

Διασύνδεση δικτύων WLAN και κινητής τηλεφωνίας

Wireless LAN to Cellular Network Internetworking

Κοντόπουλος Γεώργιος

Εργασία στο μάθημα Δίκτυα Υπολογιστών

Μεταπτυχιακό MIS, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας

Θεσσαλονίκη 2009

Σύνοψη: Τα κυψελωτά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, προσφέρουν υπηρεσίες φωνής και δεδομένων καλύπτοντας μεγάλες περιοχές αλλά υποστηρίζοντας μικρούς ρυθμούς μετάδοσης. Τα WLANs χρησιμοποιούν πολύ μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης, καλύπτοντας όμως μόνο μικρές περιοχές. Οι δύο τεχνολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν συμπληρωματικά με στόχο τη παροχή μεγαλύτερων ρυθμών μετάδοσης (σε σημεία αυξημένης ζήτησης - hotspots) και ευρεία κάλυψη. Στην εργασία αυτή γίνεται μία επισκόπηση των μεθόδων που έχουν προταθεί για την υλοποίηση της διασύνδεσης δικτύων κινητής τηλεφωνίας 3G και WLAN. Παρουσιάζονται οι κύριες αρχιτεκτονικές διασύνδεσης που έχουν προταθεί και εστιάζει στις σημαντικότερες προκλήσεις, που είναι ο έλεγχος κινητικότητας, η ποιότητα υπηρεσίας και πιστοποίηση αυθεντικότητας.

Abstract: Cellular mobile networks offer data and voice service covering large areas nevertheless supporting narrow bandwidth. On the other hand WLANs use much higher bandwidth covering limited areas. The above technologies (cellular, WLAN) can be used complementarily in order to provide the user both high bandwidth (in hotspots) and wide coverage. This project is a survey on the proposed methods for 3G cellular/WLAN interworking. It presents the main interworking architectures proposed and focuses on the main challenges which are mobility, authentication and quality of services.

1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη των δικτύων WLAN είναι ραγδαία, με τη δημιουργία περιοχών πρόσβασης σε αεροδρόμια, πανεπιστήμια και γενικότερα χώρους συνάθροισης με αυξημένη ζήτηση υπηρεσιών ασύρματης διασύνδεσης, που αναφέρονται σαν hotspots. Το αρχικό πρότυπο IEEE 802.11 υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 2Mbps. Το 802.11b μέχρι 11 Mbps, ενώ τα 802.11a και 802.11g μέχρι 54Mbps. Το αναπτυσσόμενο 802.11n θα υποστηρίζει 300Mbps. Τα WLAN ωστόσο καλύπτουν μόλις μερικές εκατοντάδες τετραγωνικά μέτρα.

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 3G, σχεδιάστηκαν για να παρέχουν υπηρεσίες φωνής και δεδομένων και έχουν δυνατότητα κυψελωτής κάλυψης πολύ μεγάλων περιοχών. Οι ρυθμοί μετάδοσης τους όμως είναι σημαντικά μικρότεροι. 144Kbps για τα GPRS δίκτυα, 384Kbps για τα EDGE δίκτυα εξωτερικά και θεωρητικά μέχρι 2Mbps για εσωτερικούς χώρους.

Τα συμπληρωματικά χαρακτηριστικά των δύο δικτύων έχουν δημιουργήσει μία τάση αναζήτησης μεθόδων ενοποίησής τους, ώστε να συνδυαστούν τα πλεονεκτήματα της κάθε τεχνολογίας.

Τάσεις χρηστών - παρόχων

Οι τάσεις των χρηστών κινητής τηλεφωνίας συνοψίζονται στα παρακάτω [22]

- Το ένα τρίτο της χρήσης του κινητού πραγματοποιείται στο σπίτι ή στη δουλειά.
- Αντικατάσταση της σταθερής τηλεφωνίας από τη κινητή.
- Αυξανόμενη χρήση της VoIP με χρήση φορητών συσκευών που υποστηρίζουν IP συνδέσεις
- Αυξανόμενη χρήση ασύρματης μετάδοσης για δεδομένα.

Οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας από τη μεριά τους, αναζητούν τρόπους μεγιστοποίησης της χρήσης των δικτύων τους. Με τη ραγδαία αύξηση της ζήτησης ασύρματης μετάδοσης δεδομένων, αναπτύσσουν νέες υπηρεσίες μέσα από τα δίκτυά τους. Μειονεκτούν απέναντι στα WLANs στο κόστος των προσφερόμενων υπηρεσιών και το προσφερόμενο bandwidth, πλεονεκτούν όμως στην αξιοπιστία και την ευρύτητα γεωγραφικής κάλυψης.

Η διασύνδεση των δύο δικτύων θα τους προσφέρει τη δυνατότητα παροχής μεγαλύτερου εύρους ζώνης στα hotspots. Αυτό είναι σε όφελος των παρόχων κινητής τηλεφωνίας (διευρύνουν τη χρήση των δικτύων τους), των χρηστών που έχουν οικονομικότερη πρόσβαση ενώ απολαμβάνουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, καθώς και των παρόχων WLAN σύνδεσης αφού αυξάνεται η χρήση και των δικών τους δικτύων.

Οι πάροχοι κινητής επίσης, θα μπορούν να διευρύνουν τη γεωγραφική τους κάλυψη μέσω WLANs σε περιοχές χωρίς κάλυψη κινητής τηλεφωνίας.

Προκλήσεις στη διασύνδεση των 3G κυψελωτών δικτύων με τα WLAN

Οι δύο τύποι δικτύων, έχουν υλοποιηθεί ανεξάρτητα, χρησιμοποιώντας μεταξύ άλλων διαφορετικές τεχνικές πρόσβασης. Έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά σε ότι αφορά την διαχείριση της κινητικότητας (mobility), την πιστοποίηση αυθεντικότητας και την υποστηριζόμενη ποιότητα των υπηρεσιών (QoS). Η πρόκληση που αντιμετωπίζεται είναι η αντιμετώπιση των παραπάνω ζητημάτων στο ενοποιημένο δίκτυο, δηλαδή:[26]

- να επιτευχθεί επίπεδο ασφαλείας κατά τη πρόσβαση από το WLAN ανάλογη αυτής του 3G.
- η διασύνδεση να μπορεί να υποστηρίζει την απαιτούμενη QoS
- να υποστηρίζεται η κινητικότητα ώστε ο χρήστης να αντιλαμβάνεται ένα ομογενές δίκτυο.

Ένα πρωταρχικό ερώτημα είναι, ποιο είναι το καταλληλότερο σημείο διασύνδεσης των δύο ετερογενών δικτύων. Από αυτό εξαρτάται η αντιμετώπιση των παραπάνω προκλήσεων.

Οργάνωση της εργασίας

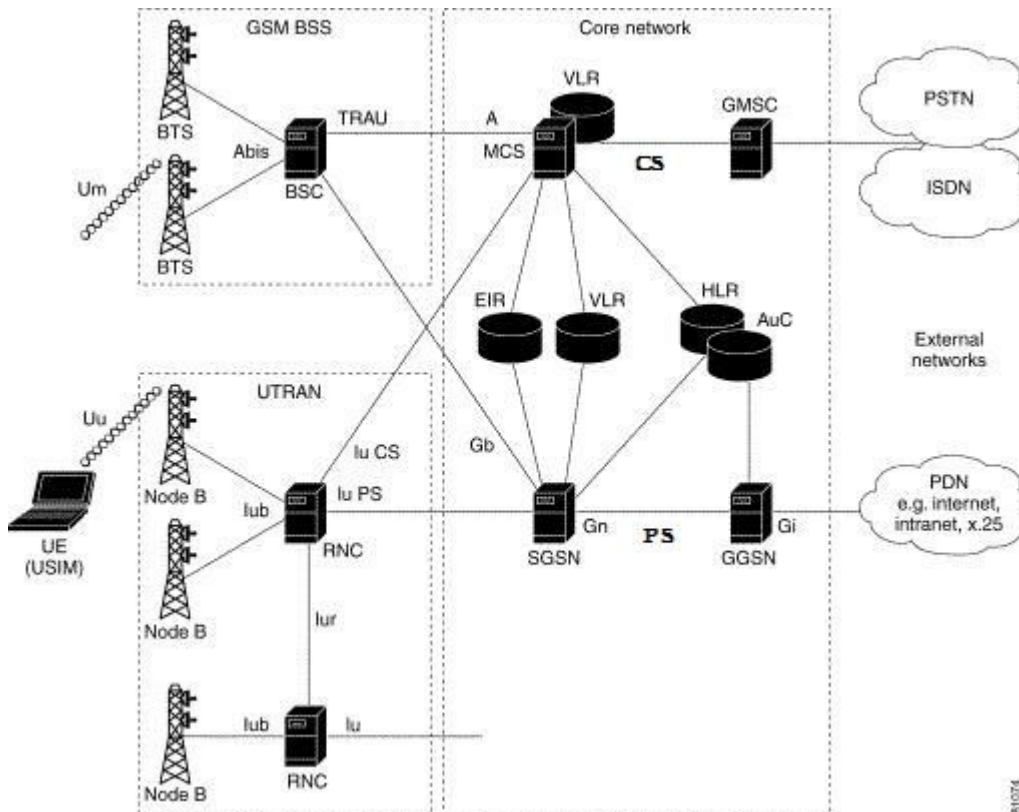
Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται εν συντομία τα επιμέρους δίκτυα, και οι μηχανισμοί τους. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι κατευθύνσεις και οι προτάσεις για τη διασύνδεση. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

2 Τα δίκτυα 3G και WLAN

Τα δύο πλέον αναγνωρισμένα πρότυπα 3G δικτύων είναι το UMTS και το CDMA 2000. Η εργασία εστιάζει κυρίως στο UMTS.

2.1 UMTS

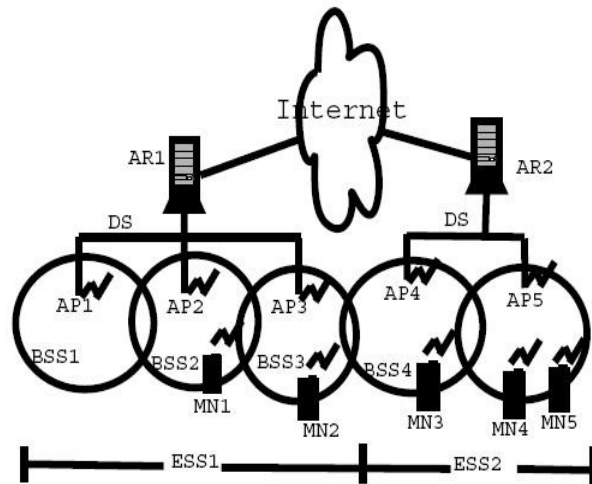
Το UMTS στηρίζεται στον συνδυασμό του GSM (2G δίκτυο μεταγωγής κυκλώματος – CS, Circuit Switch) και του GPRS (2,5G δίκτυο μεταγωγής πακέτου - PS, Packet Switch, εξέλιξη του είναι τα δίκτυα EDGE). Οι υπηρεσίες φωνής διεκπεραιώνονται μέσω του GSM, ενώ οι υπηρεσίες δεδομένων μέσω του PS δικτύου.



Εικόνα1 [31]

Τα συστατικά στοιχεία ενός UMTS δικτύου (Εικόνα1) είναι: [28][23]

- Το δίκτυο ραδιοπρόσβασης UTRAN. Αυτό χωρίζεται σε δύο λογικά στοιχεία (μπορούν να εμπεριέχονται σε ένα φυσικό στοιχείο), τους σταθμούς πρόσβασης Node B και τον RNC (Radio Network Controller). Αντίστοιχα οι ονομασίες στους 2G σταθμούς είναι BTS και BSC.
- Το δίκτυο κορμού CN(Core Network), το οποίο περιλαμβάνει το CS και το PS δίκτυο.
 - Στο CS δίκτυο, πολλοί RNC (ή BTS) συνδέονται σε ένα MSC (Mobile Switching Center), το οποίο μεταξύ άλλων χειρίζεται τη βάση δεδομένων VLR (Visitor Location Register), στην οποία καταγράφονται οι χρήστες που βρίσκονται στη περιοχή του. Παράλληλα ενημερώνουν τη κεντρική βάση δεδομένων HLR (Home Location Register), η οποία κρατά πληροφορίες για όλους τους χρήστες και συνεργάζεται με το AuC (Authentication Centre) που είναι υπεύθυνο για την πιστοποίηση αυθεντικότητας και τα δικαιώματα πρόσβασης του κάθε συνδρομητή. Τέλος μέσω της GMSC (Gateway - Mobile Switching Center) συνδέονται οι MSC στο PSTN δίκτυο.



Εικόνα 3

2.4 Η κινητικότητα στα 3G και τα WLAN

Το κυριότερο γεγονός της κινητικότητας είναι η διαδικασία μετάβασης (handover ή handoff). Κατά το handover επιτυγχάνεται η συνέχιση της σύνδεσης παρά την αλλαγή του σημείου πρόσβασης. Διακρίνεται σε οριζόντιο και κάθετο. Το οριζόντιο συμβαίνει όταν η μετακίνηση γίνεται ανάμεσα σε κελιά που υποστηρίζουν την ίδια τεχνολογία πρόσβασης. Το κάθετο, κατά τη μετακίνηση ανάμεσα σε δίκτυα με ετερογενείς τεχνολογίες πρόσβασης. Η διαδικασία του handover μπορεί να χαρακτηριστεί σαν σκληρή ή μαλακή (hard/soft handover). Κατά το hard handover διακόπτεται η σύνδεση του κινητού σταθμού (MS) με τον σταθμό πρόσβασης πριν συνδεθεί στον επόμενο (brake-before-make), ενώ κατά το soft handover μεσολαβεί κάποιος χρόνος όπου ο MS είναι συνδεδεμένος και με τους δύο σταθμούς (make-before-brake). [26] [29]

Η κινητικότητα διακρίνεται επίσης σε micromobility και macromobility. Η micromobility (ή intradomain mobility) περιορίζεται στη περιοχή κάλυψης ενός τομέα. Η macromobility (ή interdomain) συμβαίνει κατά τη μετακίνηση ανάμεσα σε διαφορετικούς τομείς.[29]

Η διαχείριση της κινητικότητας στα WLAN είναι απλούστερη λόγω της τοπικότητας. Στη λειτουργία βασικής υποδομής, ο έλεγχος της κινητικότητας γίνεται κυρίως από τα εμπλεκόμενα AP στο 2ο επίπεδο, ενώ όταν χρειάζεται να γίνει στο επίπεδο δικτύου (ESSs με IP σύνδεση, Εικόνα 3) χρησιμοποιούνται πρωτόκολλα micromobility.[26]

Οι μηχανισμοί κινητικότητας είναι διαφορετικοί στο UMTS. Απαραίτητο για τη πραγματοποίηση του handover είναι ο εντοπισμός θέσης (location). Και εδώ χρησιμοποιούνται πρωτόκολλα του 2ου και 3ου επιπέδου.[26]

Το ETSI (European Telecommunications Standards Institute) έχει ορίσει την επιτρεπτή από άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση, για 5 κλάσεις QoS (εικόνα 4)[8].

	3 (WIDEBAND)	2 (NARROWBAND)			1 (BEST EFFORT)
		2H (HIGH)	2M (MEDIUM)	2A (ACCEPTABLE)	
End-to-end Delay	< 100 ms	< 100 ms	< 150 ms	< 400 ms	< 400 ms

Εικόνα 4. [8]

Η κλάση 3 προσφέρει εμπειρία καλύτερη από το PSTN, η 2H παρόμοια του ISDN, οι 2M και 2A παρόμοια της κινητής τηλεφωνίας ενώ η best effort προσφέρει υπηρεσίες χωρίς εγγυημένη απόδοση[8]. Καθυστέρηση >200ms σε μεταδόσεις φωνής είναι ενοχλητική.[6]

2.5 Η πιστοποίηση αυθεντικότητας στα 3G και τα WLAN

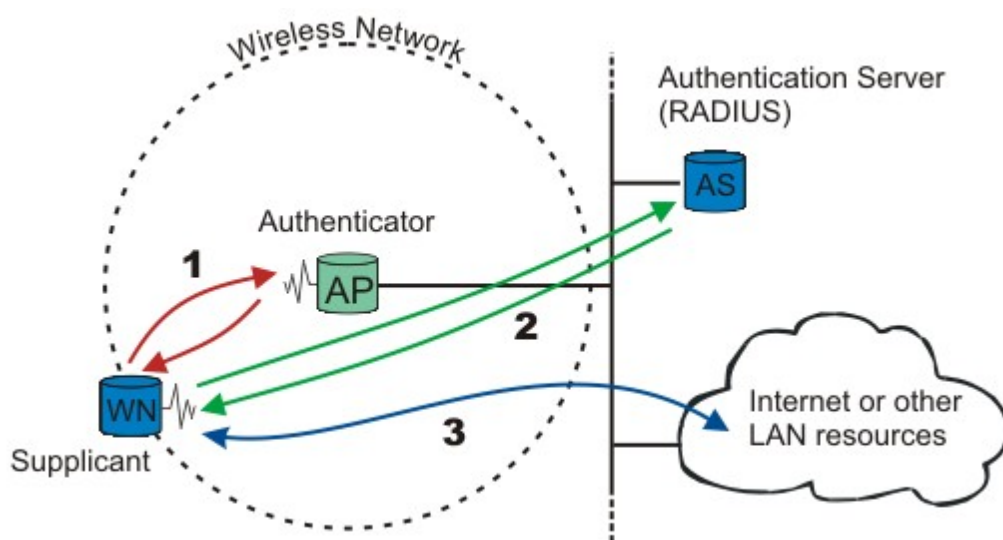
Στα WLANs, χρησιμοποιείται το πρότυπο 802.1X όπου ο έλεγχος πρόσβασης βασίζεται στο

συνδυασμό των πρωτοκόλλων AAA και EAP. Το EAP είναι ένα πλαίσιο κανόνων (framework) και όχι ένας συγκεκριμένος μηχανισμός πιστοποίησης αυθεντικότητας. Ο μηχανισμός του ελέγχου της πρόσβασης συγκεκριμενοποιείται με τη χρήση των AAA πρωτοκόλλων όπως το RADIUS (Remote Authentication Dial-In User Service) ή της αναβάθμισής του Diameter.

Στο 802.1X ορίζονται τρεις οντότητες. Ο σταθμός που θέλει να συνδεθεί (supplicant), ο authentication server που ελέγχει το δικαίωμα πρόσβασης και ο authenticator που μεσολαβεί ανάμεσα στους δύο προηγούμενους. Η διαδικασία πρόσβασης έχει 3 στάδια (Εικόνα 5). [30][10][11]

- Ο authenticator επικοινωνεί με τον supplicant και ανταλλάσσουν EAP πλαίσια μέσω του πρωτοκόλλου EAPOL (EAP-Over-LAN).
- Ο authenticator επανασυνθέτει τις πληροφορίες σε κατάλληλα AAA μηνύματα ανάλογα με το υλοποιούμενο AAA πρωτόκολλο (π.χ. RADIUS) και τα προωθεί στον authentication server για την πιστοποίηση αυθεντικότητας. Ο authenticator μεσολαβεί ανάμεσα στον supplicant και τον authentication server στην ανταλλαγή μηνυμάτων.
- Ο authenticator επιτρέπει ή αποκλείει τη πρόσβαση του supplicant στο δίκτυο.

Ο authenticator μπορεί να βρίσκεται στο AP (Access Point) όπως στο σχήμα, ή να είναι κάποιο άλλο στοιχείο του WLAN, όπως ένας AAA proxy.



Εικόνα 5 [30]

Στα 3G ο έλεγχος πρόσβασης γίνεται με το μηχανισμό EAP-AKA (Extensible Authentication Protocol - Authentication and Key Agreement) ο οποίος χρησιμοποιεί την εφαρμογή της USIM (Universal Subscriber Identity Module) που τρέχει στη κάρτα UICC (Universal Integrated Circuit Card) της συσκευής του χρήστη.

Μετά τον έλεγχο αυθεντικότητας του συνδρομητή δημιουργούνται τα κλειδιά κρυπτογράφησης και ακεραιότητας της συνόδου από το μυστικό κλειδί που είναι αποθηκευμένο στη μονάδα USIM, καθώς και στο AuC (κέντρο πιστοποίησης αυθεντικότητας). [26]

Το επίπεδο ασφάλειας του ενοποιημένου δικτύου, θα είναι αυτό του πιο αδύνατου κρίκου του, του WLAN. Τα δύο δίκτυα πρέπει να ενοποιηθούν με τρόπο ώστε, να παρέχεται ενιαία και όχι συμπληρωματική ασφάλεια. Επίσης να υπάρχει η απαραίτητη ανεξαρτησία ώστε παραβίαση του ενός να μην επιτρέπει την παραβίαση ολόκληρου του συστήματος. [26]

2.6 Η ποιότητα υπηρεσίας στα 3G και τα WLAN

Στα 3G δίκτυα η πρόσβαση στο κοινό μέσο γίνεται με το CDMA (Code Division Multiple Access). Ο χρήστης MS (Mobile Station) συνδέεται με το σταθμό βάσης BS μέσω μίας διαδικασίας δύο σταδίων, αίτησης και απόδοσης πρόσβασης. Για τη σύνδεση, ο MS στέλνει μέσω ενός καναλιού ανταγωνισμού την αίτηση για σύνδεση στον BS. Αυτός επιβεβαιώνει τη λήψη του αιτήματος, δεσμεύει πόρους για τη μετάδοση και ενημερώνει σχετικά τον MS. Υπάρχει κεντρικός έλεγχος στη πρόσβαση και δέσμευση των πόρων.[26]

Στα WLAN η πρόσβαση βασίζεται στον ανταγωνισμό. Στο CSMA/CA οι MS και AP ανταγωνίζονται για τη πρόσβαση στο μέσο. Δεν υπάρχει κεντρικός έλεγχος. Ο καταναμημένος και ανταγωνιστικός τρόπος πρόσβασης στο μέσο έχει σαν αποτέλεσμα τη χαμηλή ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας. [26]

3 Interworking

3.1 Σενάρια interworking

Η 3GPP περιγράφει 6 σενάρια 3G/WLAN interworking [2]. Τα σενάρια αυτά είναι βαθμωτά. Ξεκινούν από τις βασικότερες προϋποθέσεις και συνεχίζουν προσθέτοντας βήματα για τη πλήρη ενοποίηση.

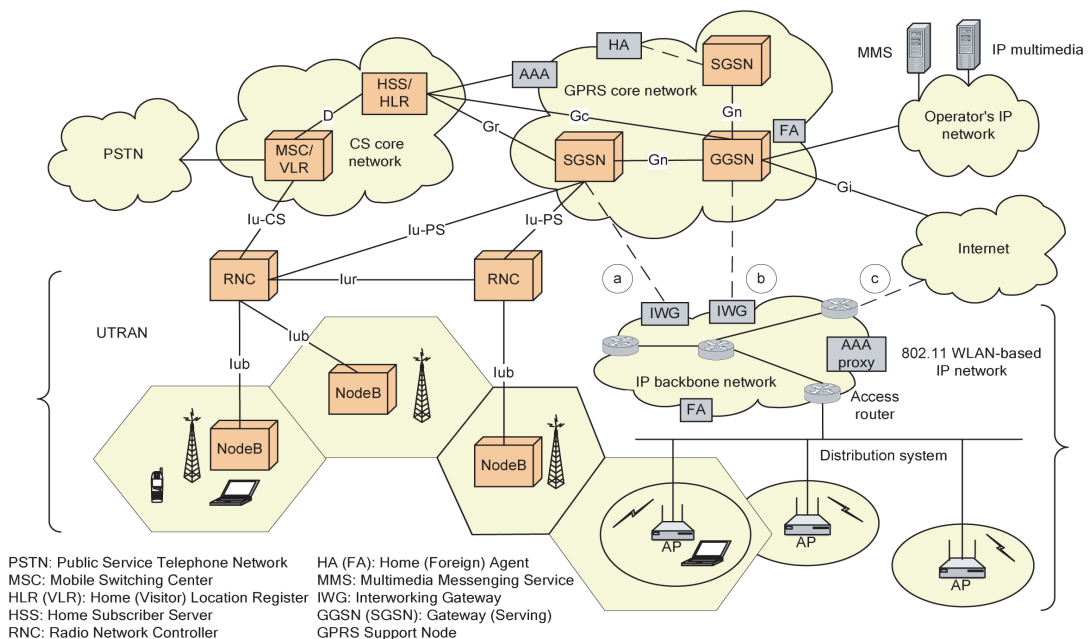
Πίνακας 1 : Τα σενάρια και οι δυνατότητές τους [1]

Σενάρια:	Σενάριο 1: Κοινή χρέωση και φροντίδα πελάτη	Σενάριο 2: Πρόσβαση, έλεγχος και χρέωση βασισμένη στο 3G	Σενάριο 3: Πρόσβαση στις PS υπηρεσίες του 3G	Σενάριο 4: Συνέχεια υπηρεσίας	Σενάριο 5: Διαφανής συνέχιση σύνδεσης	Σενάριο 6: Πρόσβαση στις CS υπηρεσίες του 3G
Υπηρεσίες και λειτουργίες:						
Κοινή χρέωση	X	X	X	X	X	X
Κοινή φροντίδα πελάτη	X	X	X	X	X	X
Πρόσβαση βασισμένη στο 3G		X	X	X	X	X
Χρέωση βασισμένη στο 3G		X	X	X	X	X
Πρόσβαση στις PS υπηρεσίες του 3G από το WLAN			X	X	X	X
Συνέχιση της υπηρεσίας κατά την μετακίνηση ανάμεσα στα 3G/WLAN				X	X	X
Διαφανής στο χρήστη συνέχεια σύνδεσης					X	X
Πρόσβαση στις CS υπηρεσίες του 3G με διαφανή συνέχεια σύνδεσης						X

3.2 Αρχιτεκτονικές διασύνδεσης 3G/WLAN

Με κριτήριο την ανεξαρτησία των δύο δικτύων, έχουμε τις αρχιτεκτονικές διασύνδεσης στενής σύζευξης (tightly-coupled) και χαλαρής σύζευξης (loosely-coupled)

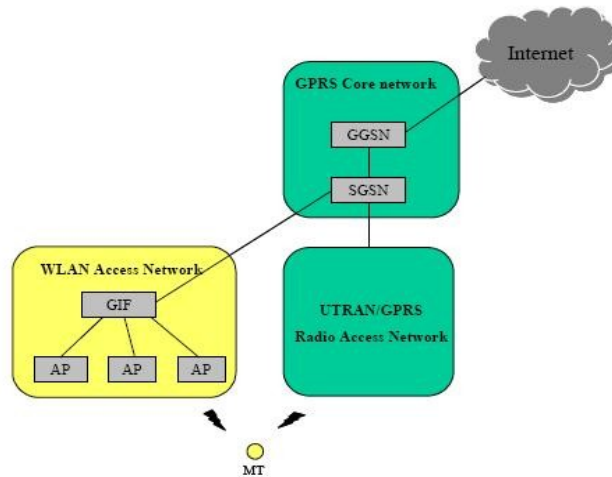
3.2.1 Στενή σύζευξη



Εικόνα 6 [26]

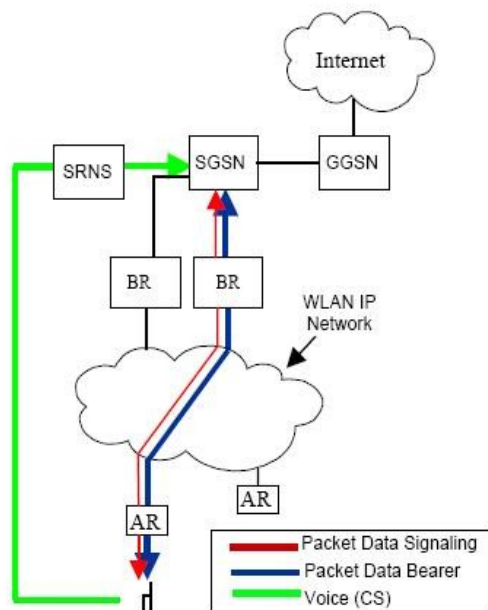
Στη στενή σύζευξη το WLAN συνδέεται στο 3G δίκτυο σαν ένας επιπλέον σταθμός 3G ασύρματης πρόσβασης. Στην εικόνα 6 εμφανίζονται δύο τέτοιες περιπτώσεις διασύνδεσης, με τις γραμμές a και b. Στη κάθε μία από αυτές προτείνεται διαφορετικό σημείο διασύνδεσης. Αναφέρονται και σαν very tightly-coupled (a), και tightly-coupled (b).

Η περίπτωση διασύνδεσης στον SGSN (a) έχει προταθεί στο [24]. Η διασύνδεση γίνεται μέσω της πύλης διασύνδεσης GIF (Gateway Interworking Function), η οποία διεκπεραιώνει τη διαπραγμάτευση, την ανταλλαγή παραμέτρων QoS και τη δρομολόγηση μεταξύ των δύο δικτύων, ώστε να ενσωματώνεται το WLAN στον SGSN με τρόπο διάφανο στα πρωτόκολλα των ανώτερων επιπέδων (Εικόνα 7). [14]



Εικόνα 7 [14]

Μία άλλη περίπτωση διασύνδεσης στο SGSN δίνεται στο [12](Εικόνα 8). Η διασύνδεση γίνεται μέσω των δρομολογητών BR (Border Routers). Για τη κινητικότητα χρησιμοποιείται η Mobile IP, μηχανισμός που περιγράφεται παρακάτω. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη παράλληλη σύνδεση με το CS και το PS δίκτυο, για ταυτόχρονη επικοινωνία φωνής και δεδομένων. Αυτό είναι ιδιαίτερα ελκυστικό, αφού το WLAN μπορεί προς το παρόν να υποστηρίξει κυρίως υπηρεσίες best-effort.[26][14]



Εικόνα 8. [12]

Στο [27] προτείνεται η διασύνδεση του WLAN στο UMTS μέσω μίας νέας λογικής μονάδας που λέγεται VGSN (Virtual GPRS Support Node). Τα δύο δίκτυα μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα, προσφέροντας παράλληλα υπηρεσίες περιαγωγής στους πελάτες τους. Η διασύνδεση μπορεί να γίνει είτε στον SGSN είτε στον GGSN. Ο VGSN μπορεί να βρίσκεται σε ένα καινούργιο κόμβο, σε έναν από τους SGSN- GGSN ή τη πύλη διασύνδεσης του WLAN. Ο VGSN είναι η πύλη των δύο συστημάτων. Από τη μεριά του GPRS γίνεται αντιληπτός σαν ένα κόμβος GSN (GPRS Support Node), ενώ από τη μεριά του WLAN σαν ένας δρομολογητής πρόσβασης (access router). [14]

Η αρχιτεκτονική tightly-coupled φέρεται να έχει κάποια καθοριστικά μειονεκτήματα όπως:[26]

- Την κατεύθυνση της κυκλοφορίας του WLAN στο κορμό του 3G δικτύου με αποτέλεσμα την υπερφόρτωσή του (bottleneck), αφού δεν έχει σχεδιαστεί για αυτή τη χρήση.
- Το WLAN πρέπει να έχει στοίβα πρωτοκόλλου συμβατή με αυτή των κυψελωτών δικτύων.
- Η στενή σχέση ανάμεσα στα δίκτυα εκθέτει την ασφάλεια του UMTS. Το 3G και το WLAN πρέπει να ανήκουν στον ίδιο πάροχο.

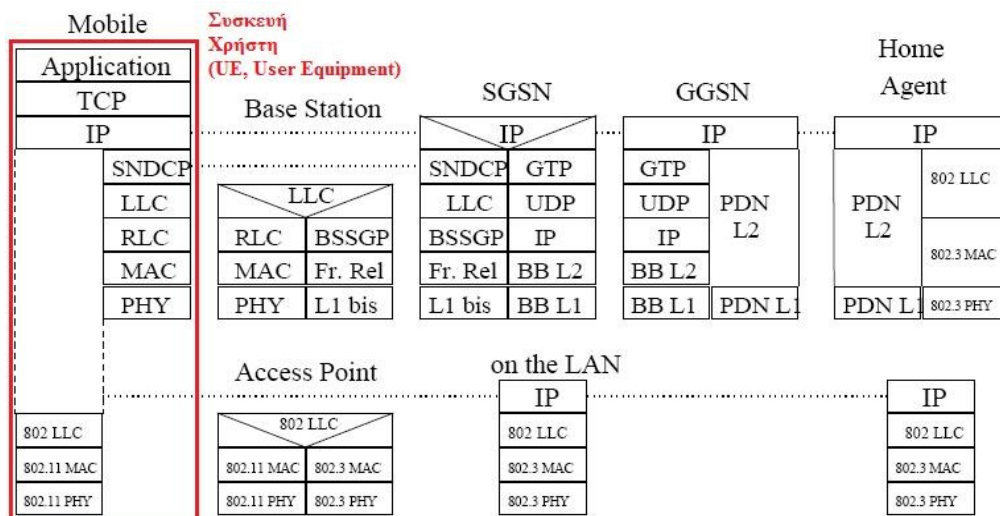
3.2.2 Χαλαρή σύζευξη

Η αρχιτεκτονική της χαλαρής σύζευξης απεικονίζεται σχηματικά στην εικόνα 6 με τη γραμμή c. Εδώ τα δύο δίκτυα δεν συνδέονται απ' ευθείας αλλά μέσω ενός IP δικτύου (Internet). Για την υλοποίηση αυτή απαιτούνται μικρές μόνο αλλαγές στο πρότυπο του WLAN, ενώ εξασφαλίζεται η ευελιξία και η ανεξαρτησία των δύο δικτύων στην υιοθέτηση ξεχωριστών μηχανισμών. Το μειονέκτημα της προσέγγισης αυτής είναι η μεγάλη διαδρομή των μηνυμάτων διαπραγμάτευσης (signalling) ανάμεσα στα δύο δίκτυα, με αποτέλεσμα μεγάλες καθυστερήσεις κατά το handover (handover latency). [26]

Η χαλαρή διασύνδεση φέρεται σαν η προτιμητέα υλοποίηση, και από τη πλευρά των WLAN αλλά και των κυψελωτών δικτύων, αφού απαιτεί ελάχιστες μετατροπές και επιτρέπει τη σταδιακή διασύνδεση hotspots.

Οι προτεινόμενοι μηχανισμοί κινητικότητας, πιστοποίησης αυθεντικότητας και υποστήριξης QoS στη χαλαρή σύζευξη παρουσιάζονται παρακάτω.

3.3 Οι συσκευές των χρηστών



Εικόνα 9 [29]

Οι συσκευές των χρηστών (UE, User Equipment) θα πρέπει να έχουν δύο διεπαφές, για διασύνδεση

στο 3G και WLAN δίκτυο (dual-mode). Στην εικόνα 9 απεικονίζεται η διαστρωμάτωση του UE και του 3G/WLAN δικτύου σε αρχιτεκτονική loosely-coupled με έλεγχο κινητικότητας στο επίπεδο δικτύου.

3.4 Η κινητικότητα στο 3G/WLAN

Στα 3G δίκτυα η διαχείριση της κινητικότητας γίνεται κυρίως στο 2ο επίπεδο (αλλά και στο επίπεδο δικτύου). Στην **tightly-coupled** αρχιτεκτονική τα WLAN ενσωματώνονται σαν 3G σταθμοί πρόσβασης και υιοθετούν το μηχανισμό κινητικότητας των 3G δικτύων[26].

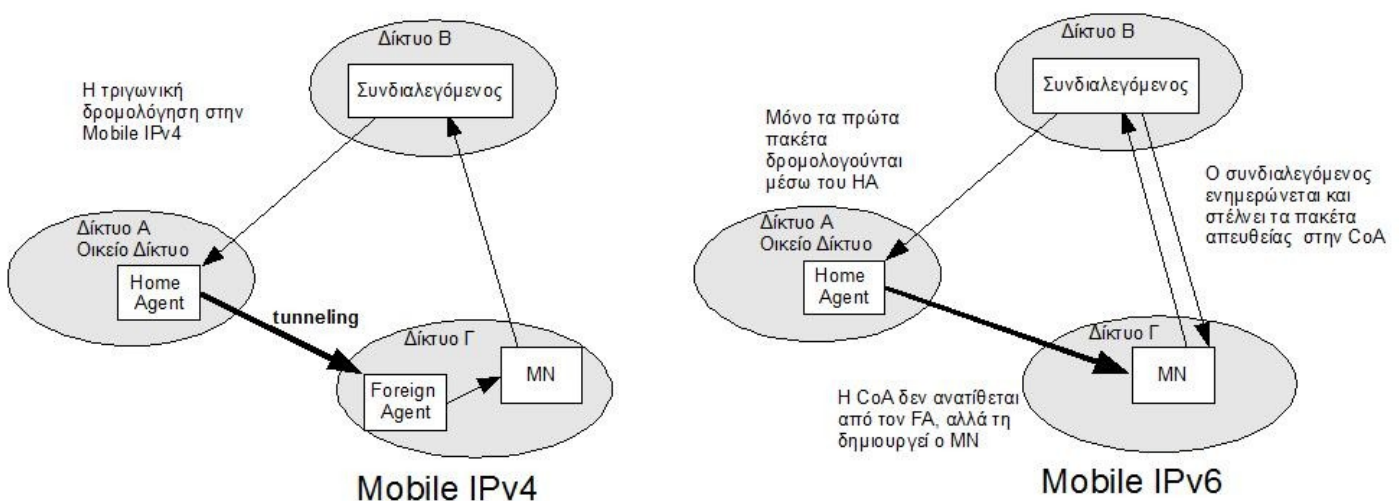
Διάφορα πρωτόκολλα κινητικότητας λειτουργούν σε διαφορετικά επίπεδα όπως, ζεύξης, δικτύου, μεταφοράς και εφαρμογής[6]. Η εξάρτηση των πρωτοκόλλων αυτών από το δίκτυο μειώνεται καθώς μετακινούμαστε στα υψηλότερα επίπεδα.

Το δημοφιλέστερο πρωτόκολλο κινητικότητας σε επίπεδο δικτύου, είναι το MIP (Mobile IP) [20][13][26].

Το MIP είναι ένα πρωτόκολλο σχεδιασμένο ώστε, να επιτρέπει τους κινητούς σταθμούς (MS) να μετακινούνται ανάμεσα σε δίκτυα με διαφορετική IP διεύθυνση. Για να γίνει αυτό ο MS έχει δύο IP διευθύνσεις. Τη μόνιμη (του οικείου δικτύου - Home Network) και μία βοηθητική CoA (Care of Address) σε περίπτωση μετακίνησής του σε άλλο δίκτυο. Σε κάθε υποδίκτυο ένας Home Agent (HA) αποθηκεύει πληροφορίες για τους MS που ανήκουν στο δίκτυό του. Όταν ο MS επισκεφθεί ένα άλλο δίκτυο, ένας Foreign Agent (FA) αναθέτει στον επισκέπτη μία CoA, και ενημερώνει τον Home Agent του MS.

Όποιος θέλει να επικοινωνήσει με τον MS, το κάνει χρησιμοποιώντας σαν διεύθυνση προορισμού τη μόνιμη διεύθυνσή του. Η διεύθυνση αυτή δείχνει στο δίκτυο του HA. Ο HA παραλαμβάνει τα πακέτα που προορίζονται για τον MS και τα προωθεί με tunneling, με διεύθυνση προορισμού τη CoA. Ο FA παραλαμβάνει το αναδρομολογημένο πακέτο, το αποθυλακώνει και το παραδίδει στον MS.

Με το τρόπο αυτό οι αλλαγές της IP του MS είναι διαφανείς στα ανώτερα επίπεδα. Το μειονέκτημα είναι η αύξηση της διαδρομής και της καθυστέρησης εξαιτίας της τριγωνικής δρομολόγησης. Το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπισθεί με βελτιστοποίηση της διαδρομής, όπου εγκαθίσταται απευθείας διαδρομή ανάμεσα στους σταθμούς που επικοινωνούν. Η παραπάνω διαδικασία υποστηρίζεται στην MIPv6 (Εικόνα 10). [1]



Εικόνα 10

Ένα άλλο πρόβλημα είναι η επιβάρυνση του δικτύου με ενημερώσεις του HA για τη θέση του MS. Αυτό κάνει τη MIP καταλληλότερη για macromobility, με σπάνιες interdomain μετακινήσεις. Για τη micromobility, χρησιμοποιούνται παραλλαγές της MIP με λιγότερο signaling (Mobile IP regional registration, hierarchical MIP, IDMP, cellular IP, HAWAII).

Στη **loosely-coupled** αρχιτεκτονική, έχει προταθεί η χρήση της MIP για τη κινητικότητα στο 3G/WLAN. [24] [7]

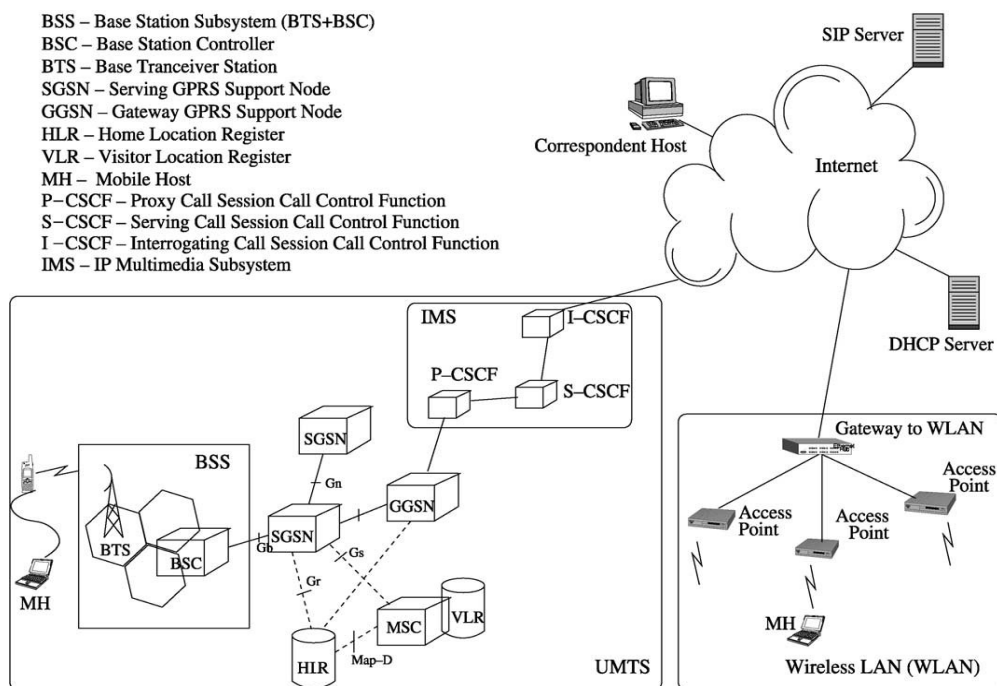
Στο [4] έχει προταθεί μία διαστρωματική (cross-layer) λύση υποστήριξης της κινητικότητας. Χρησιμοποιούνται micromobility πρωτόκολλα για την intradomain κινητικότητα, ενώ για την interdomain χρησιμοποιείται ένα διαστρωματικό πρωτόκολλο. Ο έλεγχος γίνεται στο επίπεδο δικτύου, με τη βοήθεια αναφορών του επιπέδου γραμμής δεδομένων. Με την έγκαιρη ανίχνευση στο 2ο επίπεδο πιθανού interdomain handover, ξεκινάει η διαδικασία πιστοποίησης αυθεντικότητας, εξουσιοδότησης και καταχώρισης MIP, πριν το πραγματικό handover. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της καθυστέρησης κατά το interdomain handover, ώστε να είναι συγκρίσιμη με αυτή του intradomain.

Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν πρωτόκολλα κινητικότητας της γραμμής μεταφοράς, για την αποφυγή διακοπής TCP συνδέσεων εξαιτίας αλλαγής της IP κατά τη μετακίνηση. Η προσέγγιση αυτή προσφέρει ανεξαρτησία στα υποκείμενα επίπεδα του δικτύου, αλλά αναθέτει περισσότερες λειτουργίες στα τερματικά, καθώς και την ανάγκη τροποποίησής τους. Τέτοιες λύσεις, είναι οι TCP-Migrate και η SCTP (Stream Control Transmission Protocol). [17][25][26]

Μία άλλη λύση είναι, η χρήση πρωτοκόλλων στο επίπεδο εφαρμογής, αποφεύγοντας τροποποιήσεις στις υποδομές των δικτύων, αλλά και τις στοιβές πρωτοκόλλων. Το επί πλέον μειονεκτήματα είναι η μεγαλύτερη καθυστέρηση στο handover. Μία τέτοια περίπτωση είναι η χρήση του SIP (Session Initiation Protocol) [6] (Εικόνα 11). Το SIP είναι πρωτόκολλο εγκατάστασης και λύσης συνόδων και χρησιμοποιείται στη μετάδοση πολυμέσων. Η εφαρμογή του προϋποθέτει την ύπαρξη ενός SIP server. Η SIP έγινε αποδεκτή από τη 3GPP το 2000, σαν πρωτόκολλο διαπραγμάτευσης για την εγκατάσταση συνόδων εφαρμογών πολυμέσων πραγματικού χρόνου. Στο [6], τα σενάρια συνοψίζονται στα:

- MH (mobile host) μετακινείται προς το UMTS (ελάχιστη καθυστέρηση handover 1.4048 s για κανάλι εύρους 128 kbps)
- MH μετακινείται προς το WLAN (ελάχιστη καθυστέρηση handover 0.2 ms για WLAN 11 Mbps).

Ο συγγραφέας προτείνεται την ανάπτυξη τεχνικών soft handover και προληπτικής δέσμευσης πόρων για τη βελτίωση του handover της πρώτης περίπτωσης.



Εικόνα 11 [6]

Στο [21] προτείνεται ένα σχήμα πολυεπίπεδου ελέγχου κινητικότητας, όπου η micromobility υποστηρίζεται από intradomain πρωτόκολλα, ενώ η macromobility αντιμετωπίζεται από ένα υβριδικό σχήμα όπου για τις εφαρμογές πραγματικού χρόνου χρησιμοποιείται η SIP, ενώ για αυτές μη πραγματικού χρόνου η MIP. Η κινητικότητα συνδυάζεται με την AAA διαπραγμάτευση για συντομότερο handover.

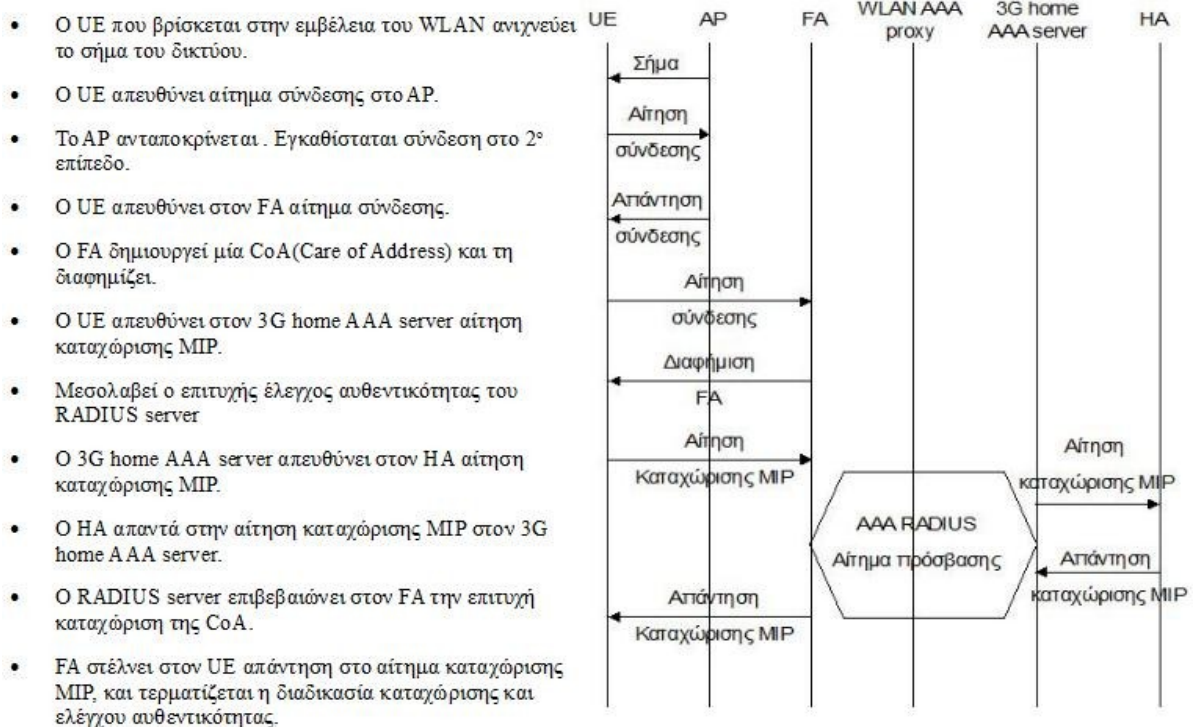
3.5 Η πιστοποίηση αυθεντικότητας στο 3G/WLAN

Στο ενοποιημένο δίκτυο, οι UE θα χρειάζονται μόνο ένα συμβόλαιο σύνδεσης, το πιθανότερο με τον 3G παροχέα, ο οποίος θα κάνει και την πιστοποίηση αυθεντικότητας του χρήστη. Αυτός θα έχει συμφωνίες περιαγωγής με παροχείς υπηρεσίας WLAN ή δικά του ιδιόκτητα WLANs.

Δεδομένης της ευελιξίας του, η 3GPP σύστησε τη χρήση ενός AAA server για τις απαιτήσεις του interworking. Η πιστοποίηση αυθεντικότητας, η εξουσιοδότηση και η χρέωση, ελέγχονται από τον οικείο AAA server, ενώ οι πληροφορίες σχετικές με το προφίλ του συνδρομητή ζητούνται από τους HLR και AuC.

Στο [5], εισάγεται η οντότητα χειριστής WLAN (OWLAN, OperatorWLAN). Ο ρόλος του OWLAN είναι να ενθυλακώσει την συνήθη GSM σηματοδότηση (βασισμένη στην USIM) σε IP πακέτα και να τα προωθήσει στον AAA server, ο οποίος κάνει την πιστοποίηση αυθεντικότητας. Το μειονέκτημα του σχεδιασμού είναι ότι δεν είναι συμβατός με τα τρέχοντα IP και WLAN πρότυπα. [26]

Στο [7] περιγράφεται ο έλεγχος αυθεντικότητας στο επίπεδο δικτύου με τη χρήση της MIP σε loosely-coupled δίκτυο. Ο σχεδιασμός αυτός εισάγει 2 νέα στοιχεία. Μία πύλη διασύνδεσης του WLAN, και την εφαρμογή πελάτη του UE. Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι η πιστοποίηση αυθεντικότητας γίνεται παράλληλα με τη διαδικασία ανάθεσης MIP, συντομεύοντας το handover. Ένα παράδειγμα περιγράφεται στο παρακάτω call flow διάγραμμα και βασίζεται στο [26].



Εικόνα 12

Η πιστοποίηση αυθεντικότητας μπορεί να γίνεται στο επίπεδο της εφαρμογής. Στο [7] περιγράφεται μία τέτοια περίπτωση για HTTP υπηρεσίες. Εδώ, το HTTP αίτημα εντοπίζεται από ένα φίλτρο της πύλης διασύνδεσης, και επαναπροωθείται μέσω ασφαλούς HTTPS σύνδεσης στη σελίδα login. Ο κωδικός πρόσβασης και το όνομα χρήστη που εισάγονται, ελέγχονται από τον AAA server.

Συμπερασματικά, [26]

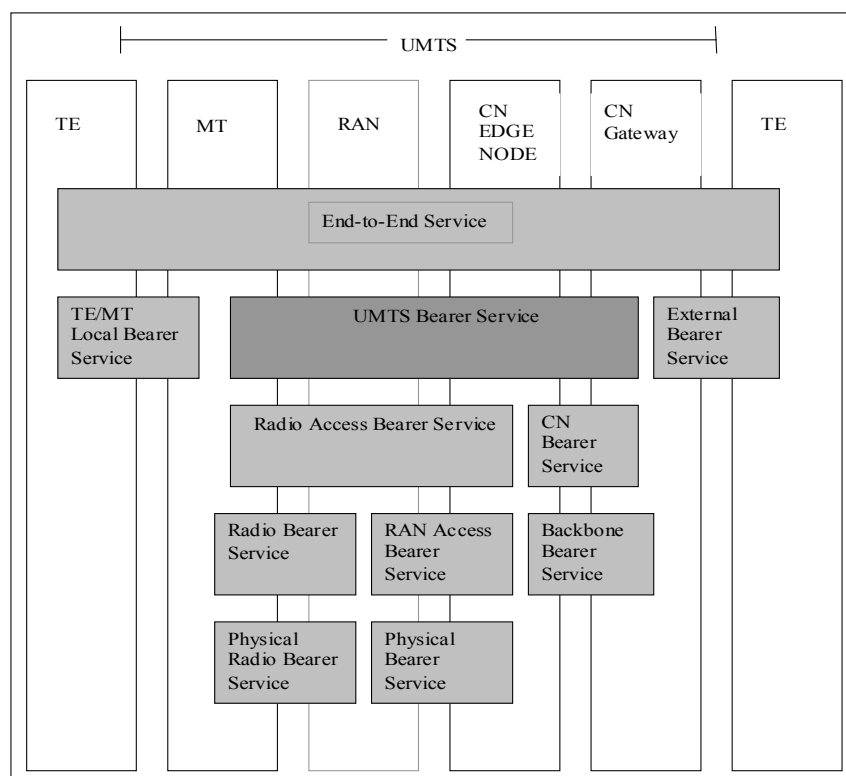
- χάρη στην υιοθέτηση του ευέλικτου AAA σχήματος, μπορούν να χρησιμοποιούνται οι μηχανισμοί πιστοποίησης αυθεντικότητας του 3G μέσω του WLAN. Τα WLAN μπορούν παράλληλα να υλοποιούν τις μεθόδους της αρεσκείας τους (π.χ. EAP-MD5, EAP-TLS).

- Με την ενιαία αντιμετώπιση της κινητικότητας, πιστοποίησης αυθεντικότητας και εξουσιοδότησης, μπορεί να συντομευτεί η διαδικασία διαπραγμάτευσης.
- Τέλος η πιστοποίηση αυθεντικότητας σε υψηλότερα επίπεδα, προσφέρει μεν ανεξαρτησία από τις υποκείμενες τεχνολογίες, αλλά έχει μεγαλύτερη καθυστέρηση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε ορισμένες υπηρεσίες (HTTP).

3.6 QoS στο 3G/WLAN

Τα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα θα πρέπει να υποστηρίζουν τη μετάδοση υπηρεσιών πολυμέσων, τα οποία είναι και κινητήρια δύναμη για την διασύνδεση 3G/WLAN. Αυτές απαιτούν από άκρο-σε-άκρο μεγαλύτερο bandwidth και καλύτερη QoS, μέσω διαφορετικών τμημάτων δικτύων όπως, τα δίκτυα πρόσβασης 3G, το δίκτυο κορμού 3G, το δίκτυο πρόσβασης WLAN, το IP backbone δίκτυο και το Internet. Η αρχιτεκτονική QoS που θα επιλεγεί πρέπει να ανταποκρίνεται στα παρακάτω.[26]

- Χαρακτηριστικά QoS : Πρέπει να είναι ανεξάρτητα της τεχνολογίας του κάθε τμήματος δικτύου.
- Πρωτόκολλα διαπραγμάτευσης QoS: Δεν είναι απαραίτητο να είναι κοινά σε όλες τις περιοχές δικτύων, πρέπει όμως να συνεργάζονται για την ανταλλαγή των σταθερών-αρχικών μηνυμάτων σε όλη την από άκρο-σε-άκρο διαδρομή.
- Μηχανισμοί QoS: Πρέπει να υπάρχουν οι κατάλληλοι μηχανισμοί ελέγχου κυκλοφορίας, προγραμματισμού γεγονότων (scheduling) σε κάθε περιοχή δικτύου.



Εικόνα 13

Στο UMTS, έχει καθοριστεί μία αρχιτεκτονική στρωμάτων QoS [3]. Η από άκρο-σε-άκρο απαίτηση αναλύεται σε επί μέρους απαιτήσεις στα διάφορα τμήματα του δικτύου (Εικόνα 13).

Σε ότι αφορά τα IP δίκτυα υπάρχουν δύο αρχιτεκτονικές QoS. Αυτή των ενιαίων υπηρεσιών, IntServ (Integrated Services) και αυτή των διαφοροποιημένων υπηρεσιών DiffServ (Differentiated Services).[26]

- Στην IntServ, δεσμεύονται πόροι κατά μήκος της από άκρο-σε-άκρο διαδρομής

προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις QoS κάθε ροής. Κάθε ροή ανανεώνει περιοδικά τη δέσμευση πόρων. Προσφέρει εγγυημένη QoS αλλά δεν εφαρμόζεται ικανοποιητικά σε μεγάλα δίκτυα.

- Στην DiffServ ασκείται έλεγχος της συνολικής κυκλοφορίας. Οι ροές κατηγοριοποιούνται σε κλάσεις, στις διάφορες επί μέρους περιοχές του δικτύου, με βάση τη τιμή του πεδίου Τύπος Υπηρεσίας (ToS) των IP πακέτων. Τα πακέτα αντιμετωπίζονται, σε κάθε κόμβο (Per-Hop Behaviour), ανάλογα με τη προτεραιότητα της κλάσης. Δεν έχουμε δέσμευση πόρων από άκρο-σε-άκρο, αλλά ένα συνολικό - στατιστικό έλεγχο που δεν προσφέρει εγγυημένη QoS. Εφαρμόζεται όμως το ίδιο ικανοποιητικά σε μικρά και μεγαλύτερα δίκτυα (scalable).

Στα [18][19][9], προτείνεται η διαχείριση του QoS σε επίπεδο δικτύου συνδυάζοντας το IntServ και το DiffServ. Στο [18], στα ασύρματα δίκτυα πρόσβασης (σχετικά μικρή κυκλοφορία) γίνεται δέσμευση πόρων με το IntServ. Στο δίκτυο κορμού γίνεται διαχείριση της QoS με το DiffServ.

Παρόμοια και στο [19], για MIPv6. Εδώ εισάγεται και η οντότητα μεσάζοντα QoS (QoS Broker), ο οποίος βρίσκεται σε κάθε τομέα δικτύου και διαπραγματεύεται τη διαχείριση των πόρων. Σε κάθε τομέα, οι διαπραγματεύσεις QoS ενσωματώνονται στον έλεγχο κινητικότητα και πιστοποίησης αυθεντικότητας.

Στο [9] η διαχείριση της QoS γίνεται τοπικά από αντιπροσώπους, παράλληλα με τον έλεγχο κινητικότητας.

Παράλληλος έλεγχος κινητικότητας και QoS έχει προταθεί και στο [16].

4 Συμπεράσματα, Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην εργασία αυτή έγινε μία επισκόπηση μεθόδων για τη διασύνδεση των 3G και WLAN δικτύων. Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκαν:

- η αρχιτεκτονική διασύνδεσης
- η κινητικότητα
- η πιστοποίηση αυθεντικότητας και
- η παρεχόμενη QoS

Σε ότι αφορά την διασύνδεση, εξετάστηκαν οι αρχιτεκτονικές χαλαρής και στενής ζεύξης. Η αρχιτεκτονική χαλαρής ζεύξης φέρεται σαν η προτιμητέα προσέγγιση, κυρίως λόγω της ευελιξίας της και των μικρών επεμβάσεων που απαιτεί. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι οι μεγάλες διαδρομές και οι καθυστερήσεις που συνεπάγονται.

Αναφέρθηκαν διάφορες προσεγγίσεις για τον έλεγχο κινητικότητας σε διαφορετικά επίπεδα. Μία δημοφιλής προσέγγιση, είναι αυτή της Mobile IP, καθώς είναι γενικά αποδεκτό ότι τα δίκτυα του μέλλοντος θα είναι all-ip δίκτυα. Ενδιαφέρουσα ωστόσο είναι και η αντιμετώπισή της στα άλλα επίπεδα, καθώς και τα πολυεπίπεδα μοντέλα.

Για την πιστοποίηση αυθεντικότητας προτείνεται η χρήση ενός AAAserver από τη μεριά του 3G δικτύου και η υιοθέτηση των μηχανισμών EAP-AKA με τη χρήση της USIM του UE μέσω του WLAN. Παρουσιάστηκε και η πρόταση πιστοποίησης αυθεντικότητας σε επίπεδο εφαρμογής, με περιορισμένη εφαρμοσιμότητα.

Για την υποστήριξη της QoS προτείνεται η υιοθέτηση διαφορετικών IP πρωτοκόλλων διαπραγματεύσεως, IntServ και DiffServ, σε διαφορετικά τμήματα του δικτύου.

Για τη μείωση της καθυστέρησης στο handover, και την ελαχιστοποίηση των διαπραγματεύσεων, προτείνεται η από κοινού αντιμετώπιση των διαδικασιών κινητικότητας, πρόσβασης και QoS.

Κυρίως έχουν διερευνηθεί τα σενάρια 2 έως 5. Το σενάριο 6 για διασύνδεση του CS δικτύου δεν έχει αναλυθεί ικανοποιητικά. Η υλοποίηση του σεναρίου 1 για κοινή χρέωση, εξαρτάται από τη λύση που θα προκριθεί στα κρίσιμα ερωτήματα (διασύνδεση, κινητικότητα, πιστοποίηση αυθεντικότητας, QoS).

Πολλά ζητήματα που αφορούν τη κατανόηση και αντιμετώπιση των δυσκολιών του εγχειρήματος παραμένουν ανοιχτά. Στους στόχους μελλοντικής έρευνας μπορούν να συμπεριληφθούν:[28]

- Η περαιτέρω διερεύνηση μεθόδων handover και η βελτιστοποίηση των προτεινόμενων, με ανάπτυξη τεχνικών soft-handover για ανεπαίσθητη καθυστέρηση στη μετάβαση.
- Η περαιτέρω διερεύνηση μεθόδων δέσμευσης πόρων για εγγυημένη QoS
- Η ενιαία διαχείριση της κινητικότητας, πιστοποίησης αυθεντικότητας και QoS
- Η αξιολόγηση των διαφορετικών προσεγγίσεων και ο καθορισμός κατευθύνσεων (3GPP) για τον προσανατολισμό της έρευνας.
- Η ανάπτυξη μεθόδων χρέωσης για το 3G/WLAN δίκτυο
- Η ανάπτυξη του 6ου σεναρίου

Βιβλιογραφία

- [1] 3GPP, 2003, “Combined GSM and Mobile IP Mobility Handling in UMTS IP CN”, TR 23.923 Version 3.0.0 Release 3.
- [2] 3GPP, 2008, “Feasibility study on 3GPP system to Wireless Local Area Network (WLAN) interworking”, TR 22.934 Version 8.0.0 Release 8.
- [3] 3GPP, 2008, “Quality of Service (QoS) concept and architecture”, TR 23.107 Version 8.0.0 Release 8.
- [4] Akyildiz, I.F., Xie, J., Mohanty, S. 2004 ‘A survey of mobility management in next-generation all-IP-based wireless systems’, IEEE Wireless Communications, Vol. 11, No. 4, pp.16–28.
- [5] Ala-Laurila, J., Mikkonen, J., Rinnemaa, J. 2001 ‘Wireless LAN access network architecture for mobile operators’, IEEE Communications Magazine, Vol. 39, No. 11, pp.82–89.
- [6] Banerjee, N., Wu, W., Basu, K., Das S.K. 2003, ”Analysis of SIP-based mobility management in 4G wireless networks”, Computer Communications 27 (2004) 697–707.
- [7] Buddhikot, M.M., Chandranmenon, G., Han, S., Lee, Y-W., Miller, S., Salgarelli, L. 2003, ‘Design and implementation of a WLAN/cdma2000 interworking architecture’, IEEE Communications Magazine, Vol. 41, No. 11, pp.90–100.
- [8] ETSI 2003, End-to-end Quality of Service in TIPHON systems, TS 1021 024329-2 V02.1.15
- [9] Grilo, A., Nunes, M., Sergio, G., Ciulli, N. 2003, Integration of IP mobility and QoS for heterogeneous wireless access in MOICANE, Proceedings of the IEEE Symposium on PIMRC’03, Vol. 1, pp.470–475.
- [10] IETF, <http://www.ietf.org/rfc/rfc3748.txt>
- [11] IETF, <http://www.ietf.org/rfc/rfc2904.txt>
- [12] Jaseemuddin, M. 2003, “An Architecture for Integrating UMTS and 802.11 WLAN Networks”, Proceedings of IEEE Symposium on Computers and Communications 2003, Antalya, Turkey, pp. 716-723.
- [13] Johnson, D., Perkins, C., Arkko, J. 2004, “Mobility Support in Ipv6.”
- [14] Lampropoulos, G., Passas, N., Merakos, L., Kaloxylas, A. 2005, Handover management architectures in integrated WLAN/cellular networks,. IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 7, no. 4
- [15] Li, F. 2004, A study of mobility in WLAN, Helsinki University of Technology
- [16] Lo, S.C., Lee, G., Chen, W.T., Liuand, J.C. 2004, ‘Architecture for mobility and QoS support in all-IP wireless networks’, IEEE Journal of Selected Areas on Communications, Vol. 22, No. 4, pp.691–705.
- [17] Ma, L., Yu, F., Leung, V.C.M., Randhawa, T. 2004, “A new method to support UMTS/WLAN vertical handover using SCTP”, IEEE Wireless Communications, Vol. 11, No. 4, pp.44–51.
- [18] Manner, J., Burness, L., Hepworth, E., Lopez, A., Mitjana, E. 2002, Provision of QoS in heterogeneous wireless IP access networks, Proceedings of the IEEE Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC’02), Vol. 2, pp.530–534.
- [19] Marques, V., Aguiar, R.L., Garcia, C., Moreno, J.I., Beaujean, C., Melin, E., Liebsch, M. 2003, An IP-based QoS architecture for 4G operator scenarios, IEEE Wireless Communications, Vol. 10, No. 3, pp.54–62.
- [20] Perkins, C., 2002, “IP Mobility Support for IPv4”
- [21] Politis, C., Chew, K.A., Akhtar, N., Georgiades, M., Tafazolli, R., Dagiuklas, T. 2004, ‘Hybrid

multilayer mobility management with AAA context transfer capabilities for all-IP networks', IEEE Wireless Communications, Vol. 11, No. 4, pp.76–88.

[22] Qualcomm, 2008, Presentation for the CDG Technology, Forum on Inter-Technology Networking, San Francisco

[23] Bates, R.J. 2002, GPRS: General Packet Radio Service, McGraw-Hill Professional

[24] Salkintsiz, A., Fors, C., Pazhyannur, R. 2002, WLAN-GPRS Integration for Next Generation Mobile Data Networks, IEEE Wireless Communications, pp. 112-124.

[25] Snoeren, A.C., Balakrishnan, H. 2000, An end-to-end approach to host mobility, Proceedings of the ACM/IEEE 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, pp.155–166.

[26] Song, W., Zhuang, W., Saleh, A. 2007, "Interworking of 3G cellular networks and wireless LANs", Int. J. Wireless and Mobile Computing, Vol. 2.

[27] Tsao, S.L., Lin, C.C., 2002, "VGSN: A Gateway Approach to Interconnect UMTS/WLAN Networks", IEEE Personal, Indoor, Mobile Radio Communications.

[28] Xiao, Y., Leung, K.K., Pan Y., Du, X., 2005, "Architecture, Mobility Management, and Quality of Service for Integrated 3G and WLAN Networks", Wiley Journal of WCMC

[29] Ylianttila, M. 2005, Vertical handoff and mobility system architecture and transition analysis, University of Oulu

Εικόνες

[30] http://tldp.org/HOWTO/html_single/8021X-HOWTO/

[31] <http://shanmg.wordpress.com/3g-4g/>