγοριοποιηθούν οι αλγόριθμοι, ένας από αυτούς είναι το είδος και το πλήθος των κριτηρίων που χρησιμοποιούνται καθώς και οι μέθοδοι που τα επεξεργάζονται. Έτσι, υπάρχουν αλγόριθμοι που βασίζονται στην ισχύ του λαμβανόμενου σήματος(RSS), αλγόριθμοι με βάση το εύρος ζώνης, άλλοι που χρησιμοποιούν συναρτήσεις κόστους και οι συνδυαστικοί αλγόριθμοι. Οι αλγόριθμοι που βασίζονται στο RSS είναι από τους πιο απλούς λόγω τις ευκολίας των μετρήσεων του σήματος, και είναι πολύ διαδεδομένοι αφού το RSS είναι το κριτήριο που χρησιμοποιείται και για τα HHOs. Ακόμα υπάρχουν αλγόριθμοι που μπορεί να λαμβάνουν υπ' όψιν τους και το RSS αλλά και το εύρος ζώνης, οπότε σε αυτές τις περιπτώσεις ανάλογα με το ποιο είναι το κριτήριο που παίζει τον κύριο ρόλο, κατατάσσουμε και τον αλγόριθμο στην αντίστοιχη κατηγορία. Οι αλγόριθμοι συνάρτησης κόστους συνδυάζουν διάφορα κριτήρια που ανάλογα με την περίπτωση έχουν και διαφορετική βαρύτητα μεταξύ τους, και σύμφωνα με τις τιμές που λαμβάνουν από το καθένα, υπολογίζουν μια συνάρτηση κόστους για κάθε ένα υποψήφιο δίκτυο, ώστε τελικά να διαλέξουν αυτό με το μικρότερο κόστος. Τέλος οι συνδυαστικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν σαν είσοδο ένα μεγαλύτερο εύρος κριτηρίων(Multiple Attribute Decision-MAD), άλλοι μπορεί να είναι επικεντρωμένοι στις προτιμήσεις του χρήστη(user centric-UC), ή μπορεί να βασίζονται στη γνώση πληροφοριών από το γύρω περιβάλλον, δηλαδή από το τερματικό και το δίκτυο(context aware-CA). Οι αλγόριθμοι που βασίζονται σε πληθώρα κριτηρίων συνήθως είναι πολύ δύσκολο να αναπτύξουν μεθόδους για τη λήψη απόφασης για HO. Για αυτό το λόγο συχνά χρησιμοποιούνται συστήματα ασαφούς λογικής(fuzzy logic systems) και νευρωνικά δίκτυα(neural networks) που μπορούν να χειριστούν και να αξιολογήσουν πολλαπλά δεδομένα ταυτόχρονα.

4.5.1 Αλγόριθμοι VHO με βάση το RSS

Ένας αλγόριθμος για VHO που προτάθηκε από τους Zahran και Liang [21] και εφαρμόζεται ανάμεσα σε δίκτυα 3G και WLAN συνδυάζει τις μετρήσεις του RSS είτε με μία εκτιμώμενη τιμή χρόνου ζωής πέραν της οποίας το τερματικό δεν είναι σε θέση να διατηρήσει τη σύνδεσή του με το WLAN, είτε με το διαθέσιμο φάσμα του υποψήφιου WLAN δικτύου. Όταν ένα τερματικό πλησιάζει προς μια κυψέλη του 3G δικτύου, αρχικοποιείται ένα HO προς το δίκτυο αυτό. Το HO γίνεται τελικά αν η μέση τιμή RSS του WLAN πέσει κάτω από ένα προκαθορισμένο κατώφλι (MOT_{WLAN}) και αν ο εκτιμώμενος χρόνος ζωής είναι μικρότερος ή ίσος με την καθυστέρηση του HO. Η μέση τιμή του RSS υπολογίζεται συνεχώς από το τερματικό. Ο εκτιμώμενος χρόνος ζωής υπολογίζεται με τη βοήθεια της τιμής του μέσου RSS και της παραμέτρου ASST (Application Signal Strength Threshold). Η παράμετρος αυτή αναφέρεται στην εφαρμογή που εκτελείται και εξαρτάται από το BER (Bit Error Rate) του καναλιού και τις απαιτήσεις της εφαρμογής για την ποιότητα των υπηρεσιών και για την ανεκτικότητα των λαθών. Στην αντίθετη περίπτωση όπου το κινητό προχωρά προς μια περιοχή κάλυψης του WLAN, το HO προς το δίκτυο αυτό εκτελείται αν το μέσο RSS του είναι μεγαλύτερο από μια καθορισμένη τιμή (MIT_{WLAN}) και το διαθέσιμο φάσμα του είναι αρκετό για τις ανάγκες της υπηρεσίας. Τα βήματα που ακολουθούνται φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 4.3). Ο αλγόριθμος αυτός προσαρμόζεται στην κινητικότητα του χρήστη, προσαρμόζεται στις απαιτήσεις της εφαρμογής και επιτυγχάνει βελτίωση της μέσης απόδοσης. Το πλήθος των περιπτώσεων HO ελαττώνεται μέχρι και 85% σε σχέση με τους απλούς αλγορίθμους RSS, το διαθέσιμο φάσμα αυξάνεται έως και 33% και γενικότερα η συνολική ρυθμαπόδοση του συστήματος είναι αυξημένη έως και 33%. Αντίθετα, η πιθανότητα καθυστέρησης πακέτων είναι αυξημένη (1%) σχετικά με τους συμβατικούς αλγορίθμους, η οποία μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα σε real-time εφαρμογές. Όμως ρυθμίζοντας κατάλληλα την τιμή της παραμέτρου ASST, η πιθανότητας καθυστέρησης μειώνεται (η τιμή της μπορεί να φτάσει στο 0.2%) έχοντας όμως σαν συνέπεια την αύξηση των HOs και τη μείωση του διαθέσιμου bandwidth. Τέλος ο αλγόριθμος αυτός αυξάνει τη χρήση του

δικτύου WLAN από το τερματικό κατά 15% για τις πιο υψηλές ταχύτητες και έως 35% για τις μικρότερες.



Εικόνα 4.3:Αλγόριθμος VHO Zahran-Liang [21]

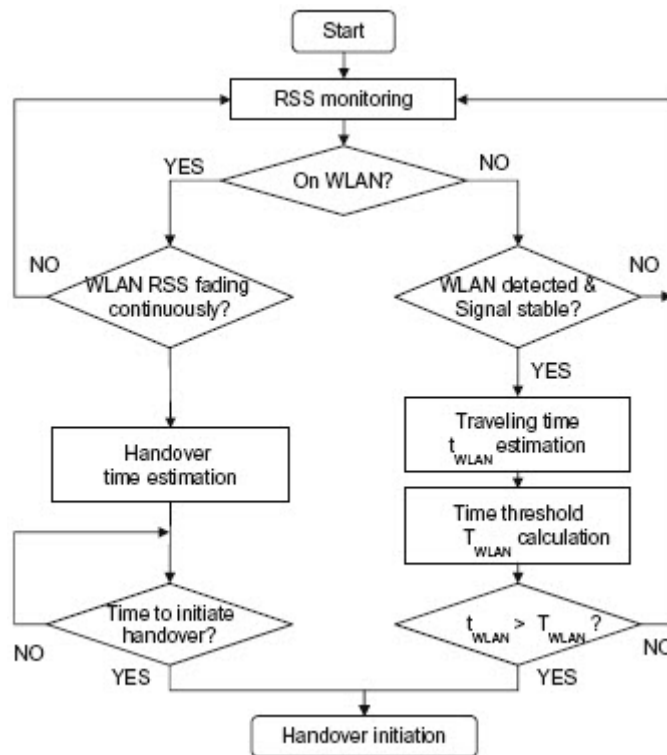
Ένας άλλος αλγόριθμος της ίδιας κατηγορίας (RSS based) προτάθηκε από τον Yan[21] και αφορά κυψελωτά συστήματα και δίκτυα WLAN. Βασίζεται στο εκτιμώμενο χρόνο που προβλέπεται το κινητό να παραμείνει μέσα σε μια κυψέλη WLAN. Ο χρόνος αυτός(t_{WLAN}) υπολογίζεται συναρτήσει της ακτίνας της κυψέλης R , της απόστασης l του τερματικού από το σημείο πρόσβασης, του χρόνου t_s που λαμβάνεται το δείγμα του RSS, της στιγμής t_{in} που το τερματικό εισέρχεται σε περιοχή κάλυψης δικτύου WLAN και της ταχύτητάς του v .

$$t_{wlan} = \frac{R^2 - l^2 + v^2(t_s - t_{in})^2}{v^2(t_s - t_{in})}$$

Η ταχύτητα του τερματικού v υπολογίζεται με τη βοήθεια του αλγορίθμου VEPSD[47] μέσω της σχέσης

$$v = \left(\frac{c}{f_c} \right) f_m$$

όπου το c είναι η ταχύτητα του φωτός, το f_c είναι η φέρουσα συχνότητα του λαμβανόμενου σήματος και f_m η μέγιστη συχνότητα Doppler. Ο αλγόριθμος VEPSD υπολογίζει τη συχνότητα f_m χρησιμοποιώντας την κλίση της φασματικής πυκνότητας ισχύος (PSD) της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος. Η κλίση του PSD έχει μέγιστα στις συχνότητες $f_c \pm f_m$. Ο VEPSD για να υπολογίσει την f_m , ανιχνεύει τη μέγιστη τιμή του PSD που αντιστοιχεί στην υψηλότερη συνιστώσα $f_c + f_m$. Το HO εκτελείται αν υπάρχει διαθέσιμη κάλυψη WLAN και αν ο χρόνος αυτός είναι μεγαλύτερος από ένα ελάχιστο χρονικό διάστημα-κατώφλι (T_{WLAN}). Προς την αντίθετη κατεύθυνση συμβαίνει όταν το RSS από το WLAN ελαττώνεται συνεχώς και το τερματικό πλησιάζει προς τη έναρξη ενός HO. Τα πλεονεκτήματα του αλγορίθμου είναι η μείωση των αποτυχημένων και άσκοπων HO, με αντίκτυπο όμως στην καθυστέρηση που είναι αυξημένη. Συγκεκριμένα το πλήθος των HOs μειώνεται όσο η ταχύτητα του τερματικού αυξάνεται, και η μείωση αυτή μπορεί να φτάσει μέχρι και το 35% για ταχύτητες 40km/h και άνω. Αντίστοιχα, και η πιθανότητα των αποτυχημένων VHOs είναι σε χαμηλά επίπεδα για ταχύτητες άνω των 10km/h. Για τα τερματικά που κινούνται με μικρότερες ταχύτητες ή είναι στάσιμα, η πιθανότητα αυτή αυξάνεται και πλέον ο αλγόριθμος αυτός δεν είναι κατάλληλος για HO. Επίσης είναι ακατάλληλος για χρήση και στην περίπτωση που η εφαρμογή που εκτελείται στο τερματικό είναι real-time εξαιτίας των μεγάλων καθυστερήσεων που φτάνουν μέχρι και τα 2s και οφείλονται στις συχνές δειγματοληψίες του RSS. Τα στάδια του αλγορίθμου απεικονίζονται παρακάτω(εικόνα 4.4).



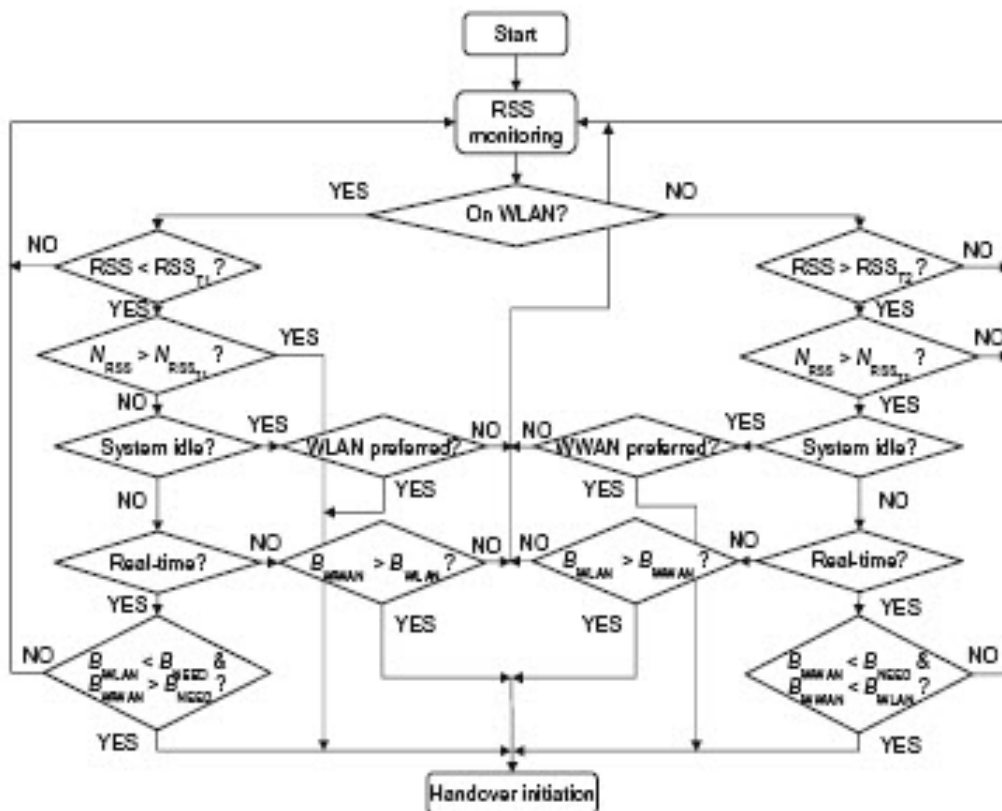
Εικόνα 4.4:Αλγόριθμος VHO Yan [21]

4.5.2 Αλγόριθμοι VHO με βάση το bandwidth

Ένας από τους αλγορίθμους που ανήκει σε αυτή την κατηγορία και βασίζεται στην ποιότητα των υπηρεσιών(QoS) έχει προταθεί από τον Lee[21]. Εφαρμόζεται σε δίκτυα WLAN και WWAN. Όταν το τερματικό είναι συνδεδεμένο στο WLAN, το handover ξεκινά όταν η τιμή του RSS είναι χαμηλότερη από ένα κατώφλι(RSS_{T1}). Τότε η παράμετρος N_{RSS} που μετρά το πλήθος των συνεχόμενων μετρήσεων του RSS που είναι κάτω από το κατώφλι, αυξάνεται κατά ένα και όταν ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή N_{RSS_T} ξεκινά η διαδικασία του HO. Εάν το τερματικό είναι σε αδρανή κατάσταση, το HO γίνεται στο επιθυμητό δίκτυο του χρήστη, αλλιώς η απόφαση λαμβάνεται με βάση το είδος της υπηρεσίας. Δηλαδή, για πραγματικού χρόνου εφαρμογές το HO γίνεται μόνο αν το WLAN δεν μπορεί να διαθέσει αρκετό bandwidth ενώ το WWAN μπορεί, αλλιώς παραμένει στο WLAN. Με αυτό τον τρόπο οι εφαρμογές αυτές αποφεύγουν συνήθως τις περιττές καθυστερήσεις που οφείλονται στα HOs. Το bandwidth που μπορεί να διαθέσει το WLAN υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Residual_bandwidth} = \text{throughput} * (1 - a * \text{channel_utilization}) * (1 - \text{packet_loss_rate})$$

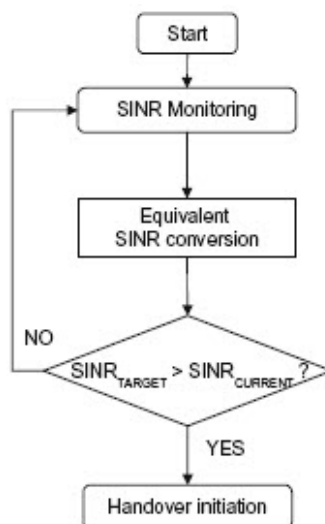
Για τις non-real-time υπηρεσίες handover προς το WWAN γίνεται μόνο αν διαθέτει μεγαλύτερο bandwidth. Παρόμοια είναι η αντίστροφη διαδικασία, η οποία φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα(εικόνα 4.5). Δηλαδή αρχικά ανιχνεύεται εάν υπάρχει δίκτυο WLAN στην συγκεκριμένη περιοχή και κατόπιν μετρίεται το RSS του και συγκρίνεται με το κατώφλι. Στη συνέχεια γίνεται διαχωρισμός όπως και πριν για τις περιπτώσεις που το τερματικό είναι αδρανές ή όχι και για το είδος των υπηρεσιών. Η μέθοδος αυτή έχει υψηλή ρυθμαπόδοση, που φτάνει μέχρι και το 400% σε σχέση με τον παραδοσιακό αλγόριθμο, και μικρή καθυστέρηση στα HO για τις real-time εφαρμογές (με μέσο όρο τα 455ms), είναι όμως δύσκολο να εφαρμοστεί στα κυψελωτά δίκτυα αφού η αναζήτηση πληροφοριών του διαθέσιμου φάσματος στα δίκτυα αυτά δεν είναι εύκολη διαδικασία.



Εικόνα 4.5:Αλγόριθμος VHO-Lee [21]

Στην κατηγορία αυτή υπάρχει ακόμα ο αλγόριθμος του Yang που βασίζεται στο SINR(signal to interference and noise ratio)[21]. Απευθύνεται σε HO

ανάμεσα σε δίκτυα WLAN και WCDMA. Το SINR του κάθε δικτύου υπολογίζεται συναρτήσει του bandwidth και τελικά το HO γίνεται στο δίκτυο με το μεγαλύτερο SINR, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα(εικόνα 4.6). Ο αλγόριθμος αυτός προσφέρει υψηλότερη ρυθμαπόδοση συστήματος σε σχέση με τους RSS based (μέχρι και 40%) και ισορροπεί την κίνηση ανάμεσα στα δύο δίκτυα, αυξάνοντας όμως πολύ το πλήθος των HO εξαιτίας των διακυμάνσεων του SINR. Η μέση ρυθμαπόδοση του κάθε χρήστη ελαττώνεται καθώς η ισχύς του θορύβου αυξάνεται, όμως είναι μεγαλύτερη από αυτή των RSS-based αλγορίθμων. Αντίστοιχα το ίδιο συμβαίνει και σε σχέση με το φόρτο του συστήματος. Η μέση ρυθμαπόδοση είναι ξανά μεγαλύτερη απ' ότι στον απλό RSS αλγόριθμο, με τιμές περίπου 1.5Mbps για τον SINR-based και 0.6Mbps για τον RSS-based σε ένα αρκετά φορτωμένο δίκτυο.

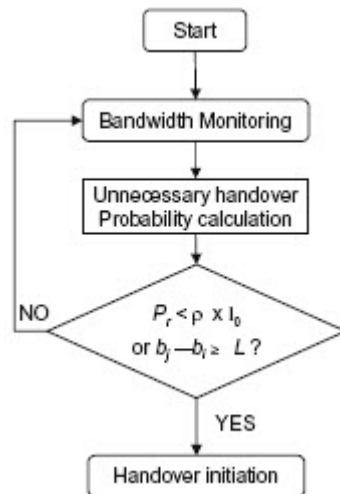


Εικόνα 4.6:Αλγόριθμος VHO-Yang [21]

Επίσης, υπάρχει ο αλγόριθμος του Chi[21], που είναι αλγόριθμος πρόβλεψης πιθανότητας λανθασμένης απόφασης. Υπολογίζει τη πιθανότητα των περιπτώσεων HOs καθώς και αυτών που δεν γίνονται ενώ θα έπρεπε. Ο τρόπος υλοποίησης του φαίνεται στο διάγραμμα στην εικόνα 4.7. Ένα handover από ένα δίκτυο i σε ένα δίκτυο j γίνεται όταν η πιθανότητα P_r των περιπτώσεων HO είναι μικρότερη από το 1% του φόρτου κίνησης του δικτύου i ή όταν ισχύει $b_j - b_i \leq L$, όπου b_j, b_i είναι το bandwidth του κάθε δικτύου και L μία σταθερή τιμή. Εφαρμόζεται σε οποιαδήποτε ασύρματα δίκτυα, μειώνει τη πιθανότητα περιπτώσεων HO κατά 45% σε σχέση με τον απλό bandwidth-based αλγόριθμο

Ευρυδίκη-Φραγκίσκη Α. Καραγιάννη 58

που συγκρίνει απλά τα δύο φάσματα και ισορροπεί τη κίνηση στα δίκτυα. Η πιθανότητα αυτή είναι το πολύ 1.5% ενώ μειώνεται και η πιθανότητα λανθασμένης πρόβλεψης κατά 35% συγκριτικά με τον απλό αλγόριθμο. Όμως αυξάνει το πλήθος των αποσυνδέσεων αφού τα HO γίνονται σε δίκτυο με υψηλό bandwidth αλλά επειδή δεν υπάρχει πρόβλεψη για τη μέτρηση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος, λόγω χαμηλού RSS ορισμένων η σύνδεση μπορεί να διακοπεί.



Εικόνα 4.7:Αλγόριθμος VHO-Chi [21]

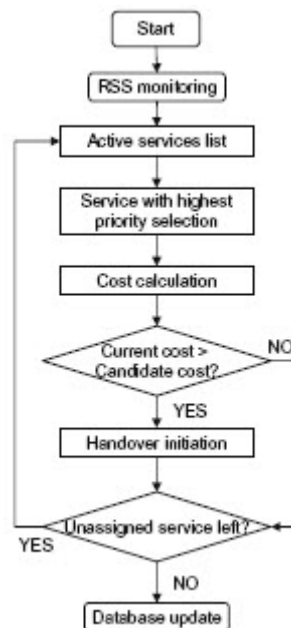
4.5.3 Αλγόριθμοι VHO με συναρτήσεις κόστους

Οι αλγόριθμοι αυτοί συνδυάζουν διάφορες παραμέτρους με μια συνάρτηση κόστους, όπως για παράδειγμα αυτός των πολλαπλών υπηρεσιών των Zhu και McNair[21]. Ο αλγόριθμος φτιάχνει μια λίστα με τη σειρά προτεραιότητας όλων των ενεργών εφαρμογών, και ύστερα για την εφαρμογή που βρίσκεται στη κορυφή της λίστας, υπολογίζει το κόστος κάθε υποψήφιου δικτύου με τη συνάρτηση

$$C_s^n = \sum W_{s,j}^n Q_{s,j}^n, \quad E_{s,j}^n \neq 0$$

όπου το C είναι το κόστος ανά υπηρεσία στο δίκτυο n, Q είναι το κανονικοποιημένο QoS που παρέχεται από το δίκτυο n για την παράμετρο j της υπηρεσίας s, W είναι ο συντελεστής βαρύτητας του QoS της παραμέτρου και το E είναι ο παράγοντας που δείχνει εάν οι απαιτήσεις της παραμέτρου j της υπηρεσίας s μπορούν να ικανοποιηθούν στο δίκτυο n. Το τελικό κόστος κάθε δικτύου είναι το σύνολο των επιμέρους αθροισμάτων κοστών των

παραμέτρων, όπως το εύρος ζώνης, η κατανάλωση μπαταρίας και η καθυστέρηση. Τελικά το HO της εφαρμογής γίνεται στο δίκτυο με το χαμηλότερο κόστος, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα(εικόνα 4.8).



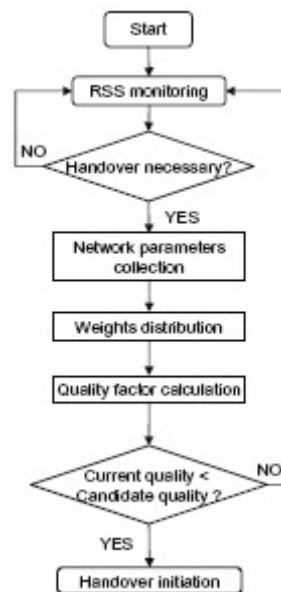
Εικόνα 4.8:Αλγόριθμος VHO Zhu – McNair [21]

Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται σε οποιαδήποτε ασύρματα δίκτυα, ικανοποιεί τις απαιτήσεις των χρηστών σε μεγάλο βαθμό αλλά αντιμετωπίζει δυσκολία στην εύρεση των συντελεστών βαρύτητας και των κανονικοποιημένων τιμών. Συγκεκριμένα το ποσοστό των ικανοποιημένων απαιτήσεων των χρηστών είναι αυξημένο κατά 50% σε σχέση με τον απλό RSS-based αλγόριθμο και η ρυθμαπόδοση του συστήματος ανάλογα με το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων CBR(Constant Bit Rate) είναι κατά 50% μεγαλύτερη.Ο αλγόριθμος του Hasswa είναι παρόμοιος με τον προηγούμενο, όμως τώρα οι συντελεστές βαρύτητας παρέχονται από το χρήστη μέσω της διεπαφής UI. Για κάθε υποψήφιο δίκτυο υπολογίζεται μια συνάρτηση ποιότητας εφαρμογής Q_i του HO με παραμέτρους το κόστος υπηρεσίας C_i , την ασφάλεια S_i , τη κατανάλωση ενέργειας P_i , τις συνθήκες D_i και την απόδοση F_i δικτύου μαζί με τους αντίστοιχους συντελεστές βαρύτητας ($\omega_c, \omega_s, \omega_p, \omega_d, \omega_f$).

$$Q_i = \omega_c C_i + \omega_s S_i + \omega_p P_i + \omega_d D_i + \omega_f F_i$$

Τελικά το HO γίνεται στο δίκτυο με τη καλύτερη ποιότητα. Η ρυθμαπόδοση του αλγορίθμου αυτού αυξάνεται έως και 57% για διάφορες non-real-time

υπηρεσίες. Τα βήματα του αλγορίθμου φαίνονται στο διάγραμμα ροής(εικόνα 4.9).

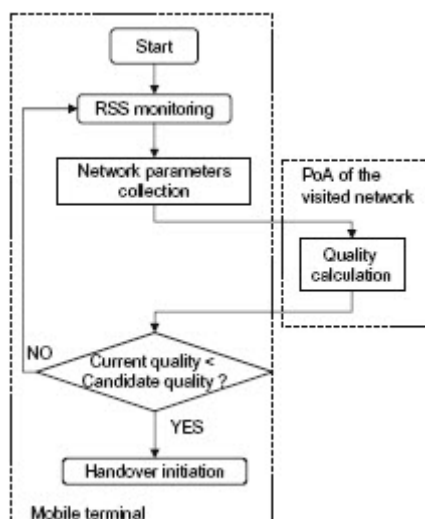


Εικόνα 4.9:Αλγόριθμος VHO - Hasswa [21]

Υπάρχει ακόμα και ο αλγόριθμος του Tawil ο οποίος χρησιμοποιεί και αυτός μια συνάρτηση ποιότητας Q_i με βάση το εύρος ζώνης B_i , το κόστος της υπηρεσίας C_i και τη πιθανότητα αποσύνδεσης D_{Pi} με τους αντίστοιχους συντελεστές τους (W_B, W_C, W_{Dp}).

$$Q_i = W_B B_i + W_{Dp} (1/D_{Pi}) + W_C (1/C_i)$$

Η διαφορά του όμως από τους άλλους δύο είναι ότι τον υπολογισμό αυτό τον κάνει κάθε υποψήφιο δίκτυο και όχι το τερματικό, όπως φαίνεται και σχηματικά στην εικόνα 4.10. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μικρή καθυστέρηση. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται μια μείωση στη καθυστέρηση κατά 50% σε σχέση με τους απλούς αλγορίθμους. Βέβαια όσο πιο πολλά είναι τα υποψήφια δίκτυα τόσο μεγαλύτερη είναι και η καθυστέρηση, για παράδειγμα με δύο υποψήφια δίκτυα κατά μέσο όρο είναι 0.2s ενώ με τέσσερα δίκτυα είναι στα 0.5s. Όμως αναλογικά με τους άλλους αλγορίθμους είναι πάλι μικρότερη. Επίσης υπερτερεί και στην ρυθμαπόδοση καθώς είναι κατά 16% μεγαλύτερη σε σχέση με τους centralized αλγορίθμους.



Εικόνα 4.10:Αλγόριθμος VHO – Tawil [21]

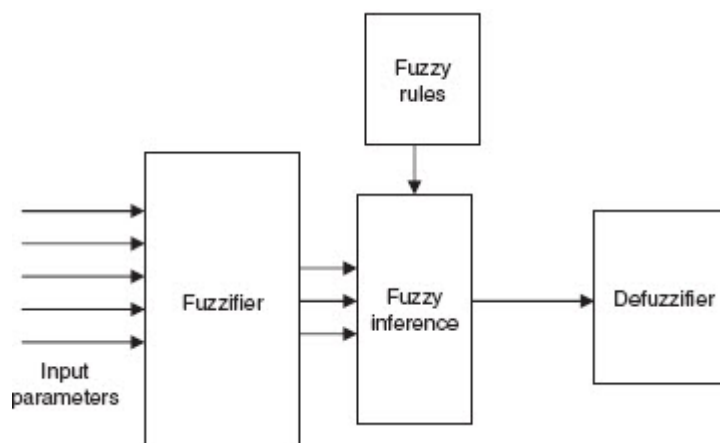
Και οι 3 αλγόριθμοι συνάρτησης κόστους εφαρμόζονται σε οποιαδήποτε ασύρματα δίκτυα και προσφέρουν υψηλές αποδόσεις.

4.5.4 Συνδυαστικοί αλγόριθμοι

Οι αλγόριθμοι αυτής της κατηγορίας, όπως και αυτοί με τις συναρτήσεις κόστους, εκτός από το RSS, συνυπολογίζουν πολλά κριτήρια μαζί, όπως το προσφερόμενο QoS του κάθε υποψήφιου δικτύου, το φόρτο κίνησης, τη ταχύτητα και τη κατεύθυνση στην οποία κινείται το τερματικό, τις προτιμήσεις του χρήστη, τις απαιτήσεις της εφαρμογής, τα επίπεδα της μπαταρίας και τις δυνατότητες γενικότερα των τερματικών. Όλα αυτά συνδυάζονται με ένα περίπλοκο τρόπο που πολλές είναι οι φορές όπου ένα απλό μαθηματικό μοντέλο, όπως αυτά των συναρτήσεων κόστους, δεν είναι σε θέση να βρει το κατάλληλο δίκτυο. Για αυτές τις περιπτώσεις, η χρήση fuzzy logic συστημάτων και δικτύων neural networks είναι μια καλή λύση. Τα συστήματα αυτά είναι ικανά να χειριστούν τα ασαφή δεδομένα που προέρχονται από διαφορετικές κατηγορίες μεταξύ τους(για παράδειγμα η ποιότητα σύνδεσης, η πολιτική κοστολόγησης των υπηρεσιών κ.α.), και μπορούν να δώσουν αρκετά ικανοποιητικές λύσεις. Όμως αυξάνουν την πολυπλοκότητα του δικτύου και τη συνολική καθυστέρηση καθώς απαιτείται χρόνος για την απόκτηση των δεδομένων και την «εκπαίδευση» των neural networks.

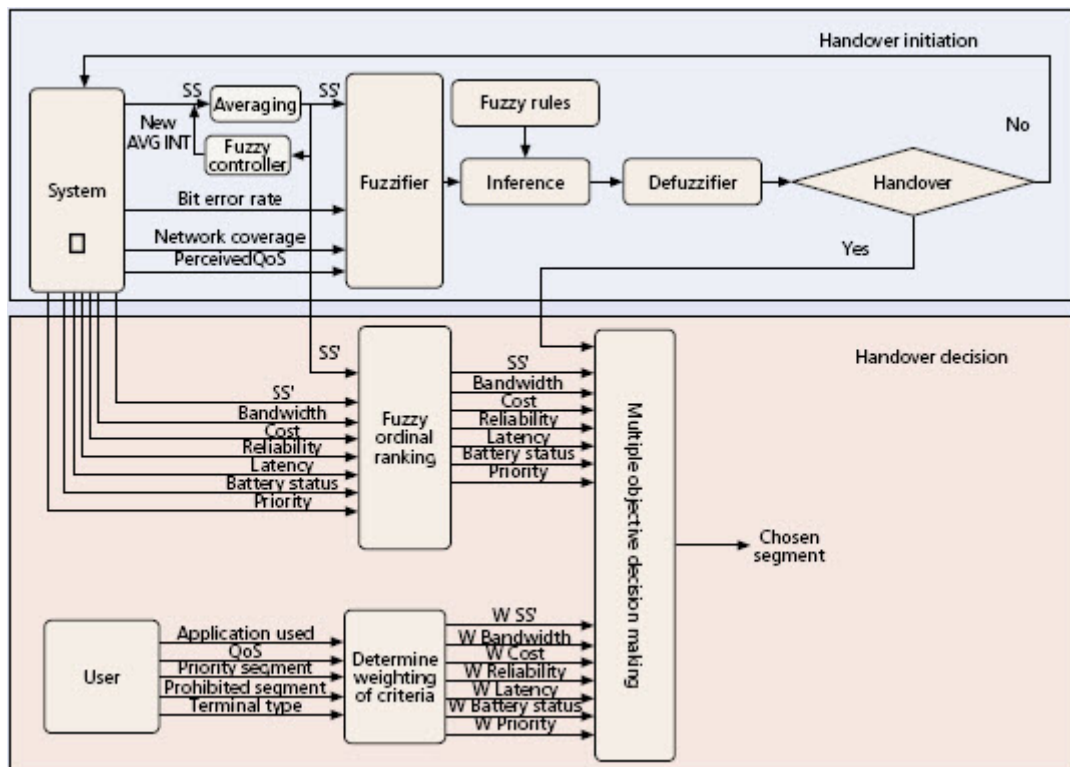
4.5.4.1 Fuzzy logic systems

Τα συστήματα fuzzy logic, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.11, αποτελούνται από ένα fuzzifier, μία μηχανή εξαγωγής αποτελέσματος, ένα defuzzifier και μια ομάδα από ασαφείς κανόνες. Αρχικά οι παράμετροι τροφοδοτούν το fuzzifier το οποίο τις μετατρέπει σε fuzzy μεταβλητές και κάθε μια λαμβάνει μια τιμή ανάμεσα στο 0 και το 1. Έπειτα οι τιμές αυτές επεξεργάζονται από τη μηχανή εξαγωγής αποτελέσματος με τη βοήθεια των fuzzy rules ώστε να εξαχθεί το αποτέλεσμα για το αν πρέπει να εκτελεστεί ένα handover ή όχι. Οι κανόνες αυτοί είναι της μορφής IF condition1 AND condition2 AND ... AND condition THEN action. Καθώς οι παράμετροι εισόδου λαμβάνουν διάφορες τιμές από το fuzzifier, η μηχανή ενδεχομένως να εξαγει περισσότερα του ενός αποτελέσματα. Έτσι το τελικό αποτέλεσμα έρχεται από το defuzzifier.



Εικόνα 4.11: Αρχιτεκτονική συστήματος fuzzy logic [22]

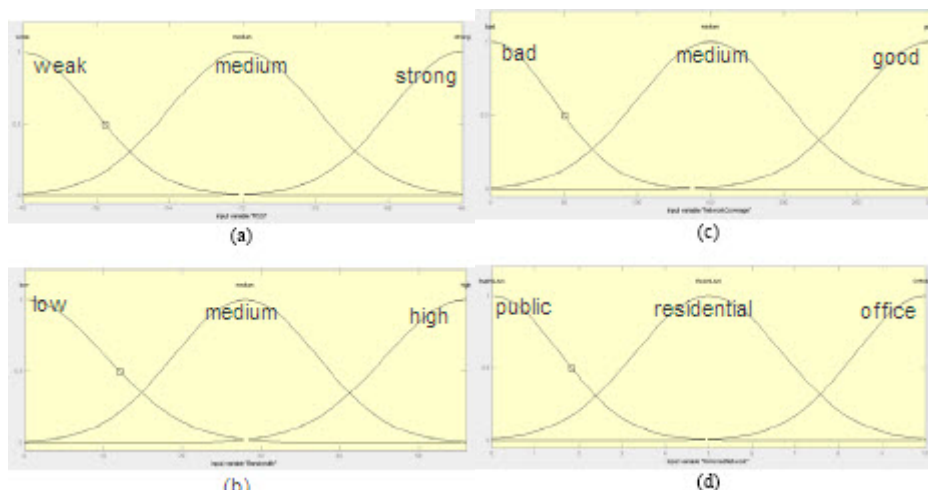
Όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.12, οι αλγόριθμοι VHO που χρησιμοποιούν fuzzy logic συστήματα αποτελούνται από 2 στάδια: α) την έναρξη του HO και β) την απόφαση του HO. Το fuzzy logic σύστημα αποφασίζει στο πρώτο στάδιο για το αν θα γίνει το handover και έπειτα λαμβάνεται η απόφαση σύμφωνα και με τις απαιτήσεις του συστήματος και του χρήστη.



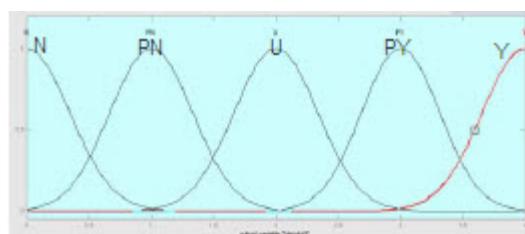
Εικόνα 4.12:Αλγόριθμος VHO με χρήση συστημάτων fuzzy logic [23]

Ένας αλγόριθμος VHO που χρησιμοποιεί το σύστημα αυτό και έχει προταθεί από τους Nkansah και Agbinya, αφορά HO ανάμεσα στα δίκτυα WWAN και WLAN[24]. Εφόσον το WWAN παρέχει μεγαλύτερη κάλυψη από το WLAN, ένας χρήστης που είναι συνδεδεμένος στο πρώτο δίκτυο, θα προσπαθήσει να μεταβεί στο δεύτερο ώστε να επιτύχει μικρότερο κόστος και υψηλότερο bandwidth. Για να εκτελεστεί ο αλγόριθμος και να επιλεγθεί τελικά το βέλτιστο δίκτυο σχετικά με τις προτιμήσεις του χρήστη, την απαιτούμενη ισχύ σήματος για την υπηρεσία, την ικανοποιητική κάλυψη δικτύου, το βέλτιστο bandwidth, το χαμηλό κόστος και μικρή καθυστέρηση, χρειάζονται δεδομένα τόσο από το χρήστη όσο και από το δίκτυο. Οι παράμετροι για τον αλγόριθμο αφορούν το δίκτυο WLAN και είναι το RSSI, το bandwidth, η κάλυψη του δικτύου και το επιθυμητό δίκτυο από το χρήστη (office, residential, public WLAN), οι οποίες κατά την είσοδο τους στο fuzzifier έχουν αριθμητικές τιμές (π.χ. το RSSI έχει μια τιμή ανάμεσα στα -78dBm και -66dBm, bandwidth από 0Mbps έως 56Mbps, η κάλυψη από 0 έως 300m). Κατόπιν κάθε παράμετρος μετατρέπεται σε μια μεταβλητή και αποκτά μια νέα τιμή ανάμεσα από 3 στάθμες (για παράδειγμα το RSSI θα λάβει τη τιμή Strong, Medium ή Weak μέσω μιας Ευρυδίκη-Φραγκίσκη Α. Καραγιάννη

συνάρτησης που αποφασίζει σε ποια στάθμη ανήκει-εικόνα 4.13). Οι μεταβλητές αυτές τροφοδοτούν τη μηχανή εξαγωγής αποτελέσματος, όπου με τη βοήθεια μιας ομάδας κανόνων εξάγεται μια ομάδα αποτελεσμάτων. Οι στάθμες για τη μεταβλητή της απόφασης λήψης ΗΟ είναι 4(Yes(Y), Probably Yes(PY), Uncertain(U), Probably No(PN), No(N)-εικόνα 4.14). Τελικά οι μεταβλητές εξόδου εισάγονται στο defuzzifier για να μετατραπούν σε μια συγκεκριμένη ποσότητα.



Εικόνα 4.13: Membership functions για a)RSSI, b)bandwidth, c)κάλυψη d)προτιμώμενο δίκτυο [24]



Εικόνα 4.14: Membership function για Handover [24]

Οι κανόνες που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση αυτή είναι 81 αφού έχουμε 4 παραμέτρους με 3 δυνατές τιμές η κάθε μία ($3^4=81$) και πρέπει να ελέγχουν όλες τις δυνατές περιπτώσεις. Κάποια ενδεικτικά παραδείγματα είναι τα παρακάτω:

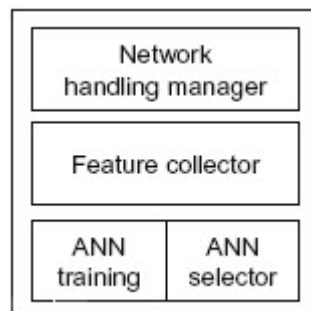
- IF RSSI=Weak AND Bandwidth=Low AND Coverage=Medium AND Preferred user network=Residential WLAN, THEN Handover=PN

- IF RSSI=Strong AND Bandwidth=High AND Coverage=Good AND Preferred user network=Office WLAN, THEN Handover=Y
- IF RSSI=Medium AND Bandwidth=Low AND Coverage=Medium AND Preferred user network=Public WLAN, THEN Handover=U

Ο αλγόριθμος για τα HO προς την αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή από WLAN σε WWAN, ακολουθεί την ίδια τεχνική σε γενικές γραμμές. Αυτό που αλλάζει είναι οι παράμετροι που παίζουν ρόλο στην απόφαση και είναι το RSSI, το bandwidth, η περιοχή κάλυψης του δικτύου και το λαμβανόμενο QoS(αναφέρονται στο WLAN δίκτυο). Αντίστοιχα προσαρμόζονται και οι κανόνες πάνω στις παραμέτρους αυτές.

4.5.4.2 Neural networks

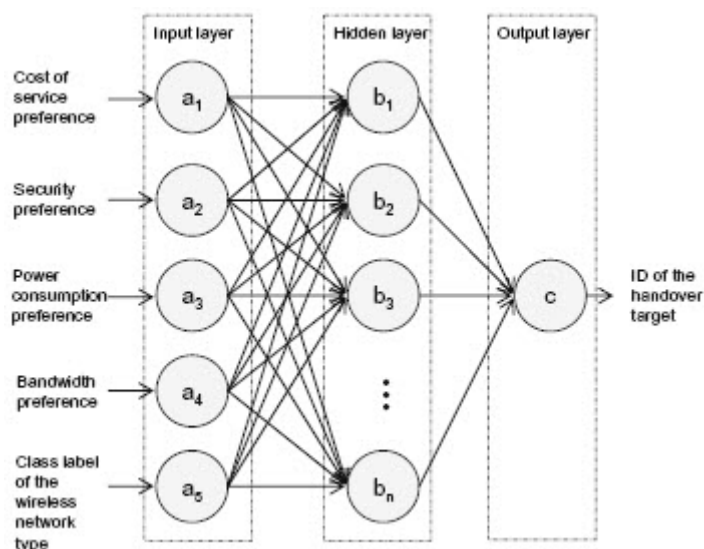
Όπως είδαμε νωρίτερα, εκτός από τα fuzzy logic συστήματα, υπάρχουν και τα neural networks τα οποία χρησιμοποιούνται από τους συνδυαστικούς αλγόριθμους, όπως για παράδειγμα ο αλγόριθμος που έχει προταθεί από τον Nasser και εφαρμόζεται ανάμεσα σε οποιαδήποτε ασύρματα ετερογενή δίκτυα. Το τερματικό πρέπει να συγκεντρώσει τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων δικτύων(όπως το κόστος χρήσης του κάθε δικτύου, την ασφάλειά του, τους ρυθμούς μετάδοσης κ.α.) και να τα στείλει σε ένα σύστημα διαχείρισης VHO, του οποίου η αρχιτεκτονική φαίνεται παρακάτω(εικόνα 4.15).



Εικόνα 4.15:Vertical handover manager [21]

Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί ένα πολυεπίπεδο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο(ANN) για να αποφασίζει ποιο είναι το καλύτερο ασύρματο δίκτυο για να γίνει το HO, σύμφωνα με τις προτιμήσεις του χρήστη. Το ANN αποτελείται

από ένα επίπεδο εισόδου, ένα κρυφό, και ένα εξόδου(εικόνα 4.16). Το κάθε ένα αποτελείται από ένα σύνολο κόμβων. Οι κόμβοι του πρώτου επιπέδου είναι τα χαρακτηριστικά του κάθε υποψήφιου δικτύου και είναι συνδεδεμένοι με όλους τους κόμβους του κρυφού επιπέδου, οι οποίοι περιέχουν συναρτήσεις ενεργοποίησης. Το τελευταίο επίπεδο περιέχει ένα κόμβο που εξάγει το αποτέλεσμα, δηλαδή το δίκτυο που τελικά θα γίνει το ΗΟ. Το ANN για να εξάγει σωστά αποτελέσματα, πρέπει πρώτα να «εκπαιδευτεί». Για το σκοπό αυτό παράγεται μια σειρά από ειδικά βάρη για τις προτιμήσεις του χρήστη. Οι κόμβοι του κρυφού επιπέδου πολλαπλασιάζουν κάθε είσοδό τους με το αντίστοιχο βάρος και υπολογίζουν το συνολικό άθροισμα των γινομένων. Το άθροισμα αυτό τροφοδοτείται ως όρισμα στην συνάρτηση ενεργοποίησης, την οποία υλοποιεί εσωτερικά κάθε κόμβος.



Εικόνα 4.16:Πολυεπίπεδο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο [21]

4.5.4.3 Αλγόριθμοι πολλαπλών χαρακτηριστικών(MAD)

Όπως είδαμε νωρίτερα, η επιλογή του δικτύου στο οποίο θα γίνει το VHO μπορεί να εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Πέρα όμως από τα συστήματα fuzzy logic και τα νευρωνικά δίκτυα, που διαχειρίζονται τις περίπλοκες περιπτώσεις, υπάρχουν και άλλοι αλγόριθμοι όπου η απόφαση παίρνεται βάσει πολλαπλών χαρακτηριστικών(Multiple Attribute Decision Making-MADM) και η επιλογή γίνεται ανάμεσα από ένα σύνολο εναλλακτικών. Οι πιο γνωστοί αλγόριθμοι MADM είναι οι SAW(Simple Additive Weighting),

TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), MEW(Multiplicative Exponent Weighting), AHP(Analytic Hierarchy Process) και GRA(Grey Relational Analysis).

Ο αλγόριθμος SAW υπολογίζει τη συνολική βαθμολογία κάθε υποψήφιου δικτύου η οποία υπολογίζεται από το σταθμισμένο άθροισμα όλων των τιμών των χαρακτηριστικών που παίζουν ρόλο στην εκάστοτε επιλογή. Πιο συγκεκριμένα, η βαθμολογία του δικτύου i προκύπτει αθροίζοντας τις κανονικοποιημένες τιμές κάθε χαρακτηριστικού r_{ij} πολλαπλασιασμένες με το συντελεστή βαρύτητας w_j του χαρακτηριστικού j . Το δίκτυο που τελικά επιλέγεται είναι αυτό με τη μεγαλύτερη βαθμολογία, δηλαδή:

$$A_{SAW}^* = \arg \max_{i \in M} \sum_{j=1}^N w_j r_{ij}$$

όπου N είναι το πλήθος των παραμέτρων και M το πλήθος των υποψήφιων δικτύων.

Ο αλγόριθμος TOPSIS βασίζεται στην εξής ιδέα: το επιλεγμένο δίκτυο πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερο προς την ιδανική λύση και να απέχει όσο γίνεται περισσότερο από την χειρότερη λύση. Η ιδανική λύση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις καλύτερες τιμές που μπορεί να λάβει κάθε παράμετρος. Έστω ότι c_i^* είναι ο βαθμός ομοιότητας του κάθε υποψήφιου δικτύου i προς την ιδανική λύση. Επομένως το δίκτυο που τελικά επιλέγεται είναι το:

$$A_{TOP}^* = \arg \max_{i \in M} c_i^*$$

Στον αλγόριθμο MEW υπολογίζεται αρχικά η βαθμολογία του κάθε υποψήφιου δικτύου i ως το σταθμισμένο γινόμενο των χαρακτηριστικών:

$$S_i = \prod_{j=1}^N x_{ij}^{w_j}$$

όπου x_{ij} είναι η τιμή του χαρακτηριστικού j στο δίκτυο i και w_j ο αντίστοιχος συντελεστής βαρύτητας. Η βαθμολογία αυτή συγκρίνεται με αυτή του ιδανικού

δικτύου και για κάθε δίκτυο υπολογίζεται ένας δείκτης αξίας R_i . Τελικά, το δίκτυο που επιλέγεται είναι το:

$$A_{MEW}^* = \arg \max_{i \in M} R_i$$

Συνήθως οι αλγόριθμοι AHP και GRA συνδυάζονται. Αρχικά η μέθοδος AHP αναλύει το πρόβλημα επιλογής δικτύου σε υποπροβλήματα και υπολογίζει ένα συντελεστή βαρύτητας για καθένα από αυτά. Έπειτα χρησιμοποιείται η τεχνική GRA για να κατατάξει τα υποψήφια δίκτυα και να διαλέξει αυτό με την υψηλότερη βαθμολογία. Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο στάδιο είναι ο διαχωρισμός του προβλήματος σε άλλα μικρότερα με βάση διάφορα κριτήρια. Στην κορυφή της ιεραρχίας είναι ο γενικός στόχος, οι ενδιάμεσοι κόμβοι είναι οι παράγοντες που παίζουν ρόλο στη λήψη της απόφασης, δηλαδή τα διάφορα κριτήρια, και τέλος στο κάτω μέρος της ιεραρχίας βρίσκονται οι διάφορες εναλλακτικές λύσεις του προβλήματος. Στο δεύτερο στάδιο γίνεται η αξιολόγηση, όπου κάθε ένας παράγοντας συγκρίνεται με τους υπόλοιπους, αρκεί να ανήκουν στον ίδιο κόμβο του προηγούμενου επιπέδου. Τα αποτελέσματα αυτά αναπαρίστανται σε τετραγωνικό πίνακα. Η τιμή του κάθε στοιχείου του πίνακα m_{ij} δείχνει ανάμεσα στον i και τον j παράγοντα ποιος είναι πιο σημαντικός και σε τι βαθμό. Η διαβάθμιση είναι στη κλίμακα από το 1 έως το 9. Η τιμή των στοιχείων m_{ji} είναι η αντίστροφη του m_{ij} , όπως φαίνεται και στο παρακάτω παράδειγμα.

	Απόδοση	Ασφάλεια	Κόστος
Απόδοση	1	5	7
Ασφάλεια	1/5	1	3
Κόστος	1/7	1/3	1

Παράδειγμα πίνακα AHP

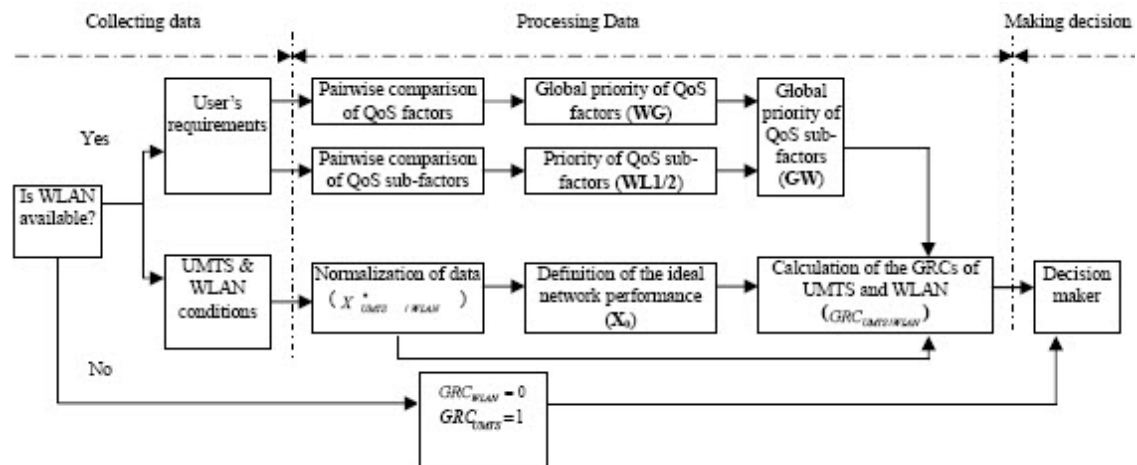
Ύστερα ο πίνακας αυτός κανονικοποιείται διαιρώντας κάθε στοιχείο του με το άθροισμα των στοιχείων της αντίστοιχης στήλης.

	Απόδοση	Ασφάλεια	Κόστος
Απόδοση	0.75	0.79	0.63
Ασφάλεια	0.15	0.16	0.27
Κόστος	0.1	0.05	0.09

Κανονικοποιημένος πίνακας A_{norm}

Τελικά ο μέσος όρος κάθε γραμμής δείχνει το βαθμό προτεραιότητας GW για κάθε παράγοντα i . Στο παραπάνω παράδειγμα ο βαθμός αυτός για τους 3 παράγοντες(απόδοση, ασφάλεια, κόστος) είναι αντίστοιχα 0.72 , 0.19 , 0.08.

Ύστερα, με τον αλγόριθμο GRA κανονικοποιούνται τα δεδομένα των υποψήφιων δικτύων, και στη συνέχεια υπολογίζεται ένας συντελεστής συσχέτισης(Grey Relational Coefficient-GRC). Ο GRC εκφράζει το βαθμό ομοιότητας του κάθε δικτύου με ένα υποθετικό ιδανικό δίκτυο για το συγκεκριμένο QoS και τους βαθμούς προτεραιότητας GW που έχουν υπολογιστεί από το AHP. Το δίκτυο τελικά με το μεγαλύτερο GRC είναι αυτό που επιλέγεται. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα μοντέλο επιλογής δικτύου που βασίζεται σε αυτές τις δύο μεθόδους.



Εικόνα 4.17:Μοντέλο επιλογής δικτύου(WLAN/UMTS) με μεθόδους AHP-GRA [25]

Ο μηχανισμός αυτός αναφέρεται σε επιλογή για VHO ανάμεσα σε δίκτυα UMTS και WLAN και αποτελείται από τρία στάδια. Το πρώτο είναι η συλλογή των δεδομένων τόσο για τις απαιτήσεις του χρήστη όσο και για την κατάσταση

των δύο δικτύων. Στο δεύτερο στάδιο γίνεται η επεξεργασία και στο τελικό λαμβάνεται η απόφαση για το εάν θα γίνει τελικά το handover από το ένα δίκτυο στο άλλο.

Σύγκριση MAD αλγορίθμων

Μία σύγκριση έγινε ανάμεσα στους αλγορίθμους SAW, TOPSIS, MEW και GRA με τις εξής παραμέτρους: BER, Delay, Jitter, Bandwidth[26]. Η μέθοδος AHP χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό των συντελεστών βαρύτητας κάθε παραμέτρου. Εξετάστηκε η απόδοση των αλγορίθμων για τέσσερις κατηγορίες κίνησης δεδομένων: conversational, streaming, interactive, background. Στην εικόνα 4.18 φαίνονται οι συντελεστές βαρύτητας, όπως έχουν υπολογιστεί από την AHP, ανά κατηγορία κίνησης και παράμετρο.

Traffic Class	BER	Delay	Jitter	Bandwidth
Conversational	0.04998	0.45002	0.45002	0.04998
Streaming	0.03737	0.11380	0.42441	0.42441
Interactive	0.63593	0.16051	0.04304	0.16051
Background	0.66932	0.05546	0.05546	0.21976

Εικόνα 4.18: Συντελεστές βαρύτητας ανά κατηγορία κίνησης [26]

Στη σύγκριση αυτή εξετάστηκε το μέσο bandwidth που χρησιμοποιείται από κάθε μια κατηγορία κίνησης για κάθε ένα αλγόριθμο ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι δύο πρώτες κατηγορίες (conversational-streaming) ανεξάρτητα από τον αλγόριθμο που χρησιμοποιούν, χρειάζονται σχεδόν το ίδιο bandwidth. Όμως στις άλλες δύο κατηγορίες ο αλγόριθμος GRA παρέχει υψηλότερο bandwidth από ότι οι άλλοι αλγόριθμοι. Συγκεκριμένα, οι τιμές του bandwidth για τον GRA είναι στη κλίμακα των 5.5 με 6Mbps ενώ για τους υπόλοιπους αλγορίθμους είναι κατά μέσο όρο στα 5Mbps.

Αντίστοιχα, η μέση καθυστέρηση που αντιμετωπίζουν οι 2 πρώτες κατηγορίες δεν επηρεάζεται από τον αλγόριθμο που θα χρησιμοποιηθεί, ενώ οι άλλες δύο (interactive-background) παρουσιάζουν μικρότερη καθυστέρηση όταν χρησιμοποιείται ο GRA.

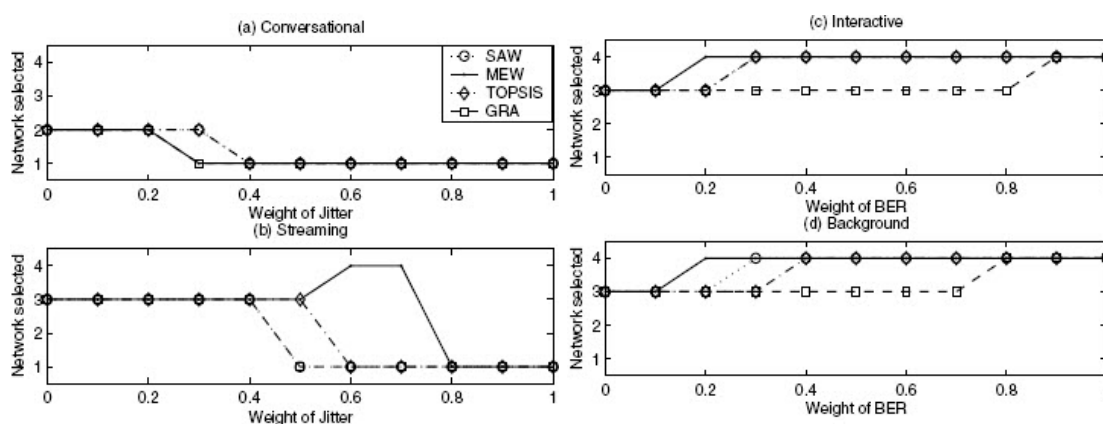
Ανάπτυξη και αποτίμηση μηχανισμού για την επιλογή δικτύου πρόσβασης

Ακόμα παρουσιάζεται η αντίδραση των αλγορίθμων κατά τη μεταβολή ενός συντελεστή βαρύτητας. Έστω ότι υπάρχουν τέσσερα υποψήφια δίκτυα με τις παρακάτω παραμέτρους(εικόνα 4.19).

No.	Bandwidth (Kbps)	Delay (ms)	Jitter (ms)	BER
1	1000	15	5	10^{-4}
2	300	10	10	10^{-4}
3	25000	25	15	10^{-5}
4	11000	35	10	10^{-6}

Εικόνα 4.19:Τιμές παραμέτρων για 4 υποψήφια δίκτυα [26]

Στα παρακάτω διαγράμματα(a-b) φαίνεται ότι καθώς η βαρύτητα του jitter αυξάνεται, και οι τέσσερις αλγόριθμοι τελικά επιλέγουν το πρώτο δίκτυο για handover που έχει τη χαμηλότερη τιμή για το jitter. Αντίστοιχα, τα διαγράμματα c και d δείχνουν ότι όταν η βαρύτητα του BER αυξάνεται, επιλέγεται τελικά το τέταρτο δίκτυο που έχει τη χαμηλότερη τιμή.



Εικόνα 4.20: Επιλογή δικτύου για μεταβαλλόμενους συντελεστές βαρύτητας (αριστερά jitter-δεξιά BER) [26]

4.5.4.4 Ανθρωποκεντρικός αλγόριθμος για non-real time υπηρεσίες (User-centric VHO algorithm)

Υπάρχουν περιπτώσεις που οι χρήστες θέλουν να διαλέγουν αυτοί με ποιο δίκτυο θα συνδέονται κάθε φορά ώστε να ικανοποιούν όσο το δυνατόν καλύτερα τις προτιμήσεις τους. Σε γενικές γραμμές αυτό που επιθυμούν οι χρήστες είναι η μετάδοση των δεδομένων να γίνεται μέσα σε ένα επιθυμητό χρόνο με το μικρότερο κόστος. Όμως, ανάλογα με το είδος της εφαρμογής

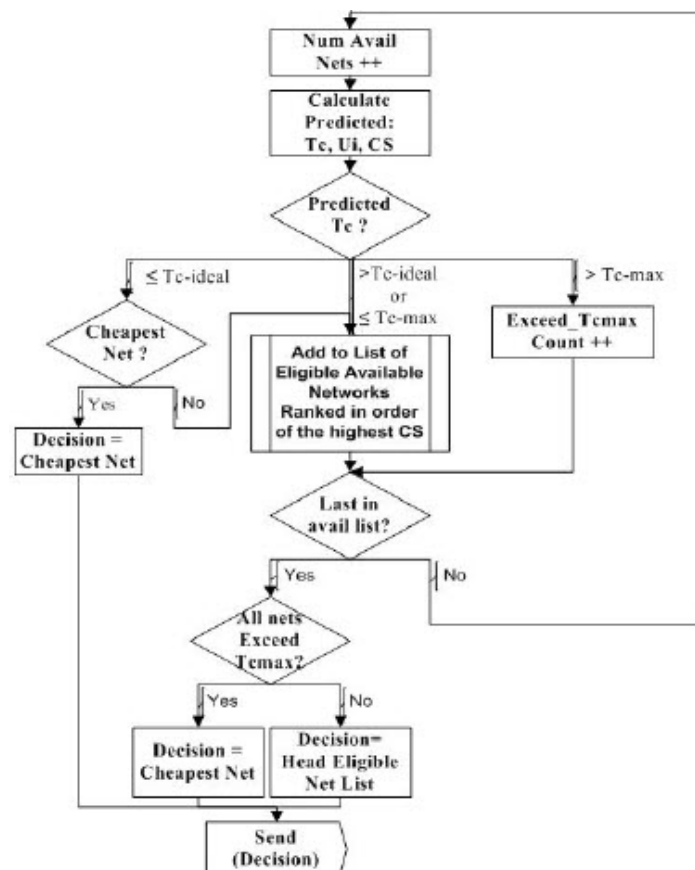
που εκτελούν αλλάζουν και οι απαιτήσεις που έχουν για το χρόνο μετάδοσης. Έτσι, για τις non-real time υπηρεσίες, αυτό που παίζει κυρίως ρόλο στην επιλογή είναι το χαμηλό κόστος μέσα βέβαια σε λογικά πλαίσια καθυστερήσεων. Στα ασύρματα δίκτυα όμως οι ρυθμοί μετάδοσης δεν έχουν ποτέ εγγυημένα σταθερές τιμές λόγω της αναξιοπιστίας των ραδιοζεύξεων. Επομένως οι χρήστες θα πρέπει να προβλέψουν τους ρυθμούς μετάδοσης του κάθε δικτύου και η επιλογή να γίνει με βάση τις προβλέψεις αυτές. Πρέπει βέβαια τα τερματικά να προσαρμόζουν διαρκώς τις επιλογές τους σύμφωνα με τις αλλαγές των συνθηκών των υποψήφιων δικτύων ώστε να διατηρούν τη ποιότητα, την καθυστέρηση και το κόστος των υπηρεσιών σε αποδεκτά επίπεδα σύμφωνα με τις προτιμήσεις των χρηστών. Ο χρόνος ολοκλήρωσης μεταφοράς των δεδομένων των χρηστών εξαρτάται από το ρυθμό μετάδοσης του κάθε δικτύου. Επομένως το κόστος που καλείται να πληρώσει ο χρήστης για τη χρήση μιας υπηρεσίας εξαρτάται από τον όγκο των δεδομένων που θα μεταδώσει και το χρόνο που θα χρειαστεί. Αν το ποσό που πρέπει να πληρώσει είναι μικρότερο από το ποσό που αρχικά ήταν διατεθειμένος να δώσει, τότε έχει εξοικονομήσει χρήματα. Η χρησιμότητα που ωφελείται ο χρήστης επειδή επιτυγχάνει αυτή τη διαφορά χρημάτων λέγεται πλεόνασμα του καταναλωτή (consumer surplus-CS). Κάθε δίκτυο έχει μια πολιτική κοστολόγησης (για παράδειγμα χρέωση με ένα συγκεκριμένο ποσό για το κάθε μεταδιδόμενο KB ή χρέωση ανάλογα με τη συμφόρηση του δικτύου κ.α.). Ο αλγόριθμος που θα αναλύσουμε έχει σχεδιαστεί με την υπόθεση ότι οι πάροχοι των δικτύων χρησιμοποιούν την πρώτη πολιτική κοστολόγησης [27].

Τα τερματικά των χρηστών δημιουργούν μια λίστα με τα διαθέσιμα δίκτυα που υπάρχουν και κατόπιν πρέπει να προβλέψουν τους αντίστοιχους ρυθμούς μετάδοσης με τη βοήθεια των οποίων υπολογίζουν τον προβλεπόμενο χρόνο ολοκλήρωσης (T_c) για κάθε ένα δίκτυο. Παράλληλα υπολογίζεται και ο μέγιστος χρόνος που ο χρήστης είναι διατεθειμένος να περιμένει μέχρι να ολοκληρωθεί η μετάδοση. Ο στόχος του χρήστη είναι να μεγιστοποιήσει το CS του αρκεί η μετάδοση να γίνεται εντός ενός μεγίστου χρονικού διαστήματος που έχει καθορίσει ο ίδιος. Τέλος υπολογίζεται και η προβλεπόμενη χρηστικότητα (U_i) του χρήστη, η οποία είναι μια συνάρτηση που απεικονίζει

την ικανοποίηση του χρήστη από τις υπηρεσίες που λαμβάνει. Η χρησιμότητα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το είδος της υπηρεσίας και το μέγιστο ανεκτό επίπεδο καθυστέρησης, την προτεραιότητα των δεδομένων κ.α. και φθίνει καθώς ο χρόνος ολοκλήρωσης αυξάνεται και πλησιάζει το μέγιστο αποδεκτό χρόνο. Επομένως για κάθε είδος υπηρεσίας και για κάθε μια περίπτωση ο χρήστης έχει και μια διαφορετική συνάρτηση χρησιμότητας. Με βάση τα στοιχεία αυτά και τις χρεώσεις του κάθε δικτύου (C_i), το τερματικό υπολογίζει το CS του χρήστη για κάθε ένα ξεχωριστά ως εξής:

$$CS = U_i(T_C) - C_i$$

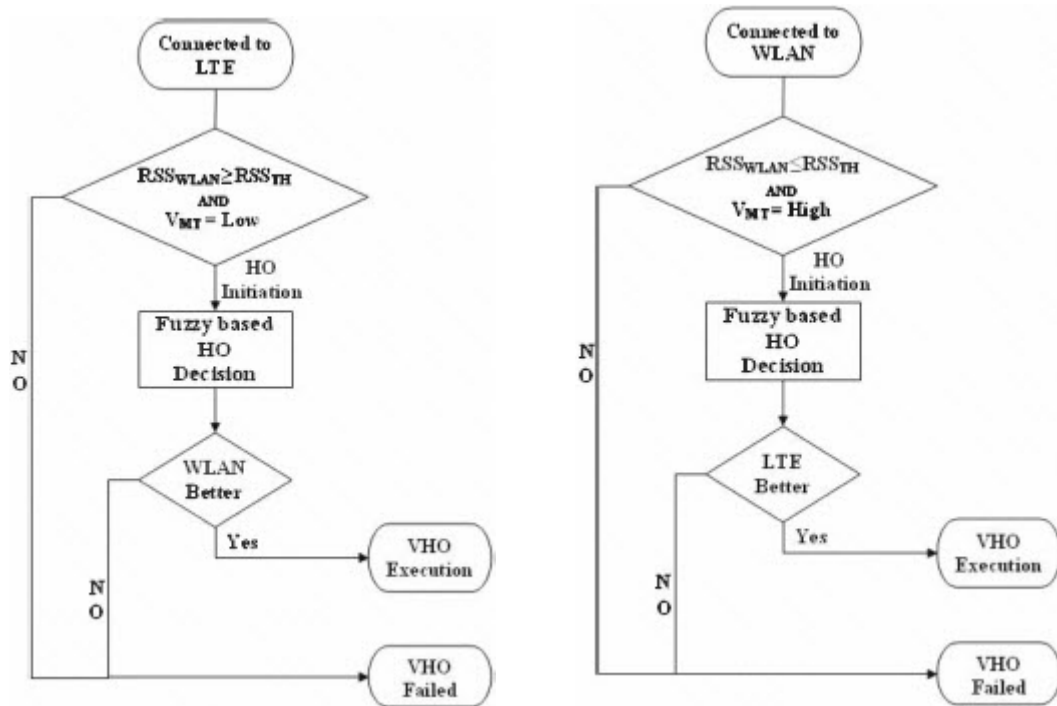
Το handover τελικά γίνεται στο δίκτυο που προσφέρει το μεγαλύτερο CS αρκεί το T_C να μη ξεπερνά το T_{Cmax} . Τα βήματα του αλγορίθμου που ακολουθούνται για την επιλογή του δικτύου φαίνονται στην εικόνα 4.21.



Εικόνα 4.21: User-centric algorithm [27]

4.5.4.5 Αλγόριθμοι VHO για LTE και WLAN

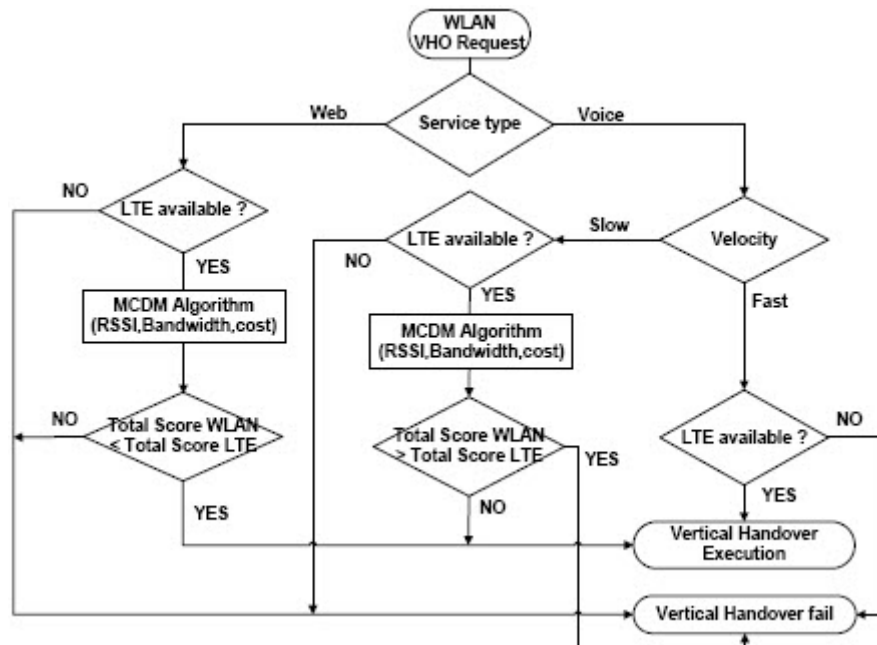
Καθώς η τεχνολογία έχει προχωρήσει στα συστήματα 4^{ης} γενιάς, έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι που να υποστηρίζουν handovers ανάμεσα στο LTE και το WLAN. Ένας αλγόριθμος για αυτές τις τεχνολογίες έχει προταθεί από τους Aziz, Rizvi και Saad, ο οποίος βασίζεται στα fuzzy logic συστήματα καθώς χρησιμοποιεί πολλαπλές παραμέτρους[28]. Ο μηχανισμός που προτείνουν αποτελείται από 3 στάδια, πρώτα γίνεται η αρχικοποίηση του HO, κατόπιν λαμβάνεται η απόφαση εάν τελικά πρέπει να γίνει το handover και εφόσον η απάντηση είναι θετική στο τέλος γίνεται η εκτέλεση. Στο πρώτο στάδιο, τα κριτήρια που παίζουν ρόλο στην αρχικοποίηση του HO είναι η ταχύτητα με την οποία κινείται ο χρήστης και το RSS. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση που το τερματικό είναι συνδεδεμένο στο LTE, το οποίο προσφέρει μεγάλη κάλυψη αλλά μικρό bandwidth με υψηλό κόστος, για να ξεκινήσει η διαδικασία του HO πρέπει να βρεθεί κάποιο δίκτυο WLAN διαθέσιμο. Αν το RSS του δικτύου αυτού είναι μεγαλύτερο του κατωφλίου και ακόμα αν η ταχύτητα του τερματικού είναι μικρή, τότε τελικά αρχικοποιείται το HO. Αντίστοιχα, όταν ο χρήστης είναι συνδεδεμένος σε ένα WLAN, αν κινείται με μεγάλη ταχύτητα και το RSS του δικτύου αυτού πέσει κάτω από μια κατώτατη τιμή, τότε ξεκινά η διαδικασία του HO. Κατόπιν, ξεκινά και στις 2 περιπτώσεις το δεύτερο στάδιο του μηχανισμού. Η απόφαση για το αν θα πρέπει τελικά να γίνει το HO λαμβάνεται με τη βοήθεια ενός fuzzy logic συστήματος το οποίο αποφασίζει στην πρώτη περίπτωση αν το WLAN είναι καλύτερο δίκτυο για το χρήστη και στη δεύτερη αν το LTE είναι καλύτερο. Το FL σύστημα παίρνει ως είσοδο τις εξής παραμέτρους: το εύρος ζώνης, το SNR, το βαθμό συμφόρησης του δικτύου και την αυτονομία της μπαταρίας του κινητού. Ο τρόπος που λειτουργεί το σύστημα αυτό και εξάγει το αποτέλεσμα αναλύθηκε νωρίτερα. Το τελευταίο στάδιο, υλοποιείται χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο Proxy Mobile IPv6.



Εικόνα 4.22:Αλγόριθμος VHO από δίκτυο LTE σε WLAN και αντίστροφα [28]

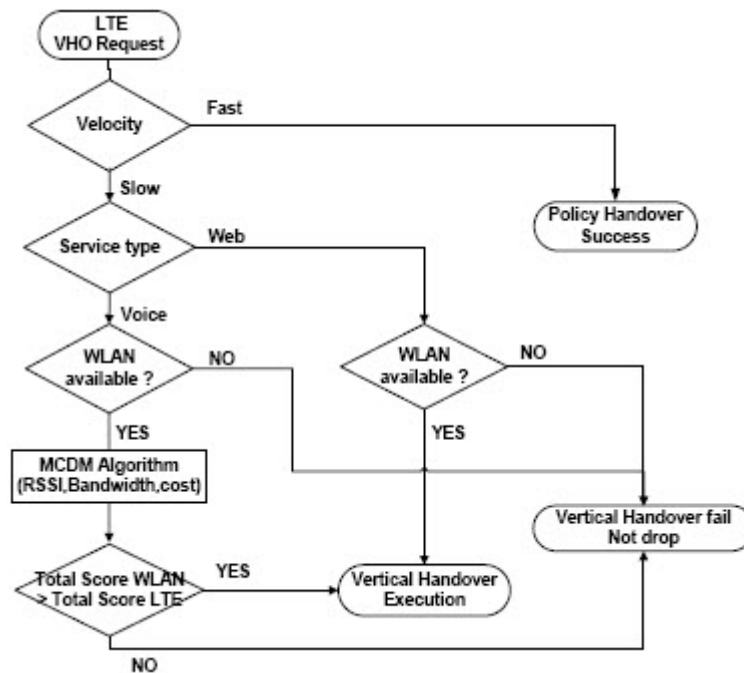
Επίσης έχει προταθεί και άλλος ένας αλγόριθμος για VHO ανάμεσα σε αυτά τα δύο δίκτυα, ο οποίος χρησιμοποιεί και αυτός πολλαπλά κριτήρια[29]. Ο αλγόριθμος αυτός βασίζει την επιλογή του δικτύου σε συγκεκριμένη στρατηγική όταν αυτό είναι δυνατό, δηλαδή όταν η απόφαση μπορεί να ληφθεί βάσει του είδους της υπηρεσίας που εκτελείται από το κινητό και από τη ταχύτητά του, ενώ όταν η επιλογή είναι ακαθόριστη, η απόφαση παίρνεται με τη βοήθεια κάποιου αλγορίθμου MADM που αναλύσαμε νωρίτερα(επίσης λέγονται και MCDM-Multiple Criteria Decision Making). Σε αντίθεση με τον προηγούμενο αλγόριθμο, τώρα η στρατηγική που ακολουθείται για VHO από δίκτυο WLAN σε LTE είναι διαφορετική από ότι από LTE σε WLAN. Στην πρώτη περίπτωση, όπου το κινητό είναι συνδεδεμένο με το WLAN και έχει εκδηλωθεί αίτημα για HO, το πρώτο πράγμα που ελέγχεται είναι αν η υπηρεσία που εκτελείται είναι μεταφορά δεδομένων ή υπηρεσία φωνής. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.23, για τις περιπτώσεις υπηρεσιών φωνής, αν η ταχύτητα του κινητού είναι μεγάλη τότε το VHO προς το δίκτυο LTE γίνεται εφόσον έχει διαθέσιμους πόρους για την υπηρεσία αυτή, αλλιώς αποτυγχάνει. Όταν η ταχύτητα είναι χαμηλή ή όταν η υπηρεσία είναι μεταφορά δεδομένων, τότε ελέγχεται αν είναι διαθέσιμο το LTE, και την απόφαση για το

αν τελικά θα γίνει το VHO την παίρνει ένας αλγόριθμος MADM με βάση διάφορα άλλα κριτήρια όπως το RSS, το κόστος της υπηρεσίας και το διαθέσιμο bandwidth.



Εικόνα 4.23: Αλγόριθμος VHO από δίκτυο WLAN σε LTE [29]

Στην δεύτερη περίπτωση, που το κινητό είναι συνδεδεμένο αρχικά στο LTE, πρώτα εξετάζεται η ταχύτητά του. Όταν κινείται γρήγορα παραμένει στο LTE που έχει μεγαλύτερη κάλυψη για να αποφευχθούν τα περιττά HO από το ένα δίκτυο στο άλλο. Όταν η ταχύτητα είναι χαμηλή και το κινητό εκτελεί μεταφορά δεδομένων, αν το WLAN είναι διαθέσιμο τότε εκτελείται το VHO προς το δίκτυο αυτό καθώς έχει χαμηλότερο κόστος για το χρήστη και προσφέρει μεγαλύτερο bandwidth που είναι χρήσιμο για μεγάλο όγκο δεδομένων. Για τις υπηρεσίες φωνής η απόφαση λαμβάνεται όπως αναφέρθηκε και παραπάνω από ένα αλγόριθμο MADM. Τα βήματα του αλγορίθμου φαίνονται και στην εικόνα 4.24.



Εικόνα 4.24:Αλγόριθμος VHO από δίκτυο LTE σε WLAN [29]

Ο αλγόριθμος αυτός σε σχέση με τον παραδοσιακό RSSI-based έχει τρεις φορές μεγαλύτερη ρυθμαπόδοση συστήματος ανεξάρτητα από το είδος των υπηρεσιών και χαμηλότερο κόστος, το οποίο μειώνεται όσο αυξάνονται οι χρήστες που κινούνται με μεγάλες ταχύτητες. Επίσης το ποσοστό επιτυχίας των handovers είναι αυξημένο σε σχέση με τους RSSI-based τόσο στην περίπτωση που το HO γίνεται από το LTE στο WLAN όσο και στην αντίθετη περίπτωση όπου το ποσοστό αυτό μπορεί να είναι και τέσσερις φορές μεγαλύτερο.

4.5.4.6 Αλγόριθμοι VHO για δίκτυα LTE και femtocells

Η εμφάνιση των femtocells, η οποία σε συνδυασμό με τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς ικανοποιούν τις ανάγκες για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και αυξάνουν τις περιοχές κάλυψης, οδήγησε στην ανάγκη ανάπτυξης αλγορίθμων για VHO μεταξύ αυτών και του δικτύου LTE. Τα πιθανά σενάρια για handover είναι τρία: το hand-in, το hand-out και το inter FAP (εικόνα 4.25). Το hand-in είναι το vertical handover όπου το τερματικό αλλάζει σύνδεση από το δίκτυο LTE σε σημείο πρόσβασης του femtocell(FAP ή αλλιώς HeNB). Το hand-out είναι το VHO από femtocell προς LTE, και τέλος το inter FAP είναι το

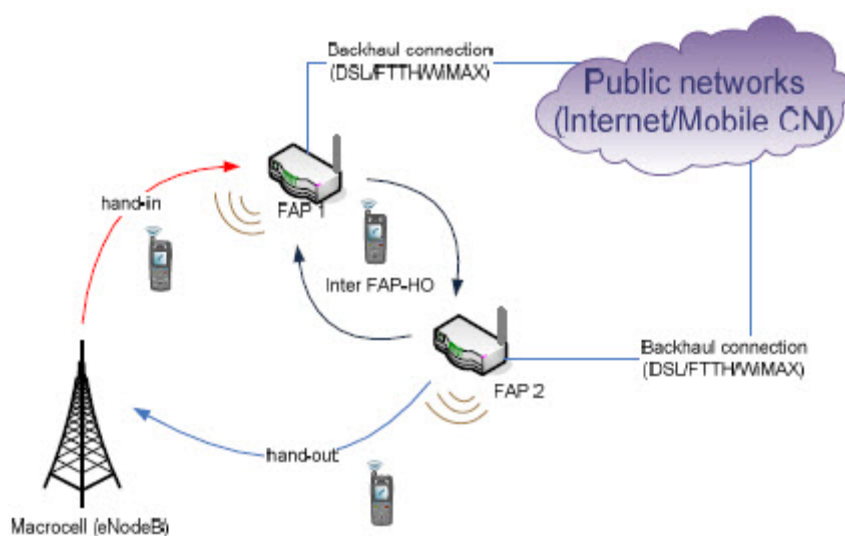
HO από ένα HeNB σε ένα άλλο. Παρακάτω θα ασχοληθούμε με τις δύο πρώτες περιπτώσεις.

Hand-in VHO

Τα hand-in VHOs είναι από τα πιο ενδιαφέροντα και περίπλοκα καθώς υπάρχει μεγάλο πλήθος υποψήφιων HeNBs και είναι πιο δύσκολο να επιλεγεί το καταλληλότερο με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη καθυστέρηση κατά το handover. Υπάρχουν δύο τρόποι πρόσβασης στα FAP που δυσκολεύουν περισσότερο την επιλογή, η κλειστού-τύπου πρόσβαση και η ανοιχτού-τύπου. Στην πρώτη περίπτωση, οι χρήστες πρέπει να είναι μέλη του CSG (Closed Subscriber Group) και επομένως έχουν μόνο αυτοί πρόσβαση στις αντίστοιχες κυψέλες. Αντίθετα στην δεύτερη περίπτωση μπορεί οποιοσδήποτε χρήστης να συνδεθεί σε όλα τα HeNBs. Ακόμα την επιλογή δυσκολεύουν οι παρεμβολές που δέχονται καθώς και η ταχύτητα των τερματικών λόγω της μικρής κάλυψης που προσφέρουν με αποτέλεσμα να γίνονται πολλαπλά και συχνά HOs.

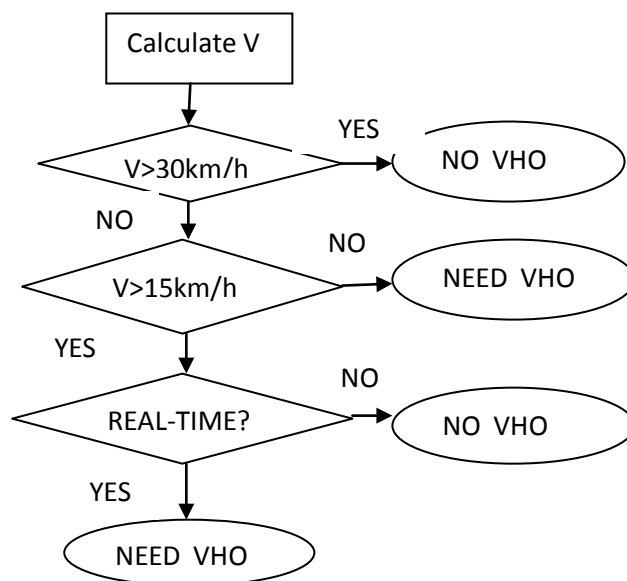
Hand-out VHO

Η αντίθετη διαδικασία VHO είναι πιο απλουστευμένη καθώς το τερματικό δεν έχει πολλές επιλογές εύρεσης κυψέλης. Συνήθως, όταν το λαμβανόμενο RSSI του eNB είναι μεγαλύτερο από αυτό του FAP το τερματικό συνδέεται στο LTE.



Εικόνα 4.25: Τύποι handover σε δίκτυο femtocell [30]

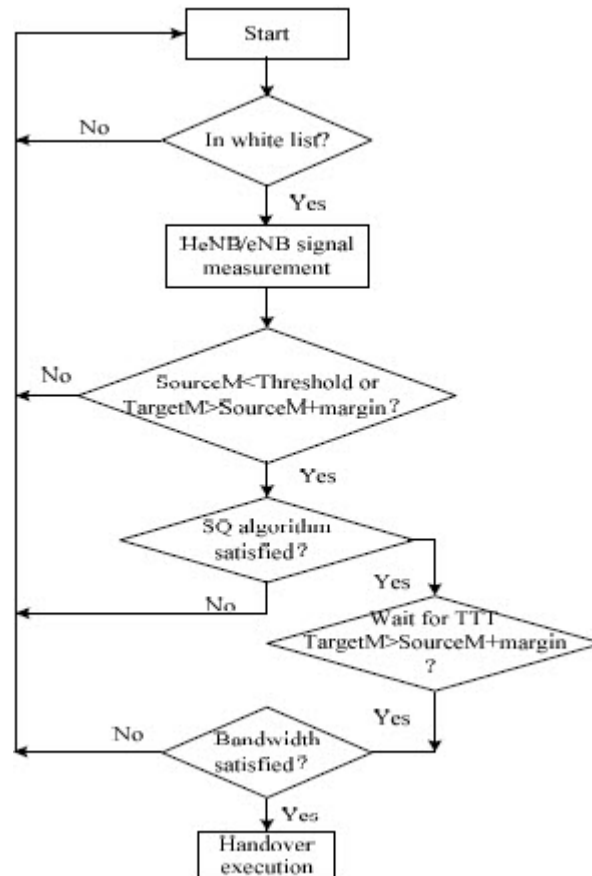
Η κίνηση των χρηστών μέσα στο δίκτυο των femtocell, και κυρίως όταν η ταχύτητά τους είναι υψηλή οδηγεί στην εφαρμογή άσκοπων HO μειώνοντας έτσι τη χωρητικότητα του συστήματος και τη γενικότερη απόδοσή του. Ένας απ' τους αλγορίθμους που έχουν προταθεί βασίζεται κυρίως στην ταχύτητα του τερματικού και στην ποιότητα των υπηρεσιών και σκοπεύει στην μείωση των περιπτώσεων VHOs αλλά και του συνολικού αριθμού[31]. Ορίζονται τρεις κατηγορίες κίνησης, η χαμηλή κινητικότητα (από 0 έως 15km/h), η μεσαία κινητικότητα (από 15 έως 30km/h) και η υψηλή (πάνω από 30km/h). Επίσης σημαντικός παράγοντας είναι το QoS, επομένως όταν οι χρήστες τρέχουν real-time εφαρμογές τα περιθώρια καθυστερήσεων και σφαλμάτων είναι μικρά σε αντίθεση με τις non-real-time εφαρμογές. Επομένως ο αλγόριθμος ταχύτητας και ποιότητας υπηρεσιών (SQ Algorithm), όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα ροής(εικόνα 4.26), για τα τερματικά που κινούνται με μεγάλη ταχύτητα δεν υλοποιεί VHO, ενώ στις μικρές ταχύτητες κρίνει ότι χρειάζεται το HO. Στη μεσαία κινητικότητα η ανάγκη για HO εξαρτάται από το τύπο της εφαρμογής.



Εικόνα 4.26: Αλγόριθμος SQ

Ο αλγόριθμος SQ αποφασίζει για το εάν χρειάζεται HO ή όχι με βάση τα κύρια κριτήρια. Η τελική απόφαση για την εφαρμογή ή όχι του HO λαμβάνεται και από ένα πλήθος κριτηρίων, όπως τη μέτρηση του λαμβανόμενου σήματος, τη μέγιστη χωρητικότητα των δικτύων και το φόρτο της κάθε κυψέλης την συγκεκριμένη στιγμή. Επομένως υπολογίζονται αρχικά οι ισχύς των σημάτων Ευρυδίκη-Φραγκίσκη Α. Καραγιάννη

και μετά επιλέγεται το καταλληλότερο δίκτυο με τη βοήθεια μια μεταβλητής M , η οποία υπολογίζεται βάσει της ισχύος, του αριθμού των χρηστών που είναι συνδεδεμένοι στη κυψέλη, της μέγιστης χωρητικότητας κ.α. Ύστερα, αν και ο αλγόριθμος SQ συμφωνεί για την αναγκαιότητα ενός VHO, επανεξετάζεται μετά από ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα η μεταβλητή M και για τα δύο δίκτυα. Αν το υποψήφιο δίκτυο εξακολουθεί να είναι καταλληλότερο και υπάρχει και διαθέσιμο bandwidth, τότε εκτελείται τελικά το VHO (εικόνα 4.27).



Εικόνα 4.27: Αλγόριθμος VHO από δίκτυο LTE σε femtocell με χρήση του αλγορίθμου SQ [31]

Ο παραπάνω αλγόριθμος στοχεύει στη μείωση των περιπτώσεων VHOs, όμως έχει ένα μειονέκτημα: τα όρια των ταχυτήτων στις τρεις κατηγορίες κινητικότητας φαίνεται να μην είναι πολύ ρεαλιστικά (0-15km/h, 15-30km/h, >30km/h) καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις τα femtocells βρίσκονται εντός μεγάλων κτιρίων όπου οι ταχύτητες με τις οποίες κινούνται οι χρήστες είναι αρκετά μικρότερες (περίπου 0-10km/h).

Ένας άλλος αλγόριθμος έχει προταθεί, με κριτήρια ξανά την ταχύτητα του τερματικού και την ποιότητα των προσφερόμενων υπηρεσιών (οι εφαρμογές διαχωρίζονται πάλι σε real-time και non real-time)[30]. Η διαφορά τους σχετικά με την ταχύτητα είναι ότι οι στάθμες είναι αρκετά μικρότερες δίνοντας πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα (0-5km/h, 5-10km/h, >10km/h). Ένα επιπλέον εργαλείο που χρησιμοποιείται για την τελική απόφαση είναι ένας μηχανισμός πρόβλεψης θέσης. Ο μηχανισμός αυτός γνωρίζοντας την τρέχουσα θέση του χρήστη και την ταχύτητα με την οποία κινείται κάνει μια εκτίμηση της πορείας του, και προβλέπεται έτσι το σημείο που θα πρέπει να εκτελεστεί το handover. Επομένως η κυψέλη που εξυπηρετεί το χρήστη τη δεδομένη στιγμή γνωρίζει ποια θα είναι πιθανότατα η υποψήφια κυψέλη (HeNB) και έτσι οι απαραίτητες αρχικές διεργασίες για το HO ξεκινούν. Με αυτό τον τρόπο εξοικονομείται χρόνος από τη χρονοβόρα διαδικασία επιλογής του κατάλληλου FAP. Ο αλγόριθμος αυτός προτείνει ακόμα δύο τεχνικές σχετικά με τη χρονική στιγμή που πρέπει να γίνει το handover. Η μία επιλογή είναι να εκτελεστεί ένα προληπτικό HO (Proactive HO), όπου γνωρίζοντας τα χαρακτηριστικά του δικτύου (HeNB) στη θέση στην οποία οδεύει ο χρήστης, το HO εκτελείται πριν το επίπεδο του RSSI του τρέχοντος eNB πέσει στο κατώφλι HHT (Handover Hysteresis Threshold). Η τεχνική αυτή σκοπεύει στη μείωση της απώλειας πακέτων και της καθυστέρησης κατά τη διάρκεια του HO. Η άλλη επιλογή είναι το αναδραστικό HO (Reactive HO), το οποίο αναβάλλει την εφαρμογή του HO όσο το δυνατόν περισσότερο, μέχρι τη στιγμή δηλαδή που το λαμβανόμενο σήμα από το τρέχον δίκτυο πέσει σε αρκετά χαμηλό επίπεδο. Το HO αυτό αποσκοπεί στη μείωση των πολλών, συχνών και περιττών HOs. Επομένως, ανάλογα με το είδος των υπηρεσιών επιλέγεται και η κατάλληλη τεχνική, δηλαδή για υπηρεσίες real-time εκτελείται το proactive HO ενώ για non real-time το reactive HO. Τελικά ο αλγόριθμος λειτουργεί ως εξής (εικόνα 4.28): για υψηλές ταχύτητες δεν εκτελείται HO προς το femtocell, για μεσαίες προβλέπεται η πορεία κίνησης του τερματικού και ανάλογα με το είδος των υπηρεσιών εκτελείται και το αντίστοιχο HO, ενώ για μικρές ταχύτητες ή για στάσιμους χρήστες δεν γίνεται πρόβλεψης πορείας και η επιλογή γίνεται όπως και πριν βάσει της υπηρεσίας. Ο αλγόριθμος σε σχέση με τους συμβατικούς που η απόφαση λαμβάνεται μόνο με βάση το RSS είναι και

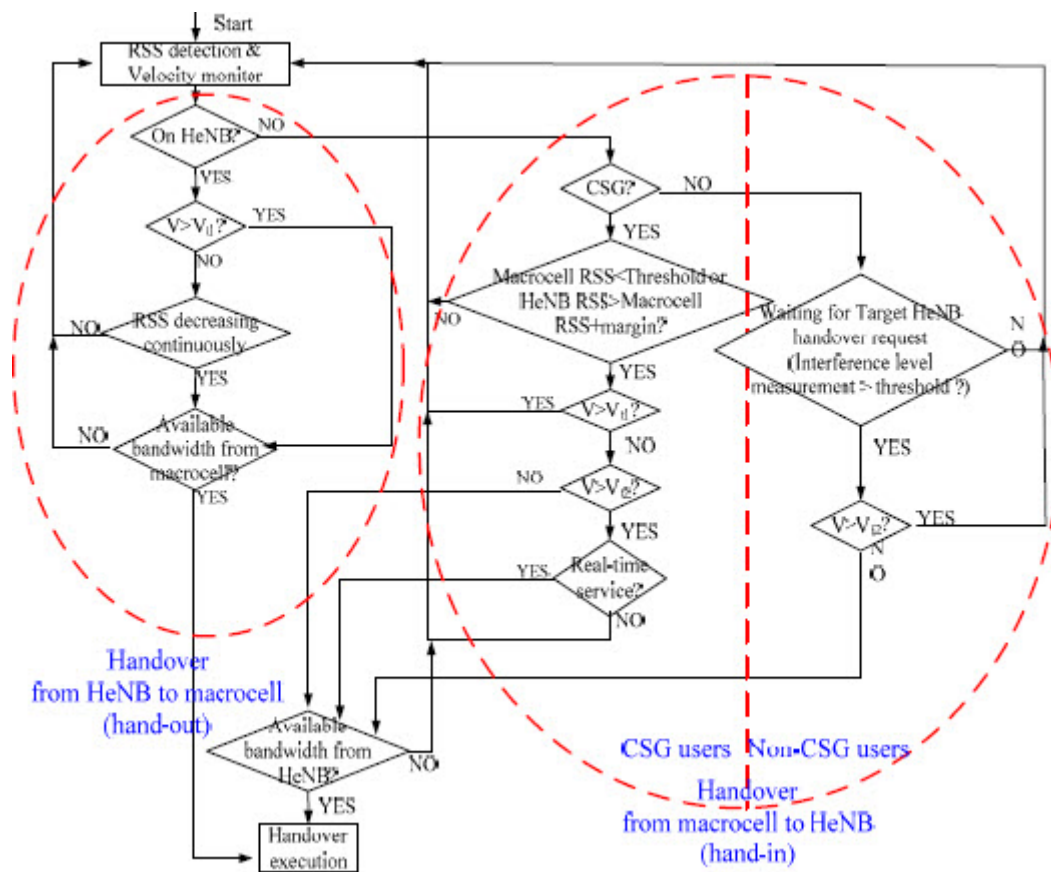
ταχύτερος λόγω του μηχανισμού πρόβλεψης αλλά και αποδοτικότερος καθώς μειώνονται τα περιπτώσεις HOs. Συγκεκριμένα, με τη χρήση των reactive HO το πλήθος των VHO που εκτελούνται μπορεί να μειωθεί μέχρι και 60% σε σχέση με τα proactive HO.

```
INITIALISATION # HO algorithm
EXAMINE V      # V is the speed of UE
IF V > 10 Km/h
    NO HAND-IN
ELSE IF V > 5 Km/h
    PERFORM MOBILITY PREDICTION
    IF Traffic = Real-Time
        PERFORM PROACTIVE HO
    ELSE IF Traffic = Non Real-Time
        PERFORM REACTIVE HO
ELSE IF Traffic =Real-Time
    PERFORM PROACTIVE HO
    IF Traffic = Non Real-Time
        PERFORM REACTIVE HO
ELSE
    PERFORM NORMAL HO
RETURN
```

Εικόνα 4.28:Αλγόριθμος VHO από δίκτυο LTE σε femtocell με πρόβλεψη κινητικότητας [30]

Ακόμα ένας αλγόριθμος έχει προταθεί για τα δίκτυα LTE και femtocells, στον οποίο αυτή τη φορά γίνεται διαχωρισμός ανάμεσα σε hand-out και hand-in HO[32]. Μάλιστα, στην περίπτωση του hand-in λαμβάνεται υπ' όψιν αν ο συνδρομητής ανήκει στο CSG ή όχι. Τα κριτήρια που παίζουν ρόλο στην τελική απόφαση είναι το RSS, η ταχύτητα των χρηστών, το διαθέσιμο bandwidth, το QoS και τα επίπεδα των παρεμβολών που δημιουργούν οι χρήστες των femtocells και των μακροκυψελών μεταξύ τους. Όπως και παραπάνω, η ταχύτητα του τερματικού εξετάζεται σε ποια κατηγορία κινητικότητας ανήκει με τις εξής γενικές στάθμες: V_{t1} και V_{t2} , με τη πρώτη να είναι μεγαλύτερη. Όπως βλέπουμε και στην εικόνα 4.29, στην περίπτωση του hand-out, αν η ταχύτητα είναι υψηλή και υπάρχει διαθέσιμο bandwidth, τότε εκτελείται το VHO προς το LTE. Αλλιώς για μικρότερες ταχύτητες εξετάζεται επιπλέον και το RSS των δύο δικτύων. Στο hand-in αν έχουμε CSG συνδρομητή, υπολογίζεται πρώτα το RSS. Αν η ταχύτητα είναι μεγάλη, το HO δεν γίνεται καθόλου αφού η ακτίνα κάλυψης των HeNB είναι μικρή και σύντομα θα χρειαστεί νέο HO. Αντίθετα, στις μικρές ταχύτητες το HO εκτελείται αρκεί βέβαια να υπάρχει το διαθέσιμο φάσμα, ενώ στις μεσαίες Ευρυδίκη-Φραγκίσκη Α. Καραγιάννη

μόνο εάν πρόκειται για real-time εφαρμογή. Στην περίπτωση όμως που ο χρήστης δεν ανήκει στην ομάδα αυτή, κανονικά δεν μπορεί να κάνει hand-in στο HeNB. Στην περίπτωση όμως που το επίπεδο των παρεμβολών που προκαλεί είναι μεγάλο, τότε μπορεί να γίνει ένα HO το οποίο αυτή τη φορά θα ξεκινήσει από το HeNB. Αυτό το HO υπάρχει πιθανότητα να γίνει μόνο για τις μικρές ταχύτητες του τερματικού, αφού στην αντίθετη περίπτωση μετά από λίγο το τερματικό θα απομακρυνθεί από την περιοχή κάλυψης του HeNB και οι παρεμβολές θα σταματήσουν. Με τον αλγόριθμο αυτό επιτυγχάνεται η μείωση των περιπτώσεων και των αποτυχημένων HOs καθώς και ο περιορισμός των παρεμβολών.

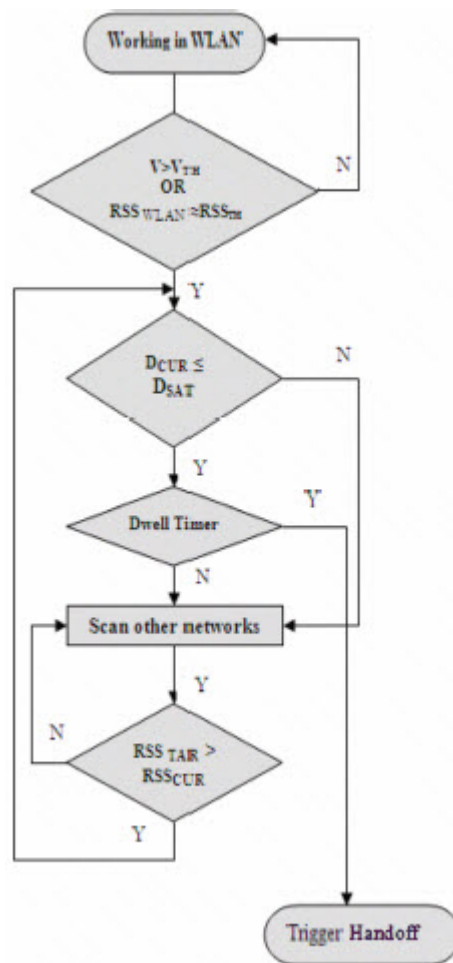


Εικόνα 4.29:Αλγόριθμος VHO για LTE/femtocell με διαχωρισμό CSG/non-CSG χρηστών [32]

4.5.4.7 Αλγόριθμοι VHO για δίκτυα WLAN και UMTS

Για τις περιπτώσεις όπου τα διαθέσιμα δίκτυα στην περιοχή που βρίσκεται ο χρήστης είναι το UMTS και το WLAN, ο αλγόριθμος RS-VDA(Real-time Ευρυδίκη-Φραγκίσκη Α. Καραγιάννη

Services-Vertical handoff Decision Algorithm) μπορεί να δώσει λύση σχετικά με το αν πρέπει να εκτελεστεί HO για υπηρεσίες real-time[33]. Ο αλγόριθμος αυτός λαμβάνει υπ' όψιν του διάφορες παραμέτρους όπως τη ταχύτητα του τερματικού, το διαθέσιμο bandwidth, το RSS και την καθυστέρηση του κάθε δικτύου. Για να αποφευχθεί το φαινόμενο του ping-pong, δηλαδή να γίνονται συχνά διαδοχικά και άσκοπα handovers από το ένα δίκτυο στο άλλο, τα οποία αυξάνουν την πιθανότητα των αποτυχημένων υπηρεσιών και μειώνουν την απόδοση, η ταχύτητα του κινητού και η καθυστέρηση του δικτύου παίζουν το πιο σημαντικό ρόλο στην απόφαση. Στην περίπτωση που ο χρήστης είναι συνδεδεμένος σε δίκτυο WLAN και η ταχύτητα με την οποία κινείται ξεπερνά μια καθορισμένη τιμή(V_{TH}) ή το RSS του δικτύου WLAN πλησιάζει μια κατώτατη τιμή-κατώφλι(RSS_{TH}), αν για παράδειγμα βρίσκεται στα όρια κάλυψης του δικτύου, τότε ελέγχεται αν η καθυστέρηση του δικτύου UMTS είναι μέσα στα αποδεκτά όρια(D_{SAT}), αφού παίζει μεγάλο ρόλο για τις real-time υπηρεσίες. Αν η καθυστέρηση είναι αποδεκτή, τότε ενεργοποιείται ένας άλλος μηχανισμός(dwell timer), ο οποίος ελέγχει τη σταθερότητα του υποψήφιου δικτύου. Αν το δίκτυο UMTS εξακολουθεί να λειτουργεί κάτω από τις ίδιες συνθήκες και μετά την πάροδο του χρόνου ελέγχου, δηλαδή το δίκτυο είναι σταθερό, τότε πραγματοποιείται το handover, αλλιώς, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.30 το τερματικό αναζητά νέο υποψήφιο δίκτυο.

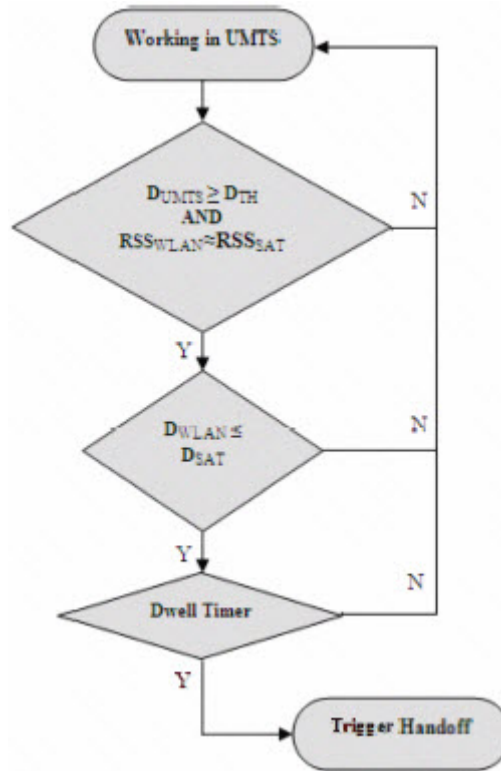


Εικόνα 4.30:Αλγόριθμος RS-VDA από δίκτυο WLAN σε UMTS [33]

Προς την αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή για handovers από UMTS σε WLAN, το κριτήριο που παίζει τώρα κύριο λόγο δεν είναι η ταχύτητα αλλά η καθυστέρηση του UMTS, αφού για υπηρεσίες real-time το δίκτυο αυτό είναι καταλληλότερο λόγω του καλύτερου QoS που προσφέρει και που είναι τόσο σημαντικό για τις υπηρεσίες αυτές. Άλλωστε η κάλυψη του UMTS είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με το WLAN και μπορεί να εξυπηρετήσει τερματικά που κινούνται με οποιαδήποτε ταχύτητα. Επομένως το τερματικό παραμένει συνδεδεμένο στο UMTS όσο το δυνατόν περισσότερο μπορεί και οι διαδικασίες για το handover ξεκινούν όταν το δίκτυο αυτό δεν μπορεί πλέον να προσφέρει το απαιτούμενο QoS, δηλαδή όταν η καθυστέρηση του UMTS (D_{UMTS}) ξεπερνά το προβλεπόμενο κατώφλι (D_{TH}). Θα πρέπει βέβαια και το RSS του δικτύου WLAN είναι εντός των αποδεκτών ορίων. Στην περίπτωση που ισχύουν αυτοί οι περιορισμοί, υπολογίζεται και η καθυστέρηση του WLAN

Ανάπτυξη και αποτίμηση μηχανισμού για την επιλογή δικτύου πρόσβασης

και με τη βοήθεια του dwell timer ελέγχεται και η σταθερότητά του. Τότε γίνεται τελικά το handover, αλλιώς το τερματικό παραμένει στο αρχικό δίκτυο. Η μεθοδολογία αυτή φαίνεται και στο διάγραμμα της εικόνας 4.31.



Εικόνα 4.31:Αλγόριθμος RS-VDA από δίκτυο UMTS σε WLAN [33]

5. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ VHO

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται όλοι οι αλγόριθμοι που αναλύσαμε στο κεφάλαιο 4. Βλέπουμε λοιπόν συγκεντρωτικά για τον κάθε αλγόριθμο διάφορα χαρακτηριστικά, όπως το είδος των δικτύων πρόσβασης που υποστηρίζουν, το πλήθος και το είδος των κριτηρίων που λαμβάνονται υπ' όψιν για τη λήψη της απόφασης, ο μηχανισμός λήψης απόφασης που χρησιμοποιείται, το πλήθος των VHOs που εκτελούν και η απόδοσή τους.

Οι δύο πρώτοι αλγόριθμοι έχουν ως κριτήριο το λαμβανόμενο RSS των υποψήφιων δικτύων. Είναι από τους πιο απλούς αλγορίθμους, αφού είναι εύκολο να μετρηθεί το RSS και η λήψη της απόφασης δεν έχει καμία περιπλοκότητα. Η αξιοπιστία τους δεν είναι μεγάλη εξαιτίας των συνεχών διακυμάνσεων του RSS. Όμως, ακόμα και αν επιλεγθεί το δίκτυο με το ισχυρότερο RSS, δεν σημαίνει απαραίτητα ότι είναι και το δίκτυο με τις καταλληλότερες συνθήκες. Ο δεύτερος αλγόριθμος υπερτερεί σχετικά από τον πρώτο επειδή, πέρα από το RSS, υπολογίζει και τον εκτιμώμενο χρόνο παραμονής του χρήστη στην κυψέλη/περιοχή κάλυψης βάσει της ακτίνας, της απόστασής του από το σημείο πρόσβασης και της ταχύτητας. Η ταχύτητα υπολογίζεται με τη βοήθεια του αλγορίθμου VEPSD[47]. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνει τη μείωση των περιπτώσεων VHOs, κυρίως στα τερματικά που κινούνται με υψηλές ταχύτητες, διατηρώντας την πιθανότητα υλοποίησης HO σε αρκετά χαμηλά επίπεδα, αλλά αντιμετωπίζει πρόβλημα αυξημένης καθυστέρησης, που μπορεί να φτάσει και τα 2s.

Οι επόμενοι τρεις αλγόριθμοι βασίζονται και αυτοί σε ένα μόνο κριτήριο, το διαθέσιμο bandwidth, με αποτέλεσμα να έχουν και αυτοί χαμηλή πολυπλοκότητα υλοποίησης και όπως ήταν αναμενόμενο υστερούν σε αξιοπιστία. Μπορεί το κύριο κριτήριο να είναι το bandwidth αλλά συνήθως στην τελική απόφαση παίζει ρόλο και το RSS. Έτσι είναι σχετικά καλύτεροι από τους RSS-based VHOs. Συγκεκριμένα ο αλγόριθμος του Lee, με δίκτυα εφαρμογής τα WLAN/WWAN, έχει υψηλή αποδοτικότητα (έως 400%) και

μικρές καθυστερήσεις για real-time υπηρεσίες(με μέσο όρο τα 455ms) αλλά δεν είναι εφαρμόσιμος σε άλλα δίκτυα και κυρίως στα κυψελωτά, με αποτέλεσμα να είναι περιοριστικός. Οι άλλοι δύο έχουν καλύτερη απόδοση από τους RSS-based γιατί καταφέρνουν να ισορροπούν την κίνηση στα δίκτυα. Ο αλγόριθμος του Chi μειώνει και τα περιπτώ HOs μέσω ενός μηχανισμού πρόβλεψης πιθανών λανθασμένων αποφάσεων. Με αυτό το τρόπο διατηρεί χαμηλή πιθανότητα υλοποίησης περιπτώσεων HO, με μέγιστη τιμή το 1.5%.

Οι υπόλοιποι αλγόριθμοι είναι πολλαπλών κριτηρίων και επομένως το επίπεδο πολυπλοκότητας πλέον έχει ανέβει. Ο αλγόριθμος του Zhu χρησιμοποιεί μια συνάρτηση κόστους και επιλέγει το δίκτυο με το χαμηλότερο κόστος. Επειδή δέχεται ως είσοδο διάφορα κριτήρια σχετικά με το δίκτυο αλλά και με το χρήστη, η απόφαση που λαμβάνει ικανοποιεί τις απαιτήσεις του χρήστη. Έχει υψηλή απόδοση που οφείλεται στην κατανομή της κίνησης στα δίκτυα. Όμως υπάρχει δυσκολία στην εύρεση των σωστών συντελεστών βαρύτητας ώστε το αποτέλεσμα να είναι το βέλτιστο. Αντίθετα, οι επόμενοι αλγόριθμοι, του Hasswa και του Tawil επιλέγουν το δίκτυο που παρέχει την καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών αντί για αυτό με το χαμηλότερο κόστος. Έχουν καλή απόδοση συνήθως και μικρές καθυστερήσεις. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος του Hasswa έχει καλύτερη απόδοση έως και 58%, και αντίστοιχα έως 17% ο αλγόριθμος του Tawil σε σχέση με τους centralized VHD.

Οι αλγόριθμοι των Nkansah και Nasser έχουν μεγάλη πολυπλοκότητα, τα κριτήρια που παίζουν ρόλο είναι πολλά, και είναι οι καταλληλότεροι αλγόριθμοι για τις περιπτώσεις που οι πληροφορίες για την λήψη της απόφασης είναι πάρα πολλές και δύσκολο να συνδυαστούν όλες μαζί για την εξαγωγή αποτελέσματος. Παρόλα αυτά με τη βοήθεια των fuzzy logic συστημάτων και των neural networks καταφέρνουν να βρίσκουν το κατάλληλο δίκτυο καθώς είναι ικανά να χειριστούν τα ασαφή δεδομένα που προέρχονται από διαφορετικές κατηγορίες μεταξύ τους και μπορούν να δώσουν αρκετά ικανοποιητικές λύσεις, με τίμημα όμως τις μεγάλες καθυστερήσεις.

Οι αλγόριθμοι MAD είναι πολλαπλών κριτηρίων με αυξημένη πολυπλοκότητα και αυτοί. Η απόδοσή τους εξαρτάται από την κάθε περίπτωση και από το είδος των υπηρεσιών που εκτελούνται, με τον αλγόριθμο GRA να παρουσιάζει σχετικά καλύτερη απόδοση από τους άλλους, αφού έχει μικρότερες καθυστερήσεις και υψηλότερο bandwidth. Ο user-centric χρησιμοποιεί μία utility function για την επιλογή δικτύου έχοντας ως σκοπό την ικανοποίηση του χρήστη ως προς την ποιότητα. Όμως το μειονέκτημά του είναι ότι υλοποιείται μόνο για εφαρμογές non-real time.

Οι υπόλοιποι αλγόριθμοι, οι οποίοι αναφέρονται σε VHOs ανάμεσα σε δίκτυα LTE με WLAN ή LTE με femtocell, πέρα από τα διάφορα άλλα κριτήρια που σχετίζονται με την απόφαση, δίνουν μεγάλη βάση στην ταχύτητα των τερματικών. Κυρίως στην περίπτωση των femtocell, εξαιτίας της μικρής περιοχής κάλυψης που παρέχουν, η ταχύτητα έχει κύριο λόγο στην απόφαση για να αποφευχθούν τα περιττά HOs που επιβαρύνουν το σύστημα. Ο αλγόριθμος του Ulvan προσφέρει επιπλέον και μεγαλύτερη ταχύτητα κατά την εκτέλεση των HOs χάρη στα δύο είδη HO που χρησιμοποιεί και στο μηχανισμό πρόβλεψης θέσης. Με τη χρήση ειδικά του reactive HO το πλήθος των HO είναι αρκετά μικρότερο από αυτό των υπολοίπων αλγορίθμων. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται το πλήθος των διαθέσιμων FAP στη περιοχή κάλυψης, τόσο μεγαλύτερη γίνεται η διαφορά στο πλήθος των HO που εκτελούνται από τους διάφορους αλγορίθμους. Έτσι, με τη χρήση των reactive HO το πλήθος των VHO που εκτελούνται μπορεί να μειωθεί μέχρι και 60% σε σχέση με τα proactive HO. Τέλος, για τις περιπτώσεις που το πρόβλημα των παρεμβολών είναι έντονο, κατάλληλος είναι ο αλγόριθμος του Shih-Jung Wu που καταφέρνει να ελαττώνει τα επίπεδά τους. Ο αλγόριθμος του Tae-sub για τα δίκτυα LTE-WLAN είναι αποδοτικός και έχει χαμηλό κόστος υπηρεσιών κυρίως στις υψηλές ταχύτητες. Το ποσοστό των επιτυχημένων VHO είναι υψηλό για όλα τα είδη των εκτελούμενων υπηρεσιών, είτε είναι real-time εφαρμογές είτε όχι. Ο άλλος αλγόριθμος που εφαρμόζεται σε αυτά τα δίκτυα, εξάγει σωστά αποτελέσματα για το ποιο είναι το καταλληλότερο δίκτυο, όμως εξαιτίας του fuzzy logic συστήματος που χρησιμοποιεί, παρουσιάζει αυξημένη καθυστέρηση.

Επομένως, βέλτιστος αλγόριθμος δεν υπάρχει. Ανάλογα με την κάθε περίπτωση, την κατάσταση των δικτύων και των τερματικών, τις προτιμήσεις των χρηστών, το είδος των εφαρμογών, τα υποψήφια δίκτυα και διάφορες άλλες παραμέτρους, πρέπει να χρησιμοποιηθεί αλγόριθμος από την κατάλληλη κατηγορία που αρμόζει στην κάθε περίπτωση ώστε να εξάγει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

Οι κυριότεροι περιορισμοί στην επιλογή του καταλληλότερου αλγορίθμου είναι το είδος των υποψήφιων δικτύων που είναι διαθέσιμα για HO στην περιοχή που βρίσκεται το τερματικό, αφού κάποιοι από αυτούς εφαρμόζονται σε συγκεκριμένα μόνο δίκτυα και επομένως δεν μπορούν να χρησιμεύσουν σε όλες τις περιπτώσεις, το είδος των εφαρμογών που εκτελούνται κατά τη διάρκεια που πρέπει να γίνει το handover και τις απαιτήσεις του χρήστη. Επομένως, όταν τα διαθέσιμα δίκτυα είναι τα LTE και femtocell από τους 3 διαθέσιμους αλγόριθμους καταλληλότερος είναι ο δεύτερος, του Uivan[30], καθώς είναι ταχύτερος και αποδοτικότερος από τους άλλους και με μικρό αριθμό HO χάρη στα reactive HO. Αντίστοιχα αποτελέσματα δείχνει να έχει και ο αλγόριθμος του Zhang[31], όμως δεν είναι ρεαλιστικά λόγω των μεγάλων ταχυτήτων που λαμβάνει υπ' όψιν του για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, αφού τα τερματικά είναι δύσκολο να μετακινούνται με τέτοιες ταχύτητες μεταξύ των FAP που βρίσκονται κατά κύριο λόγο σε μεγάλα κτίρια. Στην περίπτωση βέβαια που παρουσιάζονται αυξημένες παρεμβολές μεταξύ των κυψελών και των FAP, καταλληλότερος είναι ο τελευταίος αλγόριθμος αυτής της κατηγορίας, που έχει ικανοποιητική απόδοση και παράλληλα μειώνει και τις παρεμβολές.

Όταν τα διαθέσιμα δίκτυα είναι το LTE και το WLAN, ο αλγόριθμος του Tae-Sub[29] είναι μια καλή επιλογή με αυξημένη απόδοση και με μικρότερη καθυστέρηση από τον αλγόριθμο του Aziz[28]. Όμως στην περίπτωση που η καθυστέρηση δεν επηρεάζει τόσο την απόφαση (για παράδειγμα για non-real time εφαρμογές) και θέλουμε να λάβουμε υπ' όψιν μας πολλά και αταίριαστα κριτήρια (κατανάλωση μπαταρίας, συμφόρηση στα δίκτυα κ.α.), καλά αποτελέσματα εξάγει και ο δεύτερος αλγόριθμος με τη βοήθεια των fuzzy logic συστημάτων.

Για τις περιπτώσεις που κύριο λόγο παίζουν οι προτιμήσεις του χρήστη και όχι τόσο οι συνθήκες των δικτύων κατάλληλος είναι ο user-centric αλγόριθμος του Ormond, αν και κυρίως απευθύνεται σε non-real time εφαρμογές. Για τις περιπτώσεις που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε ένα αλγόριθμο για VHO που να είναι απλός στην υλοποίηση, υπάρχουν οι αλγόριθμοι που βασίζονται στο RSS και στο bandwidth, αλλά δεν δίνουν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα λόγω των συνεχών διακυμάνσεων των τιμών αυτών. Τέλος, οι συνδυαστικοί αλγόριθμοι πολλαπλών κριτηρίων MAD και τα fuzzy logic συστήματα χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο από άλλους αλγορίθμους για τη βοήθεια στην εξαγωγή του αποτελέσματος, όπως για παράδειγμα οι αλγόριθμοι για το LTE.

Αλγόριθμος	Υποστηριζόμενα RATs	Single or multiple criteria	Κύρια κριτήρια	Μηχανισμός λήψης απόφασης	Πλήθος HOs	Απόδοση
Zahram(RSS-based)	UMTS/WLAN	Single	RSS	RSS-based Decision function	Μειώνει το πλήθος των περιπτώσεων HOs σε σχέση με απλούς RSS κατά 85%	Μειώνεται όσο η ταχύτητα αυξάνεται
Yan(RSS-based)	WLAN/κυψελωτά δίκτυα	Single	RSS	RSS-based Decision function	Μειώνει το πλήθος των περιπτώσεων HOs όσο η ταχύτητα αυξάνεται κατά 35%	Έχει αυξημένη καθυστέρηση
Lee(Bandwidth - based)	WLAN/WWAN	Single	Bandwidth	Bandwidth-based Decision function	Δεν παρέχεται πληροφορία	Πολύ υψηλή απόδοση σε σχέση με τους παραδοσιακούς αλγόριθμους RSS και μικρή καθυστέρηση στις real-time εφαρμογές
Yang(Bandwidth - based)	WLAN/CDMA	Single	Bandwidth	Bandwidth-based Decision function	Αυξάνει το πλήθος των HOs(ping-pong effect)	Πολύ υψηλή απόδοση σε σχέση με τους παραδοσιακούς αλγόριθμους RSS

Ανάπτυξη και αποτίμηση μηχανισμού για την επιλογή δικτύου πρόσβασης

Chi(Bandwidth - based)	Όλα τα ασύρματα δίκτυα	Single	Bandwidth	Bandwidth-based Decision function	Έχει μικρή πιθανότητα περιττών HOs	Υψηλή απόδοση με ισορροπημένη κίνηση δικτύων
Zhu	Όλα τα ασύρματα δίκτυα	Multiple	Bandwidth, καθυστέρηση	Cost function	Δεν παρέχεται πληροφορία	Υψηλή απόδοση με ισορροπημένη κίνηση δικτύων
Hasswa	Όλα τα ασύρματα δίκτυα	Multiple	Κόστος, ασφάλεια, απόδοση	Utility function	Δεν παρέχεται πληροφορία	Υψηλή απόδοση, εξαρτάται από τα υποστηριζόμενα δίκτυα
Tawil	Όλα τα ασύρματα δίκτυα	Multiple	Bandwidth, κόστος	Utility function	Δεν παρέχεται πληροφορία	Υψηλή απόδοση, μικρή καθυστέρηση
Nkansah	WLAN/WWAN	Multiple	Bandwidth, κόστος, ισχύς, κάλυψη	Fuzzy logic system	Μειώνει το πλήθος των περιττών HOs	Αυξημένη καθυστέρηση
Nasser	Όλα τα ασύρματα δίκτυα	Multiple	Κόστος, ασφάλεια, ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	Neural network	Μειώνει το πλήθος των περιττών HOs	Μειώνει το πλήθος των περιττών HOs
MAD(SAW, TOPSIS, MEW, AHP, GRA)	Όλα τα ασύρματα δίκτυα	Multiple	Διαφορετικά κατά περίπτωση	MAD	Διαφορετικά κατά περίπτωση	Διαφορετική κατά περίπτωση
Ormond(User-centric)	Όλα τα ασύρματα δίκτυα	Multiple	QoS, καθυστέρηση, κόστος	Utility function	Δεν παρέχεται πληροφορία	Αυξάνεται το consumer surplus
Aziz	LTE/WLAN	Multiple	Ταχύτητα, RSS, bandwidth, SNR	Fuzzy logic system	Δεν παρέχεται πληροφορία	Αυξημένη καθυστέρηση

K. Tae-sub	LTE/WLAN	Multiple	Είδος υπηρεσίας, ταχύτητα, RSS, QoS	Decision function και MADM	Δεν παρέχεται πληροφορία	Αυξημένη απόδοση(κυρίως για υψηλές ταχύτητες)-Υψηλό ποσοστό επιτυχίας
H. Zhang	LTE/femtocell	Multiple	Ταχύτητα, QoS, RSS, χωρητικότητα	Decision function	Μειώνει το πλήθος των περιπτώσεων HOs καθώς και το συνολικό πλήθος	Ικανοποιητική απόδοση
A. Ulvan	LTE/femtocell	Multiple	Ταχύτητα, QoS	Decision function	Μειώνει το πλήθος των περιπτώσεων HOs	Υψηλή απόδοση, μικρή καθυστέρηση
Shih-Jung Wu	LTE/femtocell	Multiple	RSS, ταχύτητα, bandwidth, παρεμβολές	Decision function	Μειώνει το πλήθος των περιπτώσεων HOs	Υψηλή, μειώνει τις παρεμβολές
A. Aziz	UMTS/WLAN	Multiple	Ταχύτητα, καθυστέρηση, RSS	Decision function	Μειώνει το πλήθος των περιπτώσεων HOs	Υψηλή απόδοση

Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικός πίνακας αλγορίθμων VHO

Ανάπτυξη και αποτίμηση μηχανισμού για την επιλογή δικτύου πρόσβασης

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] 4G Americas White Paper, 4G Mobile Broadband Evolution 3GPP Release 10 and Beyond, February 2011
- [2] Anja Louise Schmidt, UMTS and WLAN interoperability, Technical University of Denmark Research Center COM, 2004
- [3] Farooq Khan, “LTE for 4G Mobile Broadband”, Cambridge University Press
- [4] Motorola Technical White Paper, LTE - A Technical Overview
- [5] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold, Per Beming, HSPA and LTE for Mobile Broadband, Second Edition, Academic Press – Elsevier
- [6] M. Olsson, S. Sultana, S. Rommer, L. Frid and C. Mulligan, SAE and the evolved packet core, Driving the mobile broadband revolution, Academic Press
- [7] S. Sesia, I. Toufik and M. Baker, LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice, John Wiley & Sons, 2009
- [8] Damnjanovic A., Montojo J., Yongbin Wei, Tingfang Ji, Tao Luo, Vajapeyam M., Taesang Yoo, Osok Song, Malladi, D., A SURVEY ON 3GPP HETEROGENEOUS NETWORKS, IEEE Wireless Communications, vol.18, no.3, p.10-21, June 2011
- [9] S. Frei, W. Fuhrmann, A. Rinkel, B. V. Ghita, Improvements to Inter System Handover in the EPC Environment, The Fourth IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security, Paris, 2011
- [10] Song, W.; Jong-Moon Chung; Daeyoung Lee; Chaegwon Lim; Sungho Choi; Taesun Yeoum; Improvements to Seamless Vertical Handover between Mobile WiMAX and 3GPP UTRAN through the Evolved Packet Core, IEEE Communications Magazine, vol.47, no.4, p.66-73, April 2009
- [11] Sarakis, L.; Kormentzas, G.; Guirao, F.M.; SEAMLESS SERVICE PROVISION FOR MULTI HETEROGENEOUS ACCESS, IEEE Wireless Communications, vol.16, no.5, p.32-40, October 2009]
- [12] M. Corici, J. Fiedler, T. Magedanz, D. Vingarzan, Access Network Discovery and Selection in the Future Broadband Wireless Environment, Third International ICST Conference on MOBILE Wireless, Chicago, 2010
- [13] Olsson M., Sultana S., Rommer S., Frid L., Mulligan C., SAE and the evolved packet core-Driving the mobile broadband revolution, Academic Press

- [14] I.Soto, C. Bernardos, M. Calderon, T. Melia, PMIPv6: A network-Based Localized Mobility Management Solution, The Internet Protocol Forum, vol.13, no.3, September 2010
- [15] Ki-Sik Kong; Wonjun Lee; Youn-Hee Han; Myung-Ki Shin; HeungRyeol You; Mobility management for all-IP mobile networks: mobile IPv6 vs. proxy mobile IPv6, IEEE Wireless Communications, vol.15, no.2, p.36-45, April 2008
- [16] http://www.indigoo.com/dox/itdp/12_MobileWireless/
- [17] Ali, I.; Casati, A.; Chowdhury, K.; Nishida, K.; Parsons, E.; Schmid, S.; Vaidya, R.; Network-based mobility management in the evolved 3GPP core network, Communication Magazine IEEE, vol.47, no.2, p.58-66, February 2009
- [18] Wenhui Zhang; Jaehnert, J.; Dolzer, K.; Design and Evaluation of a Handover Decision Strategy for 4th Generation Mobile Networks, Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Spring. The 57th IEEE Semiannual, Vol. 3 (2003), p. 1969-1973 vol.3
- [19] Hasswa, A.; Nasser, N.; Hossanein, H.; Generic Vertical Handoff Decision Function for Heterogeneous Wireless Networks, Wireless and Optical Communications Networks 2005, WOCN 2005, p.239-243
- [20] M. Kassar, B. Kervella, G. Pujolle, An overview of vertical handover decision strategies in heterogeneous wireless networks, Computer Communications, Vol. 31, No. 10, p. 2607-2620, June 2008
- [21] X. Yan, A. Sekercioglu, S. Narayanan, A survey of vertical handover decision algorithms in Fourth Generation heterogeneous wireless networks, Computer Networks, Vol. 54, No. 11, p. 1848-1863, August 2010
- [22] A. Kalokylos, G. Lambropoulos, I. Modeas, N. Passas, 4G Mobile Systems: Radio Resource Management, Encyclopedia of Wireless and Mobile Communications, April 2008
- [23] P.Chan, R. Sheriff, Y. Hu, P. Tocci, Mobility Management Incorporating Fuzzy Logic for a Heterogeneous IP Environment, IEEE Communications Magazine (2001) Vol.39, no.12, p. 42-51 December 2001
- [24] N. Yaw, A. Johnson, Vertical Handoff Decision Algorithms Using Fuzzy Logic, 2006 Auswireless Conference
- [25] Qingyang Song, Abbas Jamalipour, A Network Selection Mechanism for Next Generation Networks, IEEE International Conference on Communications, p.1418-1422, May 2005
- [26] E. Stevens-Navarro and V. Wong, Comparison between Vertical Handoff Decision Algorithms for Heterogeneous Wireless Networks, Vehicular Technology Conference, p.947-951, May 2006

[27] Ormond O.; Perry P.; Murphy, J.; Network Selection Decision in Wireless Heterogeneous Networks, PIMRC 2005, p.2680-2684, vol4, September 2005

[28] A. Aziz, S. Rizvi, N. Saad, Fuzzy Logic based Vertical Handover Algorithm between LTE and WLAN, International Conference on Intelligent and Advanced Systems(ICIAS 2010), p.1-4, June 2010

[29] K. Tae-sub, O. Ryong, L. Sang-Joon, Vertical Handover between LTE and Wireless LAN Systems based on Common Resource Management (CRRM) and Generic Link Layer (GLL), International Conference on Interaction Sciences 2009, November 2009

[30] A. Ulvan, R. Bestak, M. Ulvan, Handover Scenario and Procedure in LTE-based Femtocell Networks, The Fourth International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies (UBICOMM) 2010, Florence, Italy, October 2010

[31] Haijun Zhang; Xiangming Wen; Bo Wang; Wei Zheng; Yong Sun; A Novel Handover Mechanism between Femtocell and Macrocell for LTE based Networks, 2010 Second International Conference on Communication Software and Networks, p.228-231, February 2010

[32] Shih-Jung Wu, A New Handover Strategy between Femtocell and Macrocell for LTE-based Network, Fourth International Conference on Ubi-Media Computing 2011, p.203-208, July 2011

[33] A. Aziz, S. Rizvi, N. Saad, Optimizations in Vertical Handoff Decision Algorithms for Real Time Services, International Conference on Intelligent and Advanced Systems(ICIAS 2010), p.1-4, June 2010

[34] http://en.wikipedia.org/wiki/System_Architecture_Evolution

[35] <http://3g4g.blogspot.com/search/label/HetNets>

[36] <http://www.radio-electronics.com/info/cellularcomms/femtocells/femto-cells-network-architecture.php>

[37] <http://www.radio-electronics.com/info/cellularcomms/umts/umts-wcdma-network-architecture.php>

[38] <http://www.design-reuse.com/articles/21957/femtocells-security-design.html>

[39] <http://business.motorola.com/experienclte/lte-depth.html>

[40] <http://www.wirelessdesignmag.com/> (LTE Femtocell Roadmap from Roadmap to Reality)

[41] <http://www.radio-electronics.com/info/cellularcomms/lte-long-term-evolution/lte-frequency-spectrum.php>

[42] Alcatel, 3GPP Long-Term Evolution/System Architecture Evolution-Overview, September 2006

[43] P.bellavista, A.Corradi, C. Giannelli, A Unifying Perspective on Context-aware Autonomic Network Selection, IEEE Communications and Surveys Tutorials, issue 99, p.1-21, 2010

[44] E. Stevens-Navarro, U. Pineda-Rico, and J. Acosta-Elías, Vertical Handover in beyond Third Generation (B3G) Wireless Networks, International Journal of Future Generation Communication and Networking, vol. 1, no. 1, pp. 51-58, December 2008

[45] Damnjanovic, A.; Montojo, J.; Yongbin Wei; Tingfang Ji; Tao Luo; Vajapeyam, M.; Taesang Yoo; Osok Song; Malladi, D.; A survey on 3GPP heterogeneous networks, IEEE Wireless Communications, vol.18, no.3, p.10-21, June 2011

[46] K. Dimou, M.Wang, Y. Yang, M.Kazmi, A.Larmo, J.Pettrsson,W.Muller, Handover within 3GPP LTE: Design Principles and Performance, 2009 IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall (2009), p.1-5, 2009

[47] S.Mohanty, VEPSD: a novel velocity estimation algorithm for next-generation wireless systems, IEEE Trans. Wireless Communication, vol. 4, p.2655-2660, November 2005

[48] A.H. Zahran, B. Liang, A. Saleh, Signal threshold adaptation for vertical handoff in heterogeneous wireless networks, Mobile Networks and Applications 11 (4) (2006) p.625–640

[49] X. Yan, Y.A. S_ekerciog̃lu, N. Mani, A method for minimizing unnecessary handovers in heterogeneous wireless networks, in: Proceedings of the 2008 International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM'08), Newport Beach, CA, USA, June 2008, pp. 1–5

[50] C.W. Lee, Li M. Chen, M.C. Chen, Y.S. Sun, A framework of handoffs in wireless overlay networks based on mobile IPv6, IEEE Journal on Selected Areas in Communications 23 (11) (2005) p. 2118–2128

[51] K. Yang, I. Gondal, B. Qiu, L.S. Dooley, Combined SINR based vertical handoff algorithm for next generation heterogeneous wireless networks, in: Proceedings of the 2007 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'07), Washington, USA, November 2007, pp. 4483–4487

[52] C. Chi, X. Cai, R. Hao, F. Liu. Modeling and analysis of handover algorithms, in: Proceedings of the 2007 IEEE Global Telecommunications

Conference (GLOBECOM'07), Washington, USA, November 2007, pp. 4473–4477

[53] F. Zhu, J. McNair, Multiservice vertical handoff decision algorithms, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2006 (2) (2006) 52

[54] N. Nasser, A. Hasswa, H. Hassanein, Handoffs in fourth generation heterogeneous networks, IEEE Communications Magazine 44 (10) (2006) p.96–103

[55] R. Tawil, G. Pujolle, O. Salazar, A vertical handoff decision scheme in heterogeneous wireless systems, in: Proceedings of the 67th Vehicular Technology Conference (VTC'08 – Spring), Marina Bay, Singapore, April 2008, pp. 2626–2630