



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Ενσωμάτωση Επίγειων Συστημάτων Ψηφιακής Βιντεοεκπομπής
(DVB-T) σε Δίκτυα 4ης Γενιάς**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Α. ΚΟΥΗΣ
Διπλωματούχου Μηχανικού Η/Υ & Πληροφορικής
Πανεπιστημίου Πατρών

Αθήνα, Δεκέμβριος 2004



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ενσωμάτωση Επίγειων Συστημάτων Ψηφιακής Βιντεοεκπομπής (DVB-T) σε Δίκτυα 4ης Γενιάς

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Α. ΚΟΥΗΣ

Συμβουλευτική Επιτροπή : Μιχάλης, Ε. Θεολόγου

Ευστάθιος, Ε., Συκάς

Μιλτιάδης, Αναγνώστου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 21^η Δεκεμβρίου 2004.

.....
Μιχαήλ Θεολόγου
Καθηγητής ΕΜΠ.

.....
Ευστάθιος Συκάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Μιλτιάδης Αναγνώστου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Εμμανουήλ Πρωτονοτάριος
Καθηγητής ΕΜΠ.

.....
Νικόλαος Μήτρου
Καθηγητής ΕΜΠ.

.....
Ιωάννης Αβαριτσιώτης
Καθηγητής ΕΜΠ.

.....
Παναγιώτης Δεμέστιχας
Επίκουρος Καθηγητής
Πανεπιστήμιο Πειραιά

Αθήνα, Δεκέμβριος 2004

.....
ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Α. ΚΟΥΗΣ

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

Copyright © ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Α. ΚΟΥΗΣ,
2004.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Πρόλογος

Τα συστήματα DVB αποτελούν την κυριότερη προσπάθεια για την μετάβαση στην ψηφιακή εποχή των υπηρεσιών τηλεόρασης. Η παρούσα διδακτορική διατριβή επικεντρώνεται στο πρότυπο DVB-T (Digital Video Broadcasting – Terrestrial), αφού αποτελεί το πιο εξελιγμένο τεχνολογικά σύστημα και το πιο σύγχρονο και νεώτερο πρότυπο. Είναι ιδανικό για την προσφορά «επίγειων» υπηρεσιών τηλεόρασης και υπηρεσιών IP, προσφέρει μεγάλο εύρος ζώνης στην κατεύθυνση καθόδου των δεδομένων, μικρούς χρόνους καθυστέρησης, ενώ δεν απαιτεί ιδιαίτερο εξοπλισμό στην πλευρά του χρήστη (ιδανικό για χρήστες με φορητά τεμαχικά). Η πλήρης αξιοποίηση των συστημάτων DVB-T θα προέλθει μέσω της ενσωμάτωσης τους στα Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς. Προς την κατεύθυνση αυτή παρουσιάζουμε μια ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική για την εισαγωγή των συστημάτων DVB-T σε περιβάλλοντα συνεργαζόμενων δικτύων (Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς), ενώ επιπλέον προσδιορίζουμε τις παραμέτρους και επιλύουμε το πρόβλημα Διαχείρισης Ασυρμάτων Πόρων, σε πολλαπλά συστήματα DVB-T, αρχιτεκτονικής SFN (Single Frequency Networks – Δίκτυα Μονής Συχνότητας), πάντα στα πλαίσια των Δικτύων 4^{ης} Γενιάς.

Introduction

The DVB systems represent the most important effort for the transition to the digital era of the television services. The present thesis focuses at the terrestrial part of the DVB family standards (Digital Video Broadcasting – Terrestrial), as it is the most technologically advanced. The DVB-T systems are ideal in the provision of “terrestrial” TV and IP services, due to the high downlink capacity and low delay times they offer. Also the equipment requirements both at network and user side are kept in minimum levels. The full exploitation of the DVB-T systems will only derive from their merge into the so-called 4th Generation Networks (4G). In this direction, we present a complete architecture for the insertion and cooperation of DVB-T systems with other wireless technologies, in the context of 4G Networks. Also, we define and present a solution for the Radio Resource Management problem for multiple IP-enabled DVB-T systems, organized with the SFN (Single Frequency Networks) architecture.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διδακτορικής μου διατριβής κλείνει ένας κύκλος πέντε ετών δημιουργικής ερευνητικής δραστηριότητας, στον χώρο του εργαστηρίου Τηλεπικοινωνιών, της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Η/Υ, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Διαπιστώνω με μεγάλη χαρά, ότι σε όλο αυτό το διάστημα υπήρχε ένας μεγάλος αριθμός ανθρώπων, οι οποίοι μου συμπαραστάθηκαν πνευματικά και ηθικά. Η συνεισφορά του καθενός υπήρξε καταλυτική για την επιτυχημένη ολοκλήρωση της ερευνητικής μου προσπάθειας, όπως αυτή θα εκφραστεί σε λίγο, μέσα από τις σελίδες της παρούσας διατριβής. Επομένως, η αναφορά στον ρόλο του καθενός, είναι το ελάχιστο δείγμα της απεριόριστης ευγνωμοσύνη που αισθάνομαι για τους συγκεκριμένους ανθρώπους.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή Ε.Μ.Π. μου κ. Μιχάλη Θεολόγου, ο οποίος με στήριξε σε κάθε βήμα της προσπάθειας μου και μου παρείχε κάθε δυνατή συμπαράσταση, σε επιστημονικό επίπεδο. Επίσης, θερμές ευχαριστίες εκφράζω προς τους Καθηγητές Ε.Μ.Π., κ.κ. Ε. Συκά και Μ. Αναγνώστου, για τις συμβουλές τους και την όλη τους βοήθεια και καθοδήγηση. Ιδιαίτερη τιμή, οφείλω στον Καθηγητή Ε.Μ.Π. Ε. Πρωτονοτάριο, χάρη στον οποίον ξεκίνησε η δική μου ερευνητική διαδρομή στο Εργαστήριο Τηλεπικοινωνιών του Ε.Μ.Π. Θα ήταν μεγάλη μου παράλειψη να μην απευθύνω θερμές ευχαριστίες και στον Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Ν. Μήτρου, του οποίου η συμβολή στην επιστημονική μου εξέλιξη υπήρξε καθοριστική.

Στην συνέχεια, θα ήθελα να εκφράσω την απεριόριστη μου εκτίμηση στους πολύτιμους συνεργάτες και συνοδοιπόρους μου. Ο Παναγιώτης Δεμέστιχας (καθηγητής πια στο Πανεπιστήμιο Πειραιώς), αποτέλεσε για μένα σημείο αναφοράς, αφού με τον ενθουσιασμό του και την ορθότητα της επιστημονικής του σκέψης, με καθοδηγούσε στα κρίσιμα σημεία του έργου μου. Επίσης, δεν μπορώ να μην ευχαριστήσω τον Ερευνητή του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» κ. Κ. Κοντοβάσιλη και τους συνεργάτες του, κ. Γ. Κορμέντζα και Χ. Σιάννη. Ιδιαίτερη αναφορά αξίζουν οι συνάδελφοι στο Εργαστήριο Τηλεπικοινωνιών, όχι μόνο για το ότι ήταν πάντα πρόθυμοι να με βοηθήσουν, με το υψηλό επίπεδο των επιστημονικών τους γνώσεων, αλλά και γιατί πάνω από όλα υπήρξαν πολύτιμοι φίλοι. Ευχαριστώ λοιπόν θερμά τους Π. Σταθόπουλο, Β. Τουντόπουλο, Γ. Δεσποτόπουλο, Γ. Κουντουράκη, Β. Σταυρουλάκη, Δ. Λουκάτο, Χ. Λιναρδάκη, Ν. Κουτσούρη, Α. Παπαδοπούλου και Ν. Λελίγκου.

Κλείνοντας, δε θα ήθελα να παραλείψω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε πρόσωπα οικεία, όπως οι γονείς μου (Αγγελος και Μαρία) και η αδερφή μου (Κωνσταντίνα), για την φροντίδα και την αγάπη τους, αλλά και στην θεία μου Μαρία Κουή, της οποίας η ακαδημαϊκή διαδρομή στον χώρο του Ε.Μ.Π., υπήρξε για μένα φωτεινό παράδειγμα και οδηγός.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2004

Δημήτριος Α. Κουής

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1

| | | |
|---|----------------------------------|----|
| 1 | Εισαγωγή..... | 17 |
| 2 | Δομή Διδακτορικής Διατριβής..... | 22 |

Κεφάλαιο 2

| | | |
|-------|---|----|
| 2. | Δίκτυα 4 ^{ης} Γενιάς και Συστήματα DVB-T..... | 25 |
| 2.1 | Εισαγωγή..... | 25 |
| 2.2 | Απαιτήσεις και Αρχιτεκτονικές Υλοποίησης Ασυρμάτων Δικτύων 4 ^{ης} Γενιάς (4G)..... | 26 |
| 2.3 | Στόχοι και Αποτελέσματα συναφών ερευνητικών δραστηριοτήτων στο χώρο των Δικτύων 4 ^{ης} Γενιάς..... | 32 |
| 2.4 | Αρχές Επίγειας Ψηφιακής Βιντεοεισομορφής (DVB-T)..... | 34 |
| 2.4.1 | Αρχιτεκτονική Δικτύου DVB-T – Ρόλος των SFNs..... | 35 |
| 2.4.2 | Φυσικό στρώμα..... | 39 |
| 2.4.3 | Παροχή Διαδραστικών Υπηρεσιών σε DVB-T δίκτυα..... | 42 |
| 2.4.4 | Παράγοντες που επηρεάζουν την Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS) σε ένα Τερματικό DVB-T..... | 44 |
| 2.5 | Παρόμοιες ερευνητικές δραστηριότητες και οφέλη από την ενσωμάτωση των συστημάτων DVB-T, στα πλαίσια των Δικτύων 4 ^{ης} Γενιάς..... | 45 |
| 2.5.1 | Σημαντικότερα κίνητρα και πλεονεκτήματα από την αξιοποίηση των συστημάτων DVB-T..... | 47 |
| 2.6 | Ανακεφαλαίωση..... | 49 |

Κεφάλαιο 3

| | | |
|---------|---|----|
| 3 | Ενσωμάτωση συστημάτων DVB-T σε Δίκτυα 4 ^{ης} Γενιάς..... | 51 |
| 3.1 | Εισαγωγή..... | 51 |
| 3.2 | Αρχιτεκτονική πειραματικού Δικτύου 4 ^{ης} Γενιάς σε επίπεδο δικτυακών στοιχείων..... | 53 |
| 3.2.1 | Διαχειριστής Δικτύου 4 ^{ης} Γενιάς..... | 54 |
| 3.2.2 | Ασύρματο Δίκτυο Πρόσβασης τύπου WLAN 802.11b..... | 56 |
| 3.2.2.1 | Διεπαφή Διαχειριστή-WLAN ($G_{\Delta-WLAN}$)..... | 57 |
| 3.2.3 | Ασύρματο Δίκτυο Πρόσβασης τύπου GPRS..... | 59 |
| 3.2.3.1 | Δικτυακά Στοιχεία GPRS..... | 59 |
| 3.2.3.2 | Διεπαφή Διαχειριστή-GPRS ($G_{\Delta-GPRS}$)..... | 60 |
| 3.2.4 | Ασύρματο Δίκτυο Πρόσβασης τύπου DVB-T..... | 61 |
| 3.2.4.1 | Δικτυακά Στοιχεία DVB-T..... | 61 |
| 3.2.4.2 | Διεπαφή Διαχειριστή-DVB-T ($G_{\Delta-DVBT}$)..... | 63 |
| 3.2.5 | Δικτυακά Στοιχεία Υβριδικού Πυρήνα (Δίκτυο Κορμού)..... | 64 |
| 3.2.5.1 | Δρομολογητής Δικτύου 4 ^{ης} Γενιάς - Διευθυνσιοδοσία..... | 64 |

| | | |
|-----------|---|----|
| 3.2.5.2 | Διαχείριση Κινητικότητας – Mobility Management..... | 65 |
| 3.2.5.2.1 | Βελτιστοποίηση Διασυστηματικών Μεταπομπών..... | 69 |
| 3.2.5.3 | Διαλειτουργικότητα με το GPRS NAT..... | 71 |
| 3.2.5.4 | Υποστήριξη RIP για DVB-T Δίκτυα..... | 74 |
| 3.2.5.5 | Παρεχόμενες Υπηρεσίες - Εξυπηρετητές και Προηγμένοι Πελάτες Εφαρμογών 75 | |
| 3.2.6 | Γεννήτρια Κίνησης – Αναλυτής Κίνησης (TG-TA)..... | 76 |
| 3.3 | Πρότυπα Multi-mode Τερματικά..... | 77 |
| 3.3.1 | Αρχιτεκτονική Multimode Τερματικού – Βασικές Λειτουργίες..... | 77 |
| 3.3.2 | Πρωτόκολλο Συντονισμού Προσπέλασης Δικτύου..... | 79 |
| 3.3.2.1 | Μήνυμα Αίτησης Υπηρεσίας..... | 80 |
| 3.3.2.2 | Μήνυμα Ειδοποίησης Απαιτούμενης Μεταπομπής..... | 81 |
| 3.3.2.3 | Μήνυμα Αίτησης Αναφοράς Ποιότητας..... | 82 |
| 3.3.2.4 | Λεπτομέρειες Υλοποίησης των Multi-mode Τερματικών..... | 83 |
| 3.4 | Συμπεράσματα - Σύνοψη Κεφαλαίου..... | 85 |

Κεφάλαιο 4

| | | |
|---------|---|-----|
| 4 | Πειραματική αξιολόγηση των ωφελειών που προκύπτουν μέσω της ενσωμάτωση των συστημάτων DVB-T σε Δίκτυα 4 ^{ης} Γενιάς..... | 87 |
| 4.1 | Εισαγωγή..... | 87 |
| 4.2 | Μετρήσεις Αξιολόγησης Επιδόσεων Δικτύου 4 ^{ης} Γενιάς σε Επίπεδο Συστήματος..... | 89 |
| 4.2.1 | Κανονικές Συνθήκες Λειτουργίας – Ορισμός Συντελεστών Χρησιμοποίησης..... | 89 |
| 4.2.2 | Καθυστερήση Πλήρους Διαδρομής (Round Trip Delay)..... | 93 |
| 4.2.2.1 | Αυτοδύναμη Λειτουργία GPRS..... | 93 |
| 4.2.2.2 | Αυτοδύναμη Λειτουργία WLAN..... | 94 |
| 4.2.2.3 | Λειτουργία DVB-T/GPRS..... | 96 |
| 4.2.2.4 | Λειτουργία DVB-T/WLAN..... | 97 |
| 4.2.3 | Μονόδρομη Καθυστερήση (One Way Delay)..... | 98 |
| 4.2.3.1 | Μονόδρομη Καθυστερήση στο δίκτυο GPRS..... | 99 |
| 4.2.3.2 | Μονόδρομη Καθυστερήση στο δίκτυο WLAN..... | 99 |
| 4.2.3.3 | Μονόδρομη Καθυστερήση στο δίκτυο DVB-T..... | 100 |
| 4.2.3.4 | Αξιολόγηση Μηχανισμού Κινητικότητας ΠΑΕΔ..... | 101 |
| 4.2.3.5 | Καθυστερήσεις Εσωτερικών Στοιχείων ΠΑΕΔ..... | 106 |
| 4.3 | Ρεαλιστικά Σενάρια Λειτουργίας - Αξιολόγηση Επιδόσεων σε Επίπεδο Χρήστη μετά την ενσωμάτωση των συστημάτων DVB-T..... | 107 |
| 4.3.1 | Αντιμετώπιση Καταστάσεων Συμφόρησης..... | 107 |
| 4.3.2 | Αντιμετώπιση Καταστάσεων Απώλειας Ραδιοκάλυψης..... | 111 |

| | | |
|-----|---------------------|-----|
| 4.4 | Ανακεφαλαίωση | 115 |
|-----|---------------------|-----|

Κεφάλαιο 5

| | | |
|-------|---|-----|
| 5 | Διαχείριση Πόρων Ασυρμάτων Συστημάτων DVB-T στα πλαίσια ενσωμάτωσης τους σε Δίκτυα 4 ^{ης} Γενιάς. | 117 |
| 5.1 | Εισαγωγή..... | 117 |
| 5.2 | Γενική διατύπωση του προβλήματος RRM..... | 119 |
| 5.2.1 | Απαιτήσεις διαδικασιών RRM στα πλαίσια λειτουργίας των Δικτύων 4 ^{ης} Γενιάς | 122 |
| 5.3 | Προβλήματα Διαχείρισης Πόρων σε συστήματα DVB-T..... | 123 |
| 5.4 | Αξιολόγηση Αρχιτεκτονικής SFN μέσω Προσομοίωσης. | 124 |
| 5.5 | Διαχείριση Πόρων σε πολλαπλά συστήματα DVB-T, αποκλειστικής παροχής υπηρεσιών IP, με αρχιτεκτονική SFN..... | 128 |
| 5.5.1 | Δεδομένα Εισόδου – Συμβολισμός Παραμέτρων | 129 |
| 5.5.2 | Μοντέλο Σημάτων σε DVB-T δίκτυα | 131 |
| 5.5.3 | Δεδομένα εξόδου του DVB-T RRM προβλήματος – Συνθήκες Ικανοποίησης και Στόχοι 132 | |
| 5.6 | Ανάλυση πολυπλοκότητας και βαθμού δυσκολίας του εξεταζόμενου προβλήματος.134 | |
| 5.6.1 | Μαθηματικό υπόβαθρο - ορισμοί | 134 |
| 5.6.2 | Αναγωγή του προβλήματος Διαχείρισης Πόρων σε συστήματα DVB-T σε γνωστά NP-Complete προβλήματα. | 135 |
| 5.7 | Συμπεράσματα - Σύνοψη Κεφαλαίου | 137 |

Κεφάλαιο 6

| | | |
|-------|--|-----|
| 6 | Αλγόριθμος Διαχείριση Πόρων σε πολλαπλά συστήματα DVB-T, αποκλειστικής παροχής υπηρεσιών IP, με αρχιτεκτονική SFN..... | 139 |
| 6.1 | Εισαγωγή..... | 139 |
| 6.2 | Περιγραφή Αλγορίθμου | 140 |
| 6.3 | Αποτελέσματα Προσομοίωσης – Αξιολόγηση Αλγορίθμου..... | 144 |
| 6.3.1 | Σενάριο αξιολόγησης RRM αλγορίθμου | 144 |
| 6.3.2 | Αποτελέσματα RRM αλγορίθμου..... | 145 |
| 6.4 | Ανακεφαλαίωση | 155 |

Κεφάλαιο 7

| | | |
|-----|---|-----|
| 7 | Συμπεράσματα – Μελλοντικές Προοπτικές..... | 157 |
| 7.1 | Ανακεφαλαίωση Καινοτομικών Στοιχείων της Διατριβής..... | 158 |

| | |
|--|-----|
| 7.2 Μελλοντικά Ερευνητικά Θέματα | 163 |
| Βιβλιογραφία..... | 165 |
| Συνοτμήσεις..... | 173 |

Πίνακας Σχημάτων

Κεφάλαιο 2

| | |
|--|----|
| Σχήμα 2-1. Σημαντικότερα Αρχιτεκτονικά Μοντέλα υλοποίησης συστημάτων 4 ^{ης} Γενιάς..... | 28 |
| Σχήμα 2-2. Αρχιτεκτονική πειραματικού ΠΑΕΔ | 30 |
| Σχήμα 2-3. Κατανομή συχνοτήτων στα πλαίσια ενός MFN αναλογικού δικτύου τηλεόρασης. | 35 |
| Σχήμα 2-4. Αρχιτεκτονική ενός DVB-T δικτύου. | 36 |
| Σχήμα 2-5. Ενθυλάκωση IP δεδομένων σε MPEG-2 TS πακέτα..... | 37 |
| Σχήμα 2-6. Στάδια παραγωγής σήματος DVB-T..... | 39 |
| Σχήμα 2-7. Οργάνωση OFDM πλαισίων στο πεδίο του Χρόνου και της Συχνότητας. | 41 |
| Σχήμα 2-8. Γενική αρχιτεκτονική για επίγεια διαδραστικά συστήματα Βιντεοεκπομπής (Interactive DVB-T networks)..... | 43 |

Κεφάλαιο 3

| | |
|---|----|
| Σχήμα 3-1. Αρχιτεκτονική Περιβάλλοντος 4 ^{ης} Γενιάς σε επίπεδο δικτυακών στοιχείων..... | 53 |
| Σχήμα 3-2. Εσωτερική δομή Διαχειριστή. | 56 |
| Σχήμα 3-3. Ασύρματο Δίκτυο Πρόσβασης τύπου WLAN 802.11b. | 57 |
| Σχήμα 3-4. Εσωτερική Δομή Access Point 802.11. | 57 |
| Σχήμα 3-5. Ασύρματο Δίκτυο Πρόσβασης τύπου GPRS..... | 60 |
| Σχήμα 3-6. Ασύρματο Δίκτυο Πρόσβασης τύπου DVB-T | 62 |
| Σχήμα 3-7. Πιθανές καταστάσεις Ομάδας Προγράμματος | 62 |
| Σχήμα 3-8. Μοντέλο Λειτουργία DVB-T IP/Gateway | 63 |
| Σχήμα 3-9. Ακολουθία ανταλλαγής μηνυμάτων κατά την εγγραφή του MN στον HA | 67 |
| Σχήμα 3-10. Τεχνική IP in IP encapsulation | 67 |
| Σχήμα 3-11. Διασυστηματική μεταπομπή με την βοήθεια του MIPv4..... | 69 |
| Σχήμα 3-12. Παράδειγμα λειτουργίας NAT..... | 72 |
| Σχήμα 3-13. IP in UDP Encapsulation – Παράδειγμα MIP traversal μέσα από NAT Gateways (χωρίς την παρουσία FA)..... | 74 |
| Σχήμα 3-14. Αρχιτεκτονική Πρότυπου Multimode Τερματικού | 78 |
| Σχήμα 3-15. Μήνυμα Service Request/Service Reply | 80 |
| Σχήμα 3-16. Μήνυμα Handover Required Notification..... | 81 |
| Σχήμα 3-17. Μήνυμα Quality Report..... | 82 |

Σχήμα 3-18. Μηνύματα NACP και MIP κατά την διάρκεια μεταπομπής από WLAN σε GPRS....83

Κεφάλαιο 4

| | |
|--|-----|
| Σχήμα 4-1. Κατανομή πιθανότητας μεγέθους πακέτων και παράμετροι λειτουργίας κατά την διάρκεια της προσομοίωσης..... | 90 |
| Σχήμα 4-2. Υπολογισμός μεγίστης δυνατής χωρητικότητας ανά WLAN AP, σε διαφορετικές συνθήκες, με την χρήση προσομοίωσης. | 91 |
| Σχήμα 4-3 . Μεταβολή ρυθμού υπηρεσίας FTP, σε σχέση με το επίπεδο του κυκλοφοριακού φορτίου στο AP | 91 |
| Σχήμα 4-4 Μεταβολή GPRS RTD σε σχέση με το φορτίο της κυψέλης | 92 |
| Σχήμα 4-5. Διαδρομή δοκιμαστικών πακέτων εργαλείου ping στο GPRS δίκτυο | 93 |
| Σχήμα 4-6. RTD για αυτοδύναμη λειτουργία GPRS..... | 94 |
| Σχήμα 4-7. Διαδρομή δοκιμαστικών πακέτων εργαλείου ping στο WLAN δίκτυο | 95 |
| Σχήμα 4-8. RTD για αυτοδύναμη λειτουργία WLAN..... | 95 |
| Σχήμα 4-9. Διαδρομή δοκιμαστικών πακέτων εργαλείου ping στην περίπτωση DVB-T/GPRS..... | 96 |
| Σχήμα 4-10. Συγκριτικά αποτελέσματα RTD για αυτοδύναμη λειτουργία GPRS και DVB-T/GPRS | 96 |
| Σχήμα 4-11. Διαδρομή δοκιμαστικών πακέτων εργαλείου ping στην περίπτωση DVB-T/WLAN .97 | |
| Σχήμα 4-12. Συγκριτικά αποτελέσματα RTD για αυτοδύναμη λειτουργία WLAN και DVB-T/WLAN..... | 98 |
| Σχήμα 4-13. GPRS downlink OWD..... | 99 |
| Σχήμα 4-14. WLAN downlink OWD | 100 |
| Σχήμα 4-15. DVB-T downlink OWD | 100 |
| Σχήμα 4-16. Επίδραση διασυστηματικών μεταπομπών στην μετρική OWD | 102 |
| Σχήμα 4-17. OWD κατά την μεταπομπή από WLAN σε GPRS, για test traffic 100 και 50 msecs | 103 |
| Σχήμα 4-18. OWD κατά την μεταπομπή από DVB-T/WLAN σε GPRS, για test traffic 100 | 104 |
| Σχήμα 4-19. OWD κατά την μεταπομπή από DVB-T/WLAN σε WLAN, για test traffic 100 ... | 104 |
| Σχήμα 4-20. Μεταπομπή από GPRS σε WLAN – Απώλειες πακέτων δοκιμαστικής κίνησης των 100 msecs | 105 |
| Σχήμα 4-21. Μεταπομπή από GPRS σε WLAN – Απώλειες πακέτων δοκιμαστικής κίνησης των 50 msecs | 105 |
| Σχήμα 4-22. Μεταπομπή από GPRS σε DVB-T/WLAN – Απώλειες πακέτων δοκιμαστικής κίνησης των 100 msecs | 105 |
| Σχήμα 4-23. Γενικό σενάριο αντιμετώπισης καταστάσεων συμφόρησης..... | 108 |
| Σχήμα 4-24. Περίπτωση 1 - Παρατηρούμενοι ρυθμοί κίνησης εμπλεκόμενων ροών..... | 109 |
| Σχήμα 4-25. Περίπτωση 1 – Video Frame Rate | 110 |

| | |
|--|-----|
| Σχήμα 4-26. Ποσοστό χρησιμοποίησης δικτύων WLAN και DVB-T πριν (1) και μετά (2) την μεσολάβηση του Διαχειριστή ΠΑΕΔ..... | 111 |
| Σχήμα 4-27. Γενικό σενάριο αντιμετώπισης απώλειας ραδιοκάλυψης..... | 111 |
| Σχήμα 4-28 Τιμή SNR σε επιλεγμένα σημεία κίνησης του τερματικού για τα δίκτυα WLAN και DVB-T | 113 |
| Σχήμα 4-29. Ρυθμός ροής video υπηρεσίας VSS κατά την διάρκεια μεταπομπής λόγω απώλειας ραδιοκάλυψης..... | 114 |
| Σχήμα 4-30. Ρυθμός βιντεοπλαισίων υπηρεσίας VSS κατά την διάρκεια μεταπομπής λόγω απώλειας ραδιοκάλυψης..... | 114 |

Κεφάλαιο 5

| | |
|---|-----|
| Σχήμα 5-1. Στάδια διαδικασίας RRM..... | 121 |
| Σχήμα 5-2. Διαδικασία Προσφορών-Ανταλλαγών κυκλοφοριακού φορτίου μεταξύ των συνεργαζόμενων δικτύων. | 122 |
| Σχήμα 5-3. Προβλήματα Διαχείρισης Πόρων σε συστήματα DVB-T..... | 123 |
| Σχήμα 5-4. Χαρακτηριστικές τοπολογίες SFN δικτύων με τρεις (1) και επτά (2) πομπούς..... | 125 |
| Σχήμα 5-5. P_{outage} πιθανότητα για περιπτώσεις SFN με ένα, τρεις, επτά και δεκαεννιά πομπούς, για όλες τις δυνατές τιμές της μεταβλητής Tg , $1/4 T_U - (1), 1/8 T_U - (2), 1/16 T_U - (3), 1/32 T_U - (4)$ | 126 |
| Σχήμα 5-6. Περιοχή Εξυπηρέτησης – Σύγκριση SFN-MFN..... | 127 |
| Σχήμα 5-7. Δομή δικτύων DVB-T με χρήση της αρχιτεκτονικής SFNs | 128 |
| Σχήμα 5-8. Μοντέλο Σημάτων δικτύων DVB-T με αρχιτεκτονική SFN..... | 131 |

Κεφάλαιο 6

| | |
|---|-----|
| Σχήμα 6-1. Γράφος προσδιορισμού Υποπεριοχών (Sub-Service Areas)..... | 140 |
| Σχήμα 6-2. Παράδειγμα οριοθέτησης των TPs..... | 142 |
| Σχήμα 6-3. Περιοχή εξυπηρέτηση σεναρίου..... | 144 |
| Σχήμα 6-4. Αριθμός SFNs – Πρώτο Στάδιο Σεναρίου | 146 |
| Σχήμα 6-5. Αριθμός SFNs – Πρώτο Στάδιο Σεναρίου | 147 |
| Σχήμα 6-6. Στατιστικά στοιχεία ανά περίπτωση εκτέλεσης του αλγορίθμου..... | 148 |
| Σχήμα 6-7. Κατανομή cdf, τιμών SIR ανά ομάδα χρηστών, κατά την διάρκεια του πρώτου σταδίου..... | 150 |
| Σχήμα 6-8. Κατανομή cdf, τιμών SIR ανά ομάδα χρηστών, κατά την διάρκεια του δεύτερου σταδίου..... | 151 |
| Σχήμα 6-9. Τοποθεσίες χρηστών με λόγο SIR μικρότερο από τον επιθυμητό ελάχιστο..... | 152 |

| | |
|--|-----|
| Σχήμα 6-10. Τιμή παράγοντα $Q_{g,t}$, σε σχέση με την απόσταση από τον πομπό..... | 153 |
| Σχήμα 6-11. Εφαρμοζόμενη ισχύς, στην μετάδοση του DVB-T σήματος, ανά πομπό, σε διάφορες περιπτώσεις..... | 153 |
| Σχήμα 6-12. Ενδεικτικό κόστος ανά παραγόμενη λύση, μέσω του προτεινόμενου αλγορίθμου..... | 154 |

Πίνακας Πινάκων

Κεφάλαιο 2

| | |
|---|----|
| Πίνακας 2-1. Συγκριτική παρουσίαση των αρχιτεκτονικών Loose και Tight-coupling..... | 30 |
| Πίνακας 2-2. Τεχνικές Παραγωγής DVB-T σήματος..... | 38 |
| Πίνακας 2-3. Παράμετροι OFDM μετάδοσης..... | 41 |
| Πίνακας 2-4. Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων σε δίκτυα DVB-T για διαφορετικές παραμέτρους λειτουργίας..... | 42 |

Κεφάλαιο 3

| | |
|--|----|
| Πίνακας 3-1. Μεταβλητές σταθμοσκόπησης στο WLAN (ανά AP)..... | 58 |
| Πίνακας 3-2. Μεταβλητές παρατήρησης ανά GPRS κυψέλη..... | 60 |
| Πίνακας 3-3. Μεταβλητές παρατήρησης ανά DVB-T IP/Gateway..... | 63 |
| Πίνακας 3-4. Ρυθμίσεις δρομολογητή..... | 65 |
| Πίνακας 3-5. Παρεχόμενες Υπηρεσίες..... | 75 |
| Πίνακας 3-6. Mode λειτουργίας πρότυπου multi-mode τετραπλικού..... | 84 |

Κεφάλαιο 4

| | |
|---|-----|
| Πίνακας 4-1. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση για αυτοδύναμη λειτουργία GPRS..... | 94 |
| Πίνακας 4-2. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση για αυτοδύναμη λειτουργία WLAN..... | 95 |
| Πίνακας 4-3. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση για αυτοδύναμη λειτουργία GPRS και DVB-T/GPRS..... | 97 |
| Πίνακας 4-4. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση για αυτοδύναμη λειτουργία WLAN και DVB-T/WLAN..... | 98 |
| Πίνακας 4-5. GPRS Downlink OWD και RTD..... | 99 |
| Πίνακας 4-6. WLAN Downlink OWD και RTD..... | 100 |
| Πίνακας 4-7. DVB-T Downlink OWD και RTD με RIP τα δίκτυα WLAN και GPRS..... | 100 |
| Πίνακας 4-8. Καθυστερήσεις οφειλόμενες σε εσωτερικά στοιχεία του πειραματικού ΠΑΕΔ..... | 107 |
| Πίνακας 4-9. Ανάθεση χρηστών και υπηρεσιών σε δίκτυα και επίπεδα ποιότητας πριν και μετά την μεσολάβηση του Διαχειριστή ΠΑΕΔ..... | 110 |

Κεφάλαιο 6

| | |
|--|-----|
| Πίνακας 6-1. Αποτελέσματα αλγορίθμου σε σχέση με τον αριθμό SFNs – Στάδιο 1, modes 6,11 και 14..... | 146 |
| Πίνακας 6-2. Αποτελέσματα αλγορίθμου σε σχέση με τον αριθμό SFNs – Στάδιο 2, modes 6,11 και 14..... | 147 |
| Πίνακας 6-3. Ενδεικτικές τιμές κόστους, κρίσιμων μεγεθών κατά την διάρκεια υλοποίησης DVB-T δικτύων..... | 154 |

1 Εισαγωγή

Οι ραγδαίες εξελίξεις που συντελούνται στον χώρο των Ασύρματων Κινητών Επικοινωνιών (*Wireless Mobile Communications*) τα τελευταία χρόνια, είναι το αποτέλεσμα της μετατόπισης του ενδιαφέροντος της παγκόσμιας ερευνητικής κοινότητας προς τον τομέα αυτό. Η απλή προσφορά υπηρεσιών φωνής αρχίζει σιγά σιγά να εμπλουτίζεται με υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων. Οι αυξημένες απαιτήσεις όμως, τόσο των απλών υπηρεσιών δεδομένων αλλά και των πιο σύνθετων εφαρμογών (π.χ. πολυμεσικές υπηρεσίες βίντεο) οδηγούν στην δημιουργία νέων ευρυζωνικών ασύρματων δικτύων, ικανά να υποστηρίξουν ιδιαίτερα μεγάλους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων προς τους χρήστες. Παράλληλα όμως, η παγκόσμια ερευνητική κοινότητα έχει αντιληφθεί ότι σημαντικά οφέλη είναι δυνατόν να προκύψουν μέσω της σύγκλισης και ενοποίησης των ασύρματων συστημάτων, διαφορετικών τεχνολογιών, με απώτερο σκοπό την δημιουργία των Δικτύων 4^{ης} Γενιάς [HY03], [BE+04] ή των Δικτύων Πέραν της 3^{ης} Γενιάς (Beyond 3G Networks).

Με βάση το πλαίσιο που μόλις προδιαγράφηκε, στις παραγράφους που ακολουθούν πραγματοποιείται μια λεπτομερής ανασκόπηση στις εξελίξεις στον χώρο των Ψηφιακών Τηλεπικοινωνιών, καθώς και η οριοθέτηση των θεμάτων που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Η πρόοδος στα κυβελωτά δίκτυα 2^{ης} Γενιάς (π.χ. GSM) αφορά την αναβάθμιση των δυνατοτήτων τους στην παροχή υπηρεσιών μεταφοράς δεδομένων, μέσω της χρήσης συστημάτων όπως το GPRS (*General Packet Radio Service*) [GL00] και το EDGE (*Enhanced Data for GSM Evolution*) [FM+99] (2.5G). Επιπλέον, ξεκίνησε ήδη η εμπορική διάθεση προς τους χρήστες, των συστημάτων Κινητών Επικοινωνιών 3^{ης} Γενιάς, με πιο χαρακτηριστικό αντιπρόσωπο τα δίκτυα UMTS (*Universal Mobile Telephone System*) [HT00].

Σημαντικές είναι και οι εξελίξεις στον τομέα των Τοπικών Ασύρματων Δικτύων, γνωστά και ως WLANs (Wireless Local Area Networks). Τα WLANs, με κύριο αντιπρόσωπο την οικογένεια πρωτοκόλλων IEEE802.11 [CWK+97], έχουν φτάσει πια στο στάδιο ωριμότητας, παρέχοντας υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης των δεδομένων (μέχρι 100Mbps), ολοκληρωμένους μηχανισμούς διαχείρισης της κινητικότητας, της ασφάλειας και της πιστοποίησης των χρηστών, καθιστώντας τα μια αξιόπιστη και χαμηλού κόστους λύση στην προσφορά ασύρματης πρόσβασης.

Η γενικότερη πρόοδος που παρατηρείται στο χώρο των Ασύρματων Επικοινωνιών [VAR00], με την εισαγωγή νέων δικτύων και τεχνολογιών, σχετίζεται άμεσα και αντικατοπτρίζει τις ολοένα και αυξανόμενες απαιτήσεις των κινητών χρηστών για υψηλού επιπέδου υπηρεσίες φωνής, εικόνας και δεδομένων. Από την πλευρά τους οι Δικτυακοί Πάροχοι (*Network Providers – NPs*), στην προσπάθειά τους να αντεπεξέλθουν στις νέες προκλήσεις που δημιουργούν οι

αυξημένες απαιτήσεις των πελατών τους, προχωρούν στην αναβάθμιση των υπαρχόντων δικτύων αλλά και την ανάπτυξη νέων. Φυσικά, ο κύριος στόχος των NPs παραμένει η προσφορά υπηρεσιών με υψηλό επίπεδο ποιότητας (Quality of Service – QoS) και το μικρότερο δυνατό κόστος λειτουργίας, ταυτόχρονα με την ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών. Η παραπάνω διαπίστωση, σε συνδυασμό με την επικράτηση του πρωτοκόλλου IP («all-IP» δίκτυα [BB+02]), ως του πιο διαδεδομένου μέσου για την μεταφορά του περιεχομένου των διαφορετικών υπηρεσιών [WA+03], οδήγησαν στην σύλληψη της ιδέας των συνεργαζόμενων ασύρματων δικτύων ή όπως είναι πιο γνωστά Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς (4G) [HY03], [BE+04].

Η βασική αρχή, πάνω στην οποία στηρίζονται τα Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς είναι η ταυτόχρονη εκμετάλλευση και αξιοποίηση διαφορετικών ασύρματων τεχνολογιών, μέσω αρχιτεκτονικών που θα επιτρέπουν την ενοποιημένη λειτουργία τους. Ο στόχος, όπως και στην περίπτωση της αυτοδύναμης λειτουργίας των ασύρματων δικτύων, παραμένει η προσφορά υψηλού επιπέδου υπηρεσιών προς τους χρήστες. Η Περιοχή Εξυπηρέτησης (*Service Area*) σε τέτοιου είδους περιβάλλοντα θα χαρακτηρίζεται από την συνεχή κάλυψη μέσω ενός ή περισσότερων ασύρματων δικτύων με μεγάλο βαθμό ετερογένειας ως προς τις δυνατότητες τους. Τα οφέλη που θα προκύψουν από την δημιουργία των Δικτύων 4^{ης} Γενιάς συμπυκνώνονται στο τρίπτυχο: Αύξηση της χωρητικότητας, αναβάθμιση του επιπέδου ποιότητας και μείωση του κόστους.

Πιο αναλυτικά, οι NPs θα έχουν την δυνατότητα να παρέχουν δικτυακές υπηρεσίες μέσω περισσότερων του ενός ασύρματου δικτύου, αυξάνοντας έτσι το αριθμό των χρηστών που μπορούν να εξυπηρετήσουν ταυτόχρονα, ιδιαίτερα σε περιοχές (π.χ. αστικά κέντρα) ή καταστάσεις (π.χ. κατά την διάρκεια γεγονότων μεγάλης κλίμακας όπως οι Ολυμπιακοί Αγώνες) με έντονη κυκλοφοριακή ζήτηση. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση της συνεργασίας WLANs και κυψελωτών δικτύων (π.χ. GPRS ή UMTS), με την οποία έχει ασχοληθεί συστηματικά η παγκόσμια ερευνητική κοινότητα, προτείνοντας μια σειρά από ολοκληρωμένες λύσεις, όπως αυτές των [SF+02], [DT+03] και [AH+03]. Άμεση διαπίστωση, αλλά και η βασική αιτία που οδήγησε στην διερεύνηση της εφικτότητας του πιο πάνω εγχειρήματος, είναι η αποφυγή εκτεταμένων επενδύσεων από τους NPs, σε εξοπλισμό για την ανάπτυξη Δικτύων 3^{ης} Γενιάς, με σκοπό την κάλυψη των αναγκών σε ζήτηση, μέσω της αξιοποίησης του χαμηλού κόστους δικτύων WLANs. Τα οφέλη που προκύπτουν από την ενοποιημένη λειτουργία ετερογενών ασύρματων δικτύων, αφορούν και τους NPs που έχουν στην κατοχή τους μόνο ένα ασύρματο μέσο. Πιο συγκεκριμένα, στα πλαίσια συστημάτων 4^{ης} Γενιάς, θα είναι εφικτή η ανταλλαγή (προσφορά ή ζήτηση) δικτυακών πόρων μεταξύ διαφορετικών NPs, με στόχο την αντιμετώπιση καταστάσεων συμφόρησης, με όρους που θα περιγράφονται στις μεταξύ τους εμπορικές συμφωνίες [DS+04]. Με τον τρόπο αυτό μεγιστοποιείται ο βαθμός χρησιμοποίησης των δικτύων αλλά και αποφεύγονται άσκοπες επενδύσεις για την κάλυψη σπάνιων περιπτώσεων υπερβολικής κυκλοφοριακής ζήτησης.

Οι χρήστες από την πλευρά τους, ως κάτοχοι ευφυών τερματικών, τα οποία θα είναι εξοπλισμένα με παραπάνω από μια δικτυακές διεπαφές (*network interfaces*), θα έχουν την δυνατότητα της αδιάκοπης πρόσβασης στις υπηρεσίες που επιθυμούν σε διαφορετικά επίπεδα ποιότητας (QoS) [KR+01]. Τα κριτήρια που θα καθορίζουν το είδος του επιλεγμένου δικτύου αλλά και το επίπεδο ποιότητας των ενεργών υπηρεσιών, στην πλευρά του χρήστη, συνοψίζονται στην κυκλοφοριακή κατάσταση και στις συνθήκες ραδιοαύλωσης στην ακριβή θέση του, μέσα στην Περιοχή Εξυπηρέτησης, στα χαρακτηριστικά της συσκευής αλλά και στο μέγιστο κόστος που είναι διατεθειμένος να πληρώσει και καθορίζεται από το συμβόλαιο χρήσης που έχει συμφωνήσει. Οι χρήστες των Δικτύων 4^{ης} Γενιάς θα «ανησυχούν» μόνο για το επίπεδο ποιότητας των υπηρεσιών που επιθυμούν, αγνοώντας όλες τις τεχνικές λεπτομέρειες, όπως για παράδειγμα το είδος του δικτύου πρόσβασης κάθε φορά ή αν αυτό μεταβάλλεται κατά την διάρκεια εξυπηρέτησης τους. Η σχέση μεταξύ των χρηστών και των NPs θα αντικατοπτρίζεται στην απαίτηση των πρώτων για βέλτιστη επιλογή δικτύου πρόσβασης ή όπως είναι πιο γνωστή ως απαίτηση Always Best Connected (*ABC*) [GJ03].

Οι θετικές επιπτώσεις της υιοθέτησης των Δικτύων 4^{ης} Γενιάς θα αφορούν και τους Παροχείς Υπηρεσιών (*Service Providers – SPs*). Πιο συγκεκριμένα, στο νέο περιβάλλον που θα δημιουργηθεί, θα επιτραπεί η ανάπτυξη νέων τύπου εφαρμογών, με αυξημένα επίπεδα ποιότητας, ικανές να εκμεταλλευτούν τις δυνατότητες που θα τους προσφέρει η ποικιλία επιλογών ως προς το δίκτυο πρόσβασης.

Ήδη από την ως τώρα συζήτηση έχει διαφανεί, ότι τα οφέλη που θα προκύψουν τόσο για τους NPs όσο και για τους χρήστες, μέσω της εφαρμογής της ιδέας των Δικτύων 4^{ης} Γενιάς, είναι αρκετά σημαντικά. Όμως στην πορεία υλοποίησης και δημιουργίας τέτοιων δικτύων, ανακύπτει το σημαντικότερο θέμα της δυνατότητας αξιοποίησης των μονοκατευθυντικών συστημάτων Ψηφιακής Βιντεοεκπομπής ή Ψηφιακής Τηλεόρασης, γνωστά και ως DVB Systems (*Digital Video Broadcasting*) [REI98], στην παροχή υπηρεσιών IP.

Τα συστήματα DVB αποτελούν την κυριότερη προσπάθεια για την μετάβαση στην ψηφιακή εποχή των υπηρεσιών τηλεόρασης. Επιπλέον, συνιστούν την ευρωπαϊκή πρόταση στο συγκεκριμένο θέμα και στηρίζονται στην ψηφιακή μετάδοση των τηλεοπτικών δεδομένων μέσω του πρωτοκόλλου MPEG-2. Τα σημαντικότερα πρότυπα μετάδοσης DVB (*standards*) που έχουν παρουσιαστεί ως σήμερα, για τα οποία υπάρχουν τεχνολογικά ώριμες υλοποιήσεις είναι το δορυφορικό σύστημα DVB-S (*Digital Video Broadcasting – Satellite*), το καλωδιακό σύστημα DVB-C (*Digital Video Broadcasting – Cable*) και το πιο σύγχρονο και νεώτερο πρότυπο, το επίγειο σύστημα DVB-T (*Digital Video Broadcasting – Terrestrial*). Η παρούσα διδακτορική διατριβή επικεντρώνεται στο πρότυπο DVB-T, αφού αποτελεί το πιο εξελιγμένο τεχνολογικά σύστημα σε σχέση με τα άλλα δυο, είναι ιδανικό για την προσφορά «επίγειων» υπηρεσιών τηλεόρασης (άρα και υπηρεσιών IP), προσφέρει μικρούς χρόνους καθυστέρησης (απαραίτητο

χαρακτηριστικό για «ευαίσθητες», υπηρεσίες IP πραγματικού χρόνου), ενώ δεν απαιτεί ιδιαίτερο εξοπλισμό στην πλευρά του χρήστη (ιδανικό για χρήστες με φορητά τερματικά). Μια αναλυτικότερη παρουσίαση των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει το πρότυπο DVB-T, θα πραγματοποιηθεί στα κεφάλαια που ακολουθούν.

Παράλληλα όμως με την προσπάθεια ανάπτυξης νέων προτύπων για την ψηφιακή μετάδοση των τηλεοπτικών προγραμμάτων, όπως ήδη αναφέρθηκε, έχει αρχίσει να εξετάζεται και η δυνατότητα για αξιοποίηση των συστημάτων DVB για την προσφορά υπηρεσιών IP [KT+01]. Η παραπάνω προσπάθεια συνιστά ένα σημαντικό ερευνητικό θέμα, γνωστό και ως «σύγκλιση των τηλεπικοινωνιακών δικτύων με τα συστήματα εκπομπής (broadcast systems)». Η επίτευξη του πιο πάνω στόχου, έγκειται στην δημιουργία ολοκληρωμένων διαδραστικών, αμφίδρομων δικτύων, για την παροχή ευρυζωνικών, πολυμεσικών υπηρεσιών IP, μέσω της συνεργασίας των συστημάτων εκπομπής και των παραδοσιακών ασύρματων δικτύων, στο ρόλο του καναλιού διάδρασης. Βασικό κίνητρο της πιο πάνω προσπάθειας αποτελεί η αξιοποίηση του ευρυζωνικού καναλιού που προσφέρουν τα συστήματα DVB, στην κατεύθυνση καθόδου των δεδομένων (downlink path).

Όμως η πλήρης εκμετάλλευση των συστημάτων DVB (και ειδικότερα των συστημάτων DVB-T) θα προέλθει από την ικανότητα τους να ενσωματωθούν σε περιβάλλοντα Δικτύων 4^{ης} Γενιάς. Οι απλές υβριδικές τοπολογίες συστημάτων DVB-T και άλλων ασύρματων τεχνολογιών όπως έχουν παρουσιαστεί ως σήμερα δεν διαθέτουν τα απαραίτητα εκείνα στοιχεία για την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων των πρώτων. Συνήθως παραμένουν στην επίτευξη στατικών τρόπων συνδεσιμότητας χωρίς να αξιολογούν ποσοτικά και ποιοτικά τα οφέλη που προκύπτουν από την δυναμική εναλλαγή των δικτύων πρόσβασης, στα οποία συμμετέχουν και συστήματα DVB-T. Πιο συγκεκριμένα, απουσιάζουν ολοκληρωμένες λύσεις σχετικά με την διαχείριση της κινητικότητας των τερματικών στην περίπτωση χρήσης των μονοκευθυντικών συστημάτων DVB-T, ενώ απουσιάζουν μελέτες σχετικά με την συμπεριφορά των συστημάτων αυτών κατά την διάρκεια διασυστηματικών μεταπομπών (intersystem handovers) από και προς τα συστήματα DVB-T αλλά και κατά την διάρκεια χρήσης τους ως βασικού δικτύου πρόσβασης. Επιπλέον, στην πορεία ενσωμάτωσης των συστημάτων DVB-T, κρίνεται απαραίτητη η δημιουργία νέων διαχειριστικών συστημάτων, τα οποία θα παρέχουν λειτουργίες όπως η Διαχείριση Πόρων αλλά και θα επιτρέπουν την συνεργασία τους με άλλα ασύρματα δίκτυα, με σκοπό την πλήρη αξιοποίηση της διαθέσιμης χωρητικότητάς τους. Είναι φανερό από την ως τώρα ανάλυση ότι υπάρχει ένα σημαντικό ερευνητικό κενό, το οποίο συμπυκνώνεται σε θέματα όπως απαιτήσεις και τρόποι ενσωμάτωσης των συστημάτων DVB-T σε περιβάλλοντα Δικτύων 4^{ης} Γενιάς αλλά και ποσοτικός και ποιοτικός προσδιορισμός των ωφελειών που θα προκύψουν.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή παρουσιάζει ουσιαστικά την πρώτη ολοκληρωμένη λύση για την ενσωμάτωση των συστημάτων DVB-T, η οποία εφαρμόζεται και υλοποιείται με

την χρήση πραγματικών δικτύων. Αναλυτικότερα τα θέματα τα οποία μελετήθηκαν αφορούν τις εξής ενότητες:

- Παρουσίαση μιας ολοκληρωμένης πρότασης για την ενσωμάτωση των συστημάτων DVB-T σε πραγματικά Δίκτυα 4ης Γενιάς (Τρόπος ενσωμάτωσης), για την παροχή υπηρεσιών IP.
 - Ακριβής τοπολογία ενός πρωτότυπου Δικτύου 4ης Γενιάς με την χρήση συστημάτων DVB-T. Αναλύονται ειδικότερα οι χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες, διεπαφές διασύνδεσης, θέματα όπως η διευθυνσιοδότηση και η δρομολόγηση των δεδομένων κ.α.
 - Δημιουργία ενός Προηγμένου Μηχανισμού Διαχείρισης της Κινητικότητας και Τερματικών με την δυνατότητα υποστήριξης και συστημάτων DVB-T, στα πλαίσια των Δικτύων 4ης Γενιάς.
 - Αναβάθμιση της Διαχειριστικής Οντότητας των συστημάτων DVB-T με την δυνατότητα παρακολούθησης και αναγνώρισης καταστάσεων συμφόρησης, για την περίπτωση ταυτόχρονης προσφοράς υπηρεσιών IP και υπηρεσιών τηλεόρασης.
 - Αναβάθμιση της Διαχειριστικής Οντότητας των συστημάτων DVB-T με πολιτικές Διαχείρισης Ασύρματων Πόρων (Radio Resource Management - RRM), για την περίπτωση της αποκλειστικής παροχής υπηρεσιών IP, σε δίκτυα DVB-T Μονής Συχνότητας (DVB-T Single Frequency Networks - SFNs). Αξιολόγηση μέσω προσομοίωσης.
- Ποιοτικός και ποσοτικός προσδιορισμός των ωφελειών που θα προκύψουν από την ενσωμάτωση των συστημάτων DVB-T σε περιβάλλοντα Δικτύων 4ης Γενιάς (Οφέλη).
 - Πειραματικά αποτελέσματα αξιολόγησης των επιδόσεων των συστημάτων DVB-T στην παροχή υπηρεσιών IP (χωρητικότητα, OWD, RTT, handover delays-losses).
 - Πραγματοποίηση ρεαλιστικών σεναρίων λειτουργίας με έμφαση στις περιπτώσεις :
 - Μεταπομπών (handovers)
 - Αντιμετώπισης καταστάσεων κυκλοφοριακής συμφόρησης (Traffic Congestion) και
 - Απώλειας Ραδιοκάλυψης (Radio coverage loss)

Έχοντας παρουσιάσει σε γενικές γραμμές την κατάσταση της ερευνητική περιοχής που η παρούσα διδακτορική διατριβή κινήθηκε (αναλυτικότερη περιγραφή υπάρχει στο κεφάλαιο 2) αλλά και τα βασικά θέματα με τα οποία ασχολήθηκε, συνεχίζουμε στην επόμενη παράγραφο με την περιγραφή της δομής της και το περιεχόμενο του κάθε κεφαλαίου.

2 Δομή Διδακτορικής Διατριβής

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελείται από επτά κεφάλαια συμπεριλαμβανομένου και του παρόντος κεφαλαίου της Εισαγωγής, τα οποία στοχεύουν στην αναλυτική παρουσίαση των θεμάτων που μελετήθηκαν, όπως αυτά αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Πιο συγκεκριμένα στο Κεφάλαιο 2, παρατίθενται όλες οι τελευταίες εξελίξεις σχετικά με τις τάσεις που υπάρχουν στον χώρο των Δικτύων 4^{ης} Γενιάς. Παρουσιάζονται οι βασικότερες αρχιτεκτονικές που έχουν προταθεί και εξετάζονται ως προς τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα που η κάθε μια προσφέρει. Το κεφάλαιο επίσης παρουσιάζει την ακολουθούμενη αρχιτεκτονική η οποία ακολουθήθηκε για την ενσωμάτωση των συστημάτων DVB-T. Εν συνεχεία εξετάζονται σε λεπτομέρεια τα συστήματα DVB-T, καθώς και τα σοβαρά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν σε σχέση με άλλες ασύρματες τεχνολογίες. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται, εν συντομία, οι τεχνικές λεπτομέρειες σε σχέση με τα στάδια κωδικοποίησης και διαμόρφωσης του σήματος DVB-T, η δομή του βασικός σήματος ζώνης (Ρεύμα Μεταφοράς MPEG-2 – Transport Stream), οι τεχνικές ενθυλάκωσης των δεδομένων IP, αλλά και πληροφορίες σε σχέση με την αρχιτεκτονική SFN (Single Frequency Networks). Τέλος στο ίδιο κεφάλαιο, πραγματοποιείται μια αναλυτική παρουσίαση των σημαντικότερων ερευνητικών προσπαθειών, στην κατεύθυνση αξιοποίησης των συστημάτων DVB-T, για την παροχή υπηρεσιών IP, δίνοντας έμφαση στα νέα στοιχεία που η παρούσα διδακτορική διατριβή εισάγει.

Στο Κεφάλαιο 3, ακολουθεί η παρουσίαση της αρχιτεκτονικής, σε επίπεδο δικτυακών στοιχείων, που τελικά υιοθετήθηκε, με σκοπό την υλοποίηση του πειραματικού Δικτύου 4^{ης} Γενιάς με ενσωματωμένο ένα σύστημα DVB-T. Επιπλέον στο ίδιο κεφάλαιο περιγράφονται οι λύσεις που προτιμήθηκαν για μια σειρά θεμάτων, όπως για παράδειγμα η διαχείριση της κινητικότητας (*mobility management*), η συνολική διαχείριση των δικτύων που συνεργάζονται και των χρηστών τους, οι διεπαφές επικοινωνίας μεταξύ τους, η υλοποίηση των multi-mode τερματικών και άλλες σημαντικές τεχνικές λεπτομέρειες.

Το Κεφάλαιο 4, παρουσιάζει τα αποτελέσματα από μια σειρά μετρήσεων αξιολόγησης της λειτουργίας του Δικτύου 4^{ης} Γενιάς, σε επίπεδο συστήματος (*control plane scenarios*), αλλά και κατά την διάρκεια εκτέλεσης ρεαλιστικών σεναρίων λειτουργίας, με στόχο την διαπίστωση της αποτελεσματικότητας και των ωφελειών που θα προκύψουν από την υιοθέτηση των συστημάτων DVB-T, ως εναλλακτικά δίκτυα για την παροχή υπηρεσιών IP. Η πρώτη κατηγορία αποτελεσμάτων, δηλαδή αυτή των μετρήσεων αξιολόγησης του συστήματος, είχε ως στόχο την πιστοποίηση της ικανότητας της πλατφόρμας (όλων των συνεργαζόμενων μερών) στην υποστήριξη υψηλού επιπέδου ποιότητας υπηρεσιών IP, τόσο αυτών που υλοποιούνται μέσω του πρωτόκολλου TCP (π.χ. web-browsing, μεταφορά αρχείων, e-mail κτλ.), όσο αυτών που

στηρίζονται στο πρωτόκολλο UDP, με πιο χαρακτηριστική την υπηρεσίας βιντεοροής (video streaming). Συγκεκριμένα εξετάστηκαν οι μετρικές της Καθυστέρησης Πλήρους Διαδρομής (*Round Trip Delay – RTD*) και της Μονόδρομης Καθυστέρησης (*One Way Delay – OWD*), για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς δικτύων, για κανονικές συνθήκες λειτουργίας (Συνολικό κυκλοφοριακό φορτίο < Χωρητικότητα δικτύου). Επιπλέον μελετήθηκε η απόδοση του μηχανισμού διαχείρισης της κινητικότητας, ιδιαίτερα κατά την πραγματοποίηση διασυστηματικών μεταπομπών από και προς το σύστημα DVB-T. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αφενός αποδεικνύουν την ικανότητα των συστημάτων DVB-T να συμμετέχουν σε Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς αλλά συνάμα αποτελούν παγκόσμια πρωτοτυπία. Η δεύτερη κατηγορία αποτελεσμάτων, αξιολογεί την συνεισφορά των συστημάτων DVB-T σε σχέση με ρεαλιστικά σενάρια λειτουργίας, με πιο χαρακτηριστικά τα πειράματα της αντιμετώπισης καταστάσεων κυκλοφοριακής συμφόρησης και απώλειας της ραδιοκάλυψης. Μέσω των ρεαλιστικών σεναρίων λειτουργίας που εκτελούνται όχι μόνο αξιολογείται θετικά το παρόν πειραματικό περιβάλλον αλλά παρέχονται και αληθινές αποδείξεις σε σχέση με τα οφέλη που θα προκύψουν από την υιοθέτηση των Δικτύων 4^{ης} Γενιάς και με την παρουσία συστημάτων DVB-T.

Τα κεφάλαια που ακολουθούν επικεντρώνουν στον σημαντικότερο ρόλο που θα διαδραματίσουν οι διαδικασίες RRM (Radio Resource Management), στην πορεία υλοποίησης των Δικτύων 4^{ης} Γενιάς. Πιο συγκεκριμένα, η απαίτηση για γρήγορο επανακαθορισμό των παραμέτρων λειτουργίας των επιμέρους συστημάτων, με στόχο την βελτιστοποιημένη χρήση των προσφερόμενων δικτυακών πόρων αλλά και την αύξηση του αριθμού των χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα, γίνεται όλο και πιο έντονη. Κύρια αιτία αποτελεί το γεγονός ότι οι μεταβολές στην Περιοχή Εξυπηρέτησης δεν θα οφείλονται μόνο στην φυσική κινητικότητα των χρηστών, αλλά και στις μεταπηδήσεις χρηστών από το ένα σύστημα στο άλλο, εξαιτίας του ενοποιημένου τρόπου λειτουργίας των δικτύων.

Προς την κατεύθυνση αυτή, το Κεφάλαιο 5 περιέχει μια γενική περιγραφή του προβλήματος RRM στα ασύρματα δίκτυα, εξειδικεύοντας στην συνέχεια, με τις ιδιαίτερες απαιτήσεις που προκύπτουν από την λειτουργία των συστημάτων 4^{ης} Γενιάς. Στο ίδιο κεφάλαιο επιλέγεται ως πεδίο εφαρμογής, το πρόβλημα RRM για τα δίκτυα DVB-T. Στο πλαίσιο αυτό, παρουσιάζεται αναλυτικά η διατύπωση του προβλήματος Διαχείρισης Πόρων για τα πολλαπλά συστήματα DVB-T, αποκλειστικής παροχής υπηρεσιών IP, μέσω της αρχιτεκτονικής SFN. Το πρόβλημα αυτό ανήκει στην κατηγορία των NP-complete προβλημάτων, όπως θα αποδειχθεί. Οι λόγοι που μας οδήγησαν στο να επικεντρώσουμε την προσοχή μας στο συγκεκριμένο τύπο δικτύου έχουν να κάνουν με τις αυξημένες δυνατότητες του, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν στα πλαίσια των συστημάτων 4^{ης} Γενιάς. Πιο αναλυτικά, τα δίκτυα DVB-T παρέχουν υψηλό ρυθμό μεταφοράς των δεδομένων προς τον χρήστη (ως και 31 Mbps ανά συχνότητα), αλλά και διευρυμένη ακτίνα κάλυψης. Όμως η αποτελεσματική τους λειτουργία επιβάλλει την

ολοκληρωμένη διαχείριση τους, στην οποία συμπεριλαμβάνονται και οι διαδικασίες RRM, ένα θέμα ανοικτό για την ερευνητική κοινότητα.

Στο Κεφάλαιο 6, παρουσιάζεται ένας «έξυπνος» αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος διαχείρισης πόρων στα δίκτυα DVB-T. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος κατατάσσεται στην κατηγορία των «greedy» (άπληστων), ευριστικών αλγορίθμων και αξιολογείται με την χρήση προσομοίωσης. Ανάμεσα στα δεδομένα εξόδου του αλγορίθμου, περιλαμβάνονται οι ακριβείς θέσεις και τα επίπεδα εκπεμπόμενης ενέργειας των πομπών που συνθέτουν τα δίκτυα DVB-T και η συχνότητα λειτουργίας τους, με στόχο πάντα την κάλυψη των απαιτήσεων σε χωρητικότητα, στην Περιοχή Εξυπηρέτησης που αναπτύσσονται. Η απόδοση του αλγορίθμου, σε σχέση με τον απαιτούμενο αριθμό των δικτύων DVB-T, πλησίαζε σχεδόν, για τις περισσότερες περιπτώσεις, το κατώτατο θεωρητικό όριο. Τέλος, η ταχύτητα εκτέλεσης του προτεινόμενου αλγορίθμου ήταν της τάξης των μερικών δευτερολέπτων, ακόμα και για το προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab, όπου αναπτύχθηκε, καθιστώντας τον άκρως ελκυστικό για την χρησιμοποίηση του στην υλοποίηση διαχειριστικών συστημάτων για τα δίκτυα DVB-T.

Τέλος στο Κεφάλαιο 7, περιγράφονται αναλυτικά όλες οι καινοτομίες και τα πολύτιμα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής, αλλά ταυτόχρονα οριοθετούνται σημαντικά θέματα και προβλήματα, στα οποία θα πρέπει να εσκήψουν οι μελλοντικοί ερευνητές, στην πορεία εξέλιξης της ιδέας των συστημάτων 4^{ης} Γενιάς αλλά και προς την κατεύθυνση αξιοποίησης των συστημάτων DVB-T.

2. Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς και Συστήματα DVB-T.

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται μια ανασκόπηση των ερευνητικών δραστηριοτήτων σε σχέση με τα Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς, επικεντρώνοντας ταυτόχρονα στις τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις στο χώρο των συστημάτων DVB-T.

Η σύγκλιση των παραδοσιακών τηλεπικοινωνιακών δικτύων και του Internet [PD00], η οποία πραγματοποιείται μέσω την χρήσης του πρωτοκόλλου IP, έδωσε νέα ώθηση στον σχεδιασμό και υλοποίηση των σύγχρονων δικτύων. Τα μελλοντικά συστήματα επικοινωνιών θα πρέπει να υποστηρίζουν υπηρεσίες IP, σε διαφορετικά επίπεδα ποιότητας, να επιτρέπουν την συνεργασία με άλλα δίκτυα, να παρέχουν τις αναγκαίες υποδομές για την διαχείριση της κινητικότητας, της ασφαλούς μετάδοσης των δεδομένων, της χρέωσης των χρηστών κτλ. Η υιοθέτηση νέων αρχιτεκτονικών που θα διευκολύνουν την συνεργασία μεταξύ δικτύων διαφορετικής τεχνολογίας, κρίνεται απαραίτητη προς την πορεία της προτυποποίησης και υλοποίησης των Δικτύων 4^{ης} Γενιάς.

Προς την κατεύθυνση αυτή, η παράγραφος 2.2 αναλύει τις βασικές απαιτήσεις, αλλά και τις πιο σημαντικές αρχιτεκτονικές, που έχουν προταθεί από την επιστημονική κοινότητα, στην πορεία πραγματοποίησης συστημάτων 4^{ης} Γενιάς. Το κάθε αρχιτεκτονικό μοντέλο αναλύεται και αξιολογείται σε σχέση με τα πλεονέκτημα και τα μειονέκτημα που παρουσιάζει. Επιπλέον, περιγράφεται η ακολουθούμενη δομή στα πλαίσια υλοποίησης του πειραματικού μας Δικτύου 4^{ης} Γενιάς, το οποίο στοχεύει εκτός των άλλων στην αξιοποίηση και ενσωμάτωση των συστημάτων DVB-T.

Στην συνέχεια, η παράγραφος 2.3, ασχολείται με την μελέτη των στόχων και των αποτελεσμάτων, των πιο σημαντικών παρόμοιων ερευνητικών δραστηριοτήτων, στην κατεύθυνση υλοποίησης Δικτύων 4^{ης} Γενιάς.

Το κεφάλαιο συνεχίζει (παράγραφοι 2.4 και 2.5) με την παρουσίαση των τεχνολογικών λεπτομερειών και πρόσφατων εξελίξεων σε σχέση με τα συστήματα DVB-T, επικεντρώνοντας στα οφέλη που θα παρουσιαστούν μέσω της ενσωμάτωσης τους στα Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς. Η αναφορά στα συστήματα DVB-T ολοκληρώνεται μέσα από μια διεξοδική αναφορά σε άλλες ερευνητικές προσπάθειες, οι οποίες στοχεύουν στην αξιοποίηση τους στην παροχή υπηρεσιών IP.

Τέλος, το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παράγραφο της ανακεφαλαίωσης.

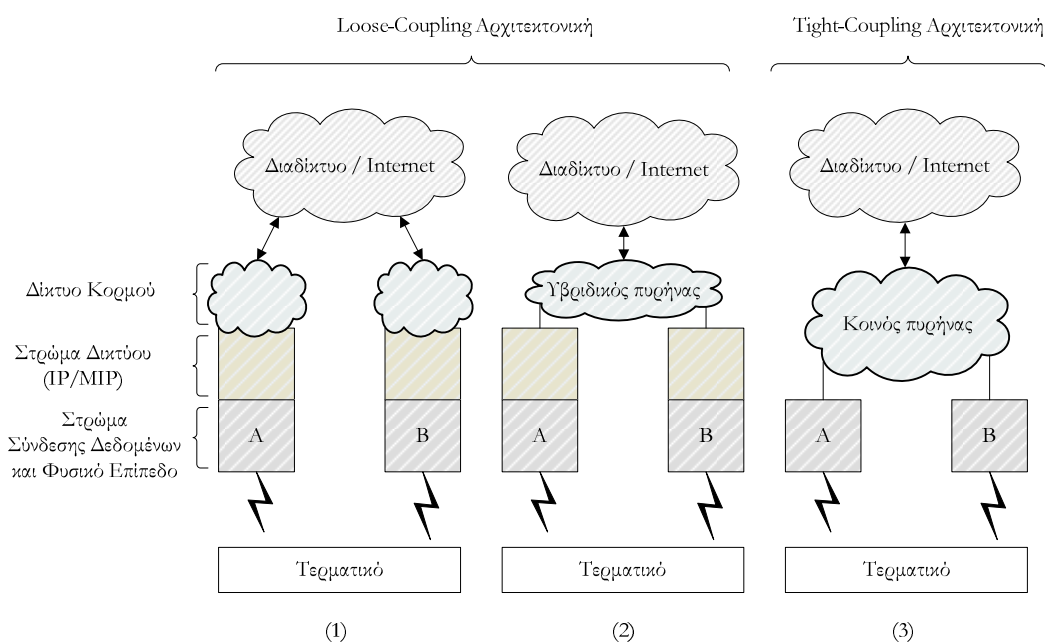
2.2 Απαιτήσεις και Αρχιτεκτονικές Υλοποίησης Ασύρματων Δικτύων 4^{ης} Γενιάς (4G).

Οι κυρίαρχοι στόχοι των Δικτύων 4^{ης} Γενιάς είναι η προσφορά υπηρεσιών IP προς τους χρήστες, κατά τρόπο διαφανή (*transparent*) ως προς το χρησιμοποιούμενο ασύρματο δίκτυο. Επιπλέον, ο ακολουθούμενος σχεδιασμός θα πρέπει να πραγματοποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μην επηρεάζεται η κανονική λειτουργία των επιμέρους δικτύων και ταυτόχρονα να διευκολύνετε η ενσωμάτωση οποιασδήποτε νεοεμφανιζόμενης ασύρματης τεχνολογίας. Με βάση αυτούς τους στόχους ορίζονται οι παρακάτω βασικές απαιτήσεις :

- **Υπαρξη Προηγμένων Πολυτροπικών Τερματικών (*multi-mode ή multi-interfaced terminals*).** Η λειτουργία περισσότερων του ενός ασύρματου συστήματος, της ίδιας ή διαφορετικής τεχνολογίας, στην Περιοχή Εξυπηρέτησης του χρήστη, απαιτεί την δημιουργία εξελιγμένων τερματικών, ικανά να προσπελάσουν παραπάνω από ένα τύπο δικτύου [MD+01].
- **Επιλογή του καταλληλότερου ασύρματου δικτύου.** Μια πολύ σημαντική πτυχή των συστημάτων 4^{ης} Γενιάς είναι η δυνατότητα πολλαπλών επιλογών που διαθέτει πλέον το τερματικό σε σχέση με το ασύρματο δίκτυο εξυπηρέτησης. Τα κριτήρια με βάση τα οποία θα προσδιοριστεί το καταλληλότερο μέσο πρόσβασης, σχετίζονται με παράγοντες όπως η κυκλοφοριακή κατάσταση στην πλευρά των δικτύων, το κόστος σύνδεσης, οι συνθήκες ραδιοκάλυψης κτλ. [GJ03], [KM+01]. Επιπλέον, οι τρόποι προσπέλασης των υπηρεσιών σε τέτοιου είδους συστήματα διακρίνονται σε αυτούς που η επιλογή του καταλληλότερου δικτύου πραγματοποιείται ανά υπηρεσία, οδηγώντας σε ταυτόχρονη χρήση περισσότερων ασύρματων τεχνολογιών (*multi-homing*) και σε αυτούς που η τελική απόφαση σταθμίζει τις ανάγκες όλων των υπηρεσιών μαζί (χρήση ενός μόνο δικτύου – *single-homing*).
- **Διαχείριση Κινητικότητας.** Οι προτεινόμενες αρχιτεκτονικές θα πρέπει να υποστηρίζουν αποτελεσματικές (*seamless*) διασυστηματικές μεταπομπές (*inter-system ή vertical handovers*) μεταξύ διαφορετικών δικτύων, αλλά και ενδοσυστηματικές μεταπομπές (*intra-system ή horizontal handovers*) μεταξύ διαφορετικών σημείων πρόσβασης του ίδιου δικτύου.
- **Υποστήριξη μηχανισμών ποιότητας (QoS).** Η εισαγωγή μηχανισμών ποιότητας end-to-end, σε Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς, είναι αναγκαία για την υποστήριξη προηγμένων υπηρεσιών IP. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην σημασία της συνεργασία των μηχανισμών ποιότητας που υλοποιούνται στα ανώτερα επίπεδα των πρωτοκόλλων με στοιχεία του φυσικού (*physical layer*) και του στρώματος σύνδεσης των δεδομένων (*data link layer*). Επιπλέον, οι μηχανισμοί ποιότητας θα πρέπει να είναι συμβατοί με τους μηχανισμούς διαχείρισης της κινητικότητας.

- **Ασφάλεια.** Η ασφάλεια κατά την μεταφορά των δεδομένων, από και προς τον χρήστη, πρέπει να διατηρηθεί στο ίδιο επίπεδο με αυτό της αυτόνομης λειτουργίας των δικτύων. Τα κυριότερα προβλήματα παρουσιάζονται κατά την διάρκεια των διασυστηματικών μεταπομπών.
- **Απλότητα, Επεκτασιμότητα, Κλιμάκωση προς τα επάνω (*Scalability*), χαμηλό κόστος.** Η αρχιτεκτονική θα πρέπει να οδηγεί σε εφικτές υλοποιήσεις, αποφεύγοντας την επιβάρυνση της κανονικής λειτουργίας των δικτύων με πολύπλοκα πρωτόκολλα σηματοδότησης ή δραματικές αλλαγές στον τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό, διατηρώντας παράλληλα ανεπηρέαστη την δυνατότητα υποστήριξης των «παραδοσιακών» χρηστών τους. Επιπλέον, θα πρέπει να διευκολύνεται η επέκταση των συστημάτων 4^{ης} Γενιάς, μέσω της ενσωμάτωσης νέων δικτύων. Τέλος τα συστήματα προορίζονται στο να προσφέρουν υπηρεσίες σε εκατομμύρια χρήστες, επομένως θα πρέπει να προσφέρουν κλιμάκωση προς τα επάνω (*scalability*) και χαμηλό κόστος υλοποίησης και λειτουργίας.
- **Διαχείριση Ενέργειας.** Οι πολιτικές διαχείρισης ενέργειας, ιδιαίτερα στην πλευρά των τερματικών διαδραματίζουν πολύ σπουδαίο ρόλο, επηρεάζοντας τις επιδόσεις των ενεργών υπηρεσιών αλλά και την διάρκεια της μπαταρίας τους.

Η αρχιτεκτονική που ακολουθείται κατά την διάρκεια υλοποίησης συστημάτων 4^{ης} Γενιάς επηρεάζεται έντονα από το επιχειρηματικό μοντέλο (*business model*) που θα υιοθετηθεί, σε σχέση με το ιδιοκτησιακό καθεστώς των ασύρματων δικτύων. Τα προτεινόμενα μελλοντικά επιχειρηματικά μοντέλα, συνοψίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα συνεργαζόμενα δίκτυα, τα οποία ανήκουν και λειτουργούν, κάτω από την εποπτεία κοινού NP (*Network Provider*), δηλαδή ανήκουν σε κοινό διαχειριστικό τομέα (*Common Administrative Domain - CAD*). Η δεύτερη κατηγορία αναφέρεται στα ασύρματα δίκτυα με ξεχωριστούς ιδιοκτήτες το καθένα, τα οποία συνεργάζονται προς την κατεύθυνση υλοποίησης συστημάτων 4^{ης} Γενιάς, μέσα από διαφορετικούς διαχειριστικούς τομείς (*Different Administrative Domains - DAD*). Πριν προχωρήσουμε με την ανάλυση του τρόπου που επηρεάζει το επιχειρηματικό μοντέλο την τελική διαμόρφωση της δομής ενός δικτύου 4^{ης} Γενιάς, παρουσιάζουμε πρώτα τις δυο πιο σημαντικές αρχιτεκτονικές, όπως αυτές προτείνονται από το European Telecommunications Standards Institute (ETSI) [ETSI01] και αναπαριστώνται γραφικά στο Σχήμα 2-1, ενδεικτικά για δυο δίκτυα (Α και Β).



Σχήμα 2-1. Σημαντικότερα Αρχιτεκτονικά Μοντέλα υλοποίησης συστημάτων 4^{ης} Γενιάς

Η δομή 1, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-1 είναι γνωστή ως Αρχιτεκτονική Χαλαρής Σύζευξης (*Loose-coupling architecture*). Πιο συγκεκριμένα, η διασύνδεση των ασυρμάτων συστημάτων που συμμετέχουν στην υλοποίηση ενός περιβάλλοντος 4^{ης} Γενιάς με βάση την δομή 1, στηρίζεται στα υψηλότερα στρώματα πρωτοκόλλου του Internet (στρώμα Συνόδου και Μεταφοράς) και στην χρήση τεχνολογιών όπως είναι το Mobile IP. Επιπλέον, το κάθε δίκτυο διατηρεί αναλλοίωτη την εσωτερική του οργάνωση, όπως για παράδειγμα το σύστημα χρέωσης και πιστοποίησης των χρηστών, τον ενδοσυστηματικό μηχανισμό κινητικότητας, τον μηχανισμό ασφάλειας κ.α. (δικτυακά στοιχεία κορμού - *backbone network*). Η υποστήριξη των διασυστηματικών μεταπομπών όπως ήδη αναφέρθηκε, υλοποιείται μέσω μηχανισμών κινητικότητας υψηλού επιπέδου (π.χ. Mobile IP-MIP), ενώ για τις ενδοσυστηματικές μεταπομπές παραμένουν υπεύθυνα τα ίδια τα δίκτυα. Στο Σχήμα 2-1/δομή 2 απεικονίζεται μια παραλλαγή της αρχιτεκτονικής loose-coupling. Η χρήση του ίδιου δικτύου κορμού ή του λεγόμενου Υβριδικού πυρήνα (*hybrid core*), βελτιώνει τις επιδόσεις κατά την διάρκεια της συνεργασίας των ασυρμάτων τεχνολογιών, αφού επιτρέπει την διασύνδεση τους, χωρίς την μεσολάβηση του Διαδικτύου. Επιπλέον, πολλές λειτουργίες όπως η πιστοποίηση των χρηστών ή η διευθυνσιοδότηση τους, ενδέχεται να είναι κοινές για όλα τα δίκτυα. Παρόλα αυτά, τα συμμετέχοντα ασύρματα δίκτυα παραμένουν σχεδόν αναλλοίωτα ως προς τις βασικές τους λειτουργίες στα κατώτερα στρώματα των πρωτοκόλλων.

Η δομή 3, του σχήματος (Σχήμα 2-1) αναφέρεται στην διεθνή βιβλιογραφία ως Αρχιτεκτονική Tight-Coupling ή Αρχιτεκτονική Στενής Σύζευξης. Στα συστήματα 4^{ης} Γενιάς που ακολουθείτε το συγκεκριμένο μοντέλο αρχιτεκτονικής, οι επιμέρους ασύρματες τεχνολογίες συγκλίνουν ως και το επίπεδο της σύνδεσης δεδομένων και του φυσικού στρώματος. Τα δικτυακά στοιχεία (*Radio Access Ports – R-APs*) που συνθέτουν τα διαφορετικά ασύρματα συστήματα ενοποιούνται μέσω του ορισμού

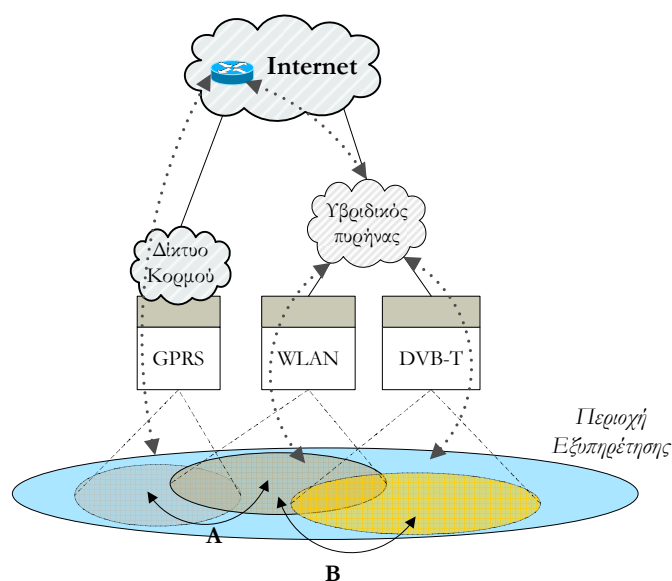
νέων διεπαφών συνεργασίας και τροποποίησης του τρόπου δρομολόγησης των δεδομένων. Πιο χαρακτηριστικές, είναι οι περιπτώσεις της κοινής σηματοδότησης, με στόχο την συνολική διαχείριση της κινητικότητας, της χρέωσης και πιστοποίησης των χρηστών, αλλά και της δρομολόγησης των δεδομένων μέσα στο κοινό πυρήνα λειτουργίας (*common core*) του συστήματος. Ο διαχωρισμός ανάμεσα σε ενδοσυστηματικές και διασυστηματικές μεταπομπές παύει να υφίσταται, αφού τα διαφορετικά RAPs αντιμετωπίζονται ως διαφορετικά σημεία πρόσβασης του ίδιου δικτύου. Οι πιο πάνω διαπιστώσεις, συνεπάγονται για τα ασύρματα δίκτυα σημαντικές αλλαγές στη δομή και την λειτουργία τους, ενώ η υλοποίηση παρουσιάζει μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας. Παρόλα αυτά, η αρχιτεκτονική *tight-coupling* εμφανίζει καλλίτερες επιδόσεις σε σχέση με τις απαιτήσεις που περιγράφηκαν στην αρχή της παραγράφου. Ο πίνακας που ακολουθεί πραγματοποιεί μια συγκριτική μελέτη των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων της κάθε αρχιτεκτονικής, ενώ παρουσιάζει την συμβατότητα τους με τα επιχειρηματικά μοντέλα που αναλύθηκαν προηγουμένως.

| Αρχιτεκτονική | Πλεονεκτήματα | Μειονεκτήματα | Συμβατότητα με τα Επιχειρηματικά μοντέλα |
|--|--|--|---|
| Χαλαρή Σύζευξη (<i>loose-coupling</i>) | <ul style="list-style-type: none"> - χαμηλό κόστος υλοποίησης και βαθμός πολυπλοκότητας. - επεκτασιμότητα με την εισαγωγή νέων ασύρματων τεχνολογιών, χωρίς να επηρεάζεται η δομή του συστήματος - μικρή επιβάρυνση στον παραδοσιακό τρόπο λειτουργίας των επιμέρους ασύρματων δικτύων - επιτρέπετε η αυτόνομη λειτουργία των δικτύων με ξεχωριστούς NPs | <ul style="list-style-type: none"> - χαμηλές επιδόσεις κατά την διάρκεια των διασυστηματικών μεταπομπών. - επικάλυψη των λειτουργιών της πιστοποίησης και χρέωσης των χρηστών, αλλά και ανάγκη για δημιουργία επιπλέον υποδομών για την συνολική τους διαχείριση. - σημαντικές αδυναμίες στον τομέα ασφάλειας, ιδιαίτερα κατά την διάρκεια των διασυστηματικών μεταπομπών. - χαμηλές επιδόσεις και μεγάλη πολυπλοκότητα στην κατεύθυνση προσφοράς υπηρεσιών με υψηλό επίπεδο ποιότητας εξαιτίας της δυσκολίας ανάπτυξης ολοκληρωμένων μηχανισμών QoS (Quality of Service). - μικρή κλιμάκωση προς τα επάνω (<i>low scalability</i>) | Είναι συμβατό και με τα δυο επιχειρηματικά μοντέλα. |
| Χαλαρή Σύζευξη με Υβριδικό πυρήνα (<i>loose-coupling with hybrid core</i>) | <ul style="list-style-type: none"> - βελτίωση του επιπέδου ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών, εξαιτίας της άμεσης σύζευξης των επιμέρους δικτύων, χωρίς την παρέμβαση του Internet. - βελτίωση της απόδοσης και της ασφάλειας κατά την διάρκεια των διασυστηματικών μεταπομπών - αποφυγή της αλληλοεπικάλυψης των λειτουργιών πιστοποίησης και χρέωσης των χρηστών. | | Προτιμάτε για την περίπτωση της υλοποίησης συστημάτων με κοινό διαχειριστικό τομέα. |
| Στενή Σύζευξη (<i>tight-coupling</i>) | <ul style="list-style-type: none"> - άριστες επιδόσεις κατά την διάρκεια των διασυστηματικών μεταπομπών. - ολοκληρωμένη διαχείριση των θεμάτων ασφάλειας, | <ul style="list-style-type: none"> - μεγάλος βαθμός πολυπλοκότητας κατά την διάρκεια σχεδίασης και υλοποίησης. - ανάγκη για σημαντικές | Αποκλειστικά για την περίπτωση της υλοποίησης συστημάτων με κοινό |

| | | | |
|--|---|---|-----------------------------|
| | <p>πιστοποίησης και χρέωσης των χρηστών.</p> <ul style="list-style-type: none"> - δυνατότητα υποστήριξης υπηρεσιών υψηλού επιπέδου μέσω των αυξημένων δυνατοτήτων που παρέχει ο έλεγχος σε όλα τα στάδια της μεταφοράς των δεδομένων. - παροχή δυνατότητας κλιμάκωσης προς τα επάνω | <p>αλλαγές στην λειτουργία των δικτύων με αποτέλεσμα την μη υποστήριξη των παραδοσιακών χρηστών, σε ορισμένες περιπτώσεις</p> <ul style="list-style-type: none"> - μεγάλος κόστος ανάπτυξης αφού απαιτείται η εγκατάσταση και τροποποίηση των υπαρχόντων δομών τόσο στην πλευρά των δικτύων αλλά και των τερματικών - αδυναμία επέκτασης τους με την εισαγωγή νέων ασύρματων δικτύων. - υψηλό επίπεδο πολυπλοκότητας κατά την διάρκεια λειτουργίας - μη υποστήριξη διαφορετικών NPs - απροθυμία των NPs να προβούν σε δραματικές αλλαγές στις υπάρχουσες υποδομές. | <p>διαχειριστικό τομέα.</p> |
|--|---|---|-----------------------------|

Πίνακας 2-1. Συγκριτική παρουσίαση των αρχιτεκτονικών Loose και Tight-coupling.

Με βάση τα συγκριτικά στοιχεία του παραπάνω πίνακα, πραγματοποιήθηκε και η επιλογή της ακολουθούμενης αρχιτεκτονικής, στα πλαίσια υλοποίησης του πειραματικού Δικτύου 4^{ης} Γενιάς. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο διαδραμάτισε το γεγονός ότι το ασύρματο δίκτυο GPRS βρισκόταν στο διαχειριστικό τομέα μιας εμπορικής εταιρείας (Vodafone), ενώ αντίθετα τα συστήματα DVB-T και IEEE 802.11b WLAN θα αναπτυσσόταν στο εργαστηριακό περιβάλλον, επιτρέποντας την κοινή διαχείρισή τους. Η δομή που τελικά ακολουθήθηκε απεικονίζεται στο Σχήμα 2-2 και αποτελεί ένα συνδυασμό των δυο παραλλαγών της αρχιτεκτονικής loose-type coupling, όπως παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 2-1.



Σχήμα 2-2. Αρχιτεκτονική πειραματικού ΠΑΕΔ

Επιπλέον, στο ίδιο σχήμα απεικονίζονται δυο διακριτές περιπτώσεις (Α και Β) διασυστηματικών μεταπομπών. Η κατηγοριοποίηση πραγματοποιείται με βάση τα δυο αρχιτεκτονικά μοντέλα που ακολουθούνται στην δόμηση του. Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη περίπτωση (Α), περιλαμβάνονται οι μεταπομπές μεταξύ δικτύων που ανήκουν σε διαφορετικούς διαχειριστικούς τομείς (π.χ. GPRS/WLAN ή GPRS/DVB-T). Όπως ήταν αναμενόμενο από την ως τώρα ανάλυση, οι επιδόσεις αυτού του είδους των μεταβάσεων αναμένονται σχετικά χαμηλές, εξαιτίας του γεγονότος ότι η διασύνδεση των δικτύων επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης του Internet. Αντίθετα, η δεύτερη κατηγορία (Β) αναφέρεται στις περιπτώσεις μεταπομπής ανάμεσα σε δίκτυα, τα οποία συνυπάρχουν στον ίδιο διαχειριστικό τομέα (WLAN/DVB-T). Η χρήση του ίδιου δικτύου κορμού, αναμένεται να επηρεάσει θετικά τις επιδόσεις των μεταβάσεων αυτού του τύπου. Η αιτία έγκειται στο γεγονός ότι η αλλαγή στην δρομολόγηση των δεδομένων κατά την διάρκεια της μεταπομπής, για την περίπτωση Β, πραγματοποιείται στο επίπεδο του υβριδικού πυρήνα (όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 2-2), οδηγώντας με τον τρόπο αυτό στην εξάλειψη των μεταβατικών φαινομένων (π.χ. απώλειες πακέτων).

Στην συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι πιο σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες στον χώρο ανάπτυξης πραγματικών Δικτύων 4^{ης} Γενιάς, των οποίων η μελέτη και τα αποτελέσματα συνέβαλλαν ουσιαστικά στην υλοποίηση της δικής μας πειραματικής πλατφόρμας.

2.3 Στόχοι και Αποτελέσματα συναφών ερευνητικών δραστηριοτήτων στο χώρο των Δικτύων 4^{ης} Γενιάς

Οι προδιαγραφές και η υλοποίηση συστημάτων 4^{ης} Γενιάς έχουν απασχολήσει πολλές ερευνητικές ομάδες. Ως σήμερα έχουν παρουσιαστεί μια σειρά από προτάσεις για ολοκληρωμένες αρχιτεκτονικές ενοποίησης, σχεδόν για όλες τις περιπτώσεις των ασύρματων δικτύων. Δυστυχώς όμως σε σχέση με τα συστήματα DVB-T η ερευνητική δραστηριότητα αλλά και οι υλοποιήσεις που έχουν ως τώρα παρουσιαστεί, είτε περιορίζονται στην θεωρητική περιγραφή αρχιτεκτονικών ενσωμάτωσης ή στην δημιουργία απλών υβριδικών δικτύων DVB-T (βλέπε για περισσότερες λεπτομέρειες στην παράγραφο 2.5).

Πριν όμως προχωρήσουμε στην παρουσίαση των κυριότερων προσπαθειών παροχής υπηρεσιών IP μέσω των συστημάτων DVB-T, είναι σκόπιμο να εξεταστεί το γενικότερο ερευνητικό πλαίσιο μέσω της αναφοράς των πιο σημαντικών δραστηριοτήτων στον τομέα των Δικτύων 4^{ης} Γενιάς.

Οι βασικοί στόχοι των παρακάτω ερευνητικών προσπαθειών είναι η παρουσίαση συστημάτων που θα προσφέρουν την δυνατότητα ενοποιημένης λειτουργίας διαφορετικών τύπων ασύρματων τεχνολογιών, η εισαγωγή μηχανισμών που θα εξασφαλίζουν υπηρεσίες με υψηλό επίπεδο ποιότητας (Διαχείριση Ποιότητας), η διαχείριση της κινητικότητας αλλά και των δικτυακών πόρων. Πολλές από τις εργασίες που έχουν παρουσιαστεί αφορούν την βελτίωση της χωρητικότητας των κυψελωτών δικτύων δεύτερης και τρίτης γενιάς, μέσω της προσθήκης «νησίδων» WLANs [DO+03]. Μεγάλη ώθηση έδωσε και η αναγνώριση της ανάγκης για σύγκλιση μεταξύ των κυψελωτών δικτύων και των δικτύων WLANs από την 3GPP (3rd Generation Partnership Project [3GPP02]). Πιο συγκεκριμένα, οι [SF+02] παρουσίασαν μια ερευνητική προσπάθεια, η οποία ασχολείται με την ανάλυση εις βάθος των δυνατοτήτων ενοποίησης του κυψελωτού συστήματος GPRS και του δικτύου IEEE 802.11 WLAN. Επιπλέον, προδιαγράφονται πλήρως οι απαραίτητες αλλαγές στην εσωτερική δομή των δικτύων, για τις περιπτώσεις της αρχιτεκτονικής loose και tight-coupling. Πολλές από τις προτάσεις της συγκεκριμένης δουλειάς, ακολούθηθηκαν και κατά την διάρκεια υλοποίησης του πειραματικού μας Δικτύου 4^{ης} Γενιάς. Παρόμοιες προσπάθειες έχουν πραγματοποιηθεί για την περίπτωση συνεργασίας δικτύων WLANs (IEEE 802.11 και HIPERLAN/2 [KSM+02]) και νέων συστημάτων 3^{ης} Γενιάς, όπως το UMTS [AH+03], και τα CDMA-2000/WCDMA [HO+02], [BC+03].

Ταυτόχρονα με την παρουσίαση νέων αρχιτεκτονικών, προς την κατεύθυνση σύγκλισης των ασύρματων δικτύων, μια σειρά από εργασίες όπως [RK+01], [MA+03], στοχεύουν στην εξασφάλιση υψηλού επιπέδου ποιότητας υπηρεσιών, μέσω της χρήσης ολοκληρωμένων συστημάτων διαχείρισης, τόσο των υπηρεσιών όσο και των δικτύων (*Network and Service Management Systems – NSMSs*), αλλά και θεμάτων που έχουν σχέση με την διαχείριση των δικτυακών πόρων [LU+03]. Σημειώνεται εδώ

ότι στα πλαίσια του IST Project MONASIDRE (<http://www.monasidre.com>), υλοποιήθηκε ένα ολοκληρωμένο NSMS [DK+03], στο οποίο στηρίχθηκε η διαχειριστική οντότητα που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες λειτουργίας του πειραματικού μας Δικτύου 4^{ης} Γενιάς και για την ενσωμάτωση των συστημάτων DVB-T.

Τέλος, στην πορεία εδραίωσης της ιδέας των Δικτύων 4^{ης} Γενιάς υλοποιήθηκαν αρκετές πειραματικές πλατφόρμες με πιο αντιπροσωπευτικές τις προσπάθειες των [GA+02], [WQ+01], [MS+01] και [IM+04]. Τονίζεται ότι η δική μας πλατφόρμα, η οποία θα παρουσιαστεί στα επόμενα κεφάλαια, αποτελεί την πρώτη ολοκληρωμένη προσπάθεια, σε παγκόσμιο επίπεδο, όπου ενοποιείται η λειτουργία τριών διαφορετικών ασύρματων δικτύων, εκ των οποίων το ένα είναι το επίγειο σύστημα ψηφιακής βιντεοεκπομπής (DVB-T).

2.4 Αρχές Επίγειας Ψηφιακής Βιντεοεκπομπής (DVB-T)

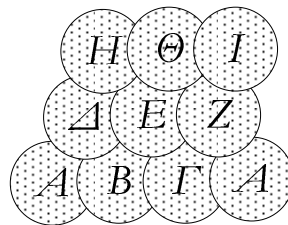
Η επιτροπή για την προτυποποίηση της Ψηφιακής Βιντεοεκπομπής (*Digital Video Broadcasting*) ιδρύθηκε το Σεπτέμβριο του 1993. Κοινός στόχος, τόσο των δημόσιων όσο και των ιδιωτικών εταιρειών του χώρου της τηλεόρασης που συμμετείχαν, ήταν η παροχή Υπηρεσιών Ψηφιακής Βιντεοεκπομπής, βασισμένες στο μορφότυπο (*format*) MPEG-2, [MPEG95], [MPEG+95]. Σήμερα πάνω από 225 οργανισμοί, σε περισσότερες από 30 χώρες ασχολούνται ενεργά με την αξιοποίηση των υπηρεσιών ψηφιακής βιντεοεκπομπής και την παραγωγή του απαραίτητου ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (*ETSI*) μαζί με το European Center for Electrotechnical Standards (*CENELEC*) και το European Broadcast Union (*EBU*), είναι υπεύθυνοι για την δημιουργία και διαχείριση των προτύπων που διέπουν την ψηφιακή βιντεοεκπομπή. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν πάνω από 100 προδιαγραφές, οι οποίες ρυθμίζουν τα θέματα μετάδοσης (*transmission*), πολυπλεξίας του περιεχομένου (*multiplexing*), ήχου, υποτιτλισμού (*subtitling*), διαδραστικών υπηρεσιών (*Interactive services*) κ.α.

Παράλληλα με την εισαγωγή των υπηρεσιών ψηφιακής βιντεοεκπομπής μέσω των δικτύων DVB, δημιουργήθηκαν και πρότυπα, τα οποία περιγράφουν τις μεθόδους για την μεταφορά δεδομένων IP. Έτσι, ο συνδυασμός των υψηλών ρυθμών μετάδοσης που μπορούν να επιτευχθούν με την χρήση δικτύων ψηφιακής βιντεοεκπομπής, των νέων πρωτοκόλλων και αρχιτεκτονικών που αναπτύσσονται στον τομέα της παροχής υπηρεσιών IP, αλλά και την πιο αποτελεσματική συνεργασία (*interworking*) με άλλα ασύρματα συστήματα (προσπάθεια της IP over DVB ομάδας εργασίας της IETF, <http://www.ietf.org>), καθιστούν την αξιοποίηση των δικτύων DVB ωφέλιμη, τόσο για τους NPs αλλά και για τους χρήστες.

Στην κεφάλαιο αυτό, όπως και σε όλη την διδακτορική διατριβή θα ασχοληθούμε μόνο με τα επίγεια δίκτυα ψηφιακής βιντεοεκπομπής (*DVB-Terrestrial*) [EN300-744], τα οποία με τις κατάλληλες αναβαθμίσεις στον εξοπλισμό τους, είναι δυνατόν εκτός της παροχής «παραδοσιακών» υπηρεσιών τηλεόρασης, να μεταφέρουν και δεδομένα IP (τα λεγόμενα *IP-enabled DVB-T* δίκτυα ή πιο γενικά *interactive DVB-T networks*).

2.4.1 Αρχιτεκτονική Δικτύου DVB-T – Ρόλος των SFNs

Σπουδαίο ρόλο στην ανάπτυξη (*deployment*) και τον σχεδιασμό των δικτύων DVB-T διαδραματίζει η έννοια των Single Frequency Networks (SFNs, *Δίκτυα Μονής Συχνότητας*), σε αντίθεση με τα Multi-Frequency Networks (MFN, *Δίκτυα Πολλαπλών Συχνοτήτων*), που χρησιμοποιούνται συνήθως στην ανάπτυξη των αναλογικών συστημάτων τηλεόρασης. Ενδεικτικά, το Σχήμα 2-3 παρουσιάζει την οργάνωση των πομπών και των συχνοτήτων ενός συμβατικού αναλογικού δικτύου τηλεόρασης για την εκπομπή ενός τηλεοπτικού προγράμματος. Το έντονο φαινόμενο της ομοδιαυλικής παρεμβολής (*co-channel interference*) που εμφανίζεται στα συστήματα εκπομπής αναλογικής τηλεόρασης καθιστά απαγορευτική την επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων (*frequency re-use*) στα όρια μιας περιοχής. Επακόλουθο αυτού του φαινομένου είναι η μη αποτελεσματική αξιοποίηση του φάσματος και η κατασπατάληση των διαθέσιμων συχνοτήτων, γεγονός που απεικονίζεται και στο Σχήμα 2-3 (χρήση 9 ραδιοσυχνοτήτων, Α ως Ι για την κάλυψη της συγκεκριμένης περιοχής).



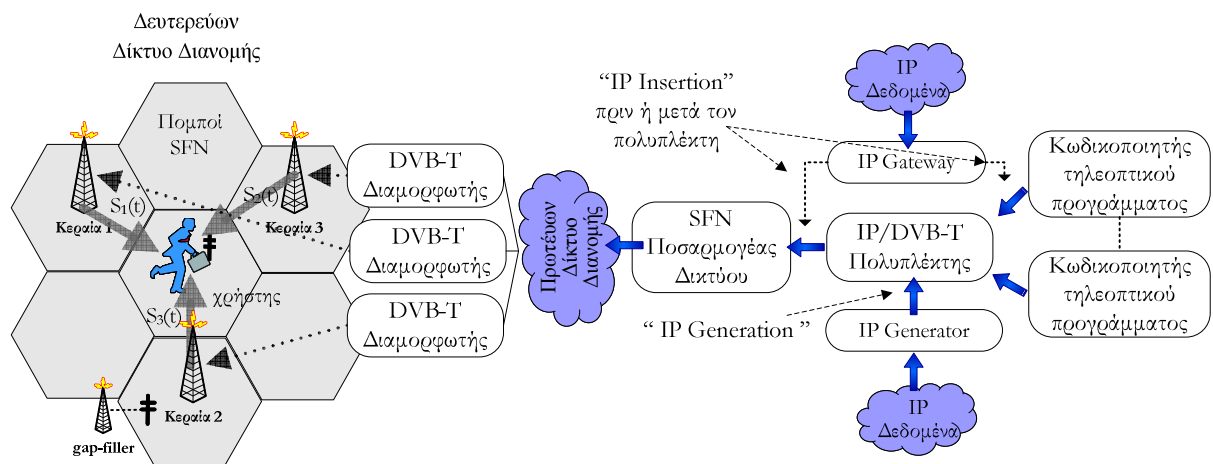
Σχήμα 2-3. Κατανομή συχνοτήτων στα πλαίσια ενός MFN αναλογικού δικτύου τηλεόρασης.

Από την άλλη, τα δίκτυα SFN κάνουν χρήση ενός συνόλου πομπών, κατάλληλα τοποθετημένων μέσα στην υπό κάλυψη περιοχή και συγχρονισμένων έτσι ώστε να εκπέμπουν το ίδιο ακριβώς περιεχόμενο, στην ίδια συχνότητα, την ίδια χρονική στιγμή. Η αρχιτεκτονική SFN επιφέρει καλλίτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων συχνοτήτων, αλλά μειώνει και την συνολικά εκπεμπόμενη ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα, σε σχέση με την αξιοποίηση του φάσματος, στο προηγούμενο παράδειγμα θα ήταν εφικτή η παροχή του ίδιου τηλεοπτικού προγράμματος μόνο με την χρήση μιας συχνότητας, δηλαδή μείωση στο 1/9 των απαιτήσεων σε φάσμα. Επίσης, αν λάβει κανείς υπόψη του την προσφερόμενη χωρητικότητα από τα δίκτυα DVB-T ανά συχνότητα (ως και 5 διαφορετικά ψηφιακά τηλεοπτικά προγράμματα), τότε στην τοπολογία που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 2-3, θα ήταν δυνατή η παρουσία 45 διαφορετικών τηλεοπτικών προγραμμάτων με μόνο 9 συχνότητες.

Στην συνέχεια, όπως ήδη αναφέρθηκε, με την χρήση του τρόπου διάθρωσης SFN ενός δικτύου DVB-T, μειώνεται η συνολικά εκπεμπόμενη ενέργεια από τους πομπούς που το αποτελούν, σε σχέση με τα δίκτυα MFN. Μέσω του κατάλληλου σχεδιασμού του δικτύου, τα πολλαπλά αντίγραφα του ίδιου σήματος που καταφθάνουν σε ένα δέκτη, προερχόμενα από τους πομπούς που συνθέτουν το SFN, συνεισφέρουν θετικά στο λόγο Σήματος / Παρεμβολής (*Signal to Interference Ratio - SIR*). Βασική προϋπόθεση κατά την διάρκεια λήψης των πολλαπλών σημάτων, είναι η καθυστέρηση

διάδοσης τους να μην ξεπερνάει ένα συγκεκριμένο χρονικό όριο ασφαλείας (*time guard interval*). Τέλος, σε περιοχές με έντονο το φαινόμενο σκίασης (*shadow effect*), η χρήση αναμεταδοτών επαναενίσχυσης, γνωστοί ως και πληρωτές κενού (*gap-fillers*), βελτιώνουν σημαντικά το επίπεδο ραδιοκάλυψης.

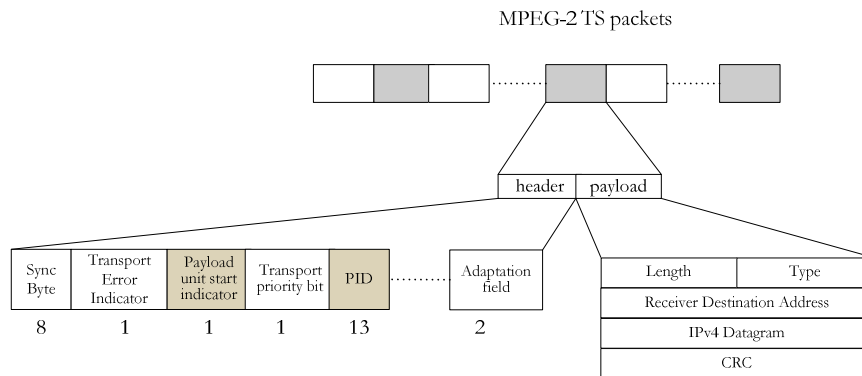
Η ανάπτυξη ενός δικτύου SFN, καθώς και η γραφική αναπαράσταση των πολλαπλών σημάτων που λαμβάνει ένας χρήστης, δίνονται στο Σχήμα 2-4. Επίσης, στο ίδιο σχήμα απεικονίζονται και τα απαραίτητα δικτυακά στοιχεία, τόσο για την παροχή τηλεοπτικών υπηρεσιών αλλά και για την παροχή υπηρεσιών IP. Ακολουθεί αμέσως μετά, μια αναλυτική περιγραφή του τρόπου λειτουργίας (εστιάζοντας στην παραγωγή δεδομένων IP) και του ρόλου του καθενός από τα δικτυακά στοιχεία της αρχιτεκτονικής ενός συστήματος DVB-T.



Σχήμα 2-4. Αρχιτεκτονική ενός DVB-T δικτύου.

Οι δυνατοί τρόποι που τα δεδομένα IP μπορούν να ενσωματωθούν στο τελικό, προς μετάδοση, ρεύμα μεταφοράς MPEG-2 (*MPEG-2 TS-transport stream*) είναι δυο. Ο πρώτος στηρίζεται στην κωδικοποίηση και παραγωγή ενός MPEG-2 TS αποκλειστικά με δεδομένα IP (τεχνική *“generation”*), το οποίο διοχετεύεται απευθείας στον πολυπλέκτη DVB-T. Η δεύτερη μέθοδος υλοποιείται μέσω της ενθυλάκωσης (*encapsulation*) των δεδομενογραμμάτων (*datagrams*) μέσα σε ένα ήδη υπάρχον MPEG-2 TS, σύμφωνα με το Πολυ-πρωτόκολλο Ενθυλάκωσης (*Multiprotocol Encapsulation – MPE [301192]*). Η τεχνική της εισαγωγής (*insertion*) των δεδομένων IP, όπως είναι γνωστή, παρουσιάζει δυο ενδιαφέρουσες παραλλαγές. Το δικτυακό στοιχείο IP Gateway, το οποίο είναι υπεύθυνο για την εισαγωγή των δεδομένων μέσα στο TS, μπορεί να τοποθετηθεί πριν τον πολυπλέκτη DVB-T (μετά την έξοδο κάθε τηλεοπτικού TS) ή μετά από αυτόν (βλέπε Σχήμα 2-4). Στην μεν πρώτη περίπτωση υπάρχει η ευελιξία έτσι ώστε ο κάθε παροχέας τηλεοπτικών υπηρεσιών να μπορεί να προσφέρει και διαδικτυακές υπηρεσίες (επειδή ίσως δεν του ανήκει το σύστημα πολυπλεξίας και μετάδοσης), ενώ η δεύτερη προτιμάται στην περίπτωση που ο παροχέας των τηλεοπτικών υπηρεσιών και ο ιδιοκτήτης του δικτύου διανομής ταυτίζονται. Σε κάθε περίπτωση, στο Σχήμα 2-5 απεικονίζεται η ενθυλάκωση των δεδομένων IP μέσα στα MPEG-2 TS πακέτα, σύμφωνα με το [FA04]. Τα πεδία PUSI (*Payload*

Unit Start Indicator) και PID (Packet Identifier), καθορίζουν αν τα δεδομένα που περιέχονται μέσα στο πακέτο του TS είναι δεδομένα IP και τον τελικό παραλήπτη, αντίστοιχα.



Σχήμα 2-5. Ενθυλάκωση IP δεδομένων σε MPEG-2 TS πακέτα.

Σημειώνεται επιπλέον ότι ήδη βρίσκεται στα τελικά στάδια της προτυποποίησης μια πιο «ελαφριά έκδοση» της τεχνικής MPE, γνωστή και ως ULE (Ultra-Light Encapsulation) [FG04], της οποίας ο βασικός προορισμός είναι η μετάδοση δεδομένων IP, με χαμηλό overhead και η υποστήριξη του πρωτοκόλλου IPv6, από τα δίκτυα DVB.

Εν συνεχεία, ο ρόλος του πολυπλέκτη DVB-T είναι η «μίξη» των μεταδιδόμενων τηλεοπτικών προγραμμάτων, αλλά και τυχόν MPEG-2 TS, αποκλειστικά με δεδομένα IP, σε ένα μοναδικό MPEG-2 TS, κατάλληλο προς μετάδοση. Ο πολυπλέκτης πρέπει να εξασφαλίσει την βέλτιστη αξιοποίηση της διαθέσιμης χωρητικότητας σε σχέση με τις απαιτήσεις των υπό μετάδοση τηλεοπτικών προγραμμάτων, πάντα σε πραγματικό χρόνο και με τους χρήστες να απολαμβάνουν συνεχώς το υψηλότερο δυνατόν επίπεδο υπηρεσιών. Ο πολυπλέκτης συνήθως λειτουργεί είτε εφαρμόζοντας στατική πολυπλεξία (*static multiplexing*), είτε στατιστική πολυπλεξία (*statistical multiplexing*) [PA95] των δεδομένων. Η βέλτιστη λειτουργία του πολυπλέκτη επηρεάζει άμεσα την διαθέσιμη χωρητικότητα για υπηρεσίες IP, στην περίπτωση που συνυπάρχουν με τηλεοπτικά προγράμματα. Επιπλέον, σημειώνεται ότι ο συνδυασμός της κίνησης όλων των χρηστών σε ένα και μόνο κανάλι, μέσω της στατιστικής πολυπλεξίας, προσδίδει στο σύστημα αυξημένες δυνατότητες διαχείρισης και εικμετάλλευσης της προσφερόμενης χωρητικότητας, σε σχέση με τις στιγμιαίες απαιτήσεις των χρηστών υπηρεσιών δεδομένων. Έπειτα, το παραγόμενο από το πολυπλέκτη TS, τροφοδοτεί την είσοδο του Προσαρμογέα Δικτύου SFN (*SFN Network Adapter*), απαραίτητο στοιχείο στην περίπτωση που το σήμα μεταδίδεται με την χρήση περισσότερων του ενός πομπού. Ο SFN Network Adapter εισάγει μέσα στο MPEG-2 TS, τους σημαδευτές χρονισμού (*time markers*) αλλά και πληροφορίες σε σχέση με τον κάθε πομπό μέσω των πακέτων MIP (Mega Frame Packets), όπως παραμέτρους λειτουργίας του φυσικού στρώματος, χρονικές και συχνοτικές αποκλίσεις (*offsets*) κ.τ.λ. Συνήθως στα δίκτυα DVB-T, ο συγχρονισμός των διαφόρων μερών πραγματοποιείται με την χρήση του Παγκόσμιου Δορυφορικού Συστήματος Εντοπισμού Θέσης (*Global Positioning Satellite system – GPS*). Έπειτα, το Πρωτεύων Δίκτυο Διανομής (*Primary Distribution Network*), αναλαμβάνει την διάδοση του TS, όπως αυτό έχει παραχθεί από τον SFN Network Adapter, στους πομπούς που

σχηματίζουν το SFN. Το υπό μετάδοση TS μπορεί να είναι είτε σε μορφή MPEG-2, είτε να έχει υποστεί αναλογική διαμόρφωση σύμφωνα με το πρότυπο του DVB-T (δηλαδή Κωδικοποιημένη Ορθογωνική Πολυπλεξία Διαιρέσης Συχνότητας – *Coded OFDM*) με την βοήθεια ενός διαμορφωτή (*DVB-T modulator*), τοποθετημένου αμέσως μετά τον SFN Network Adapter. Στην περίπτωση που το Πρωτεύων Δίκτυο Διανομής μεταδίδει το TS σε μορφή MPEG-2, η τελική διαμόρφωση του πραγματοποιείται από πολλαπλούς, ξεχωριστούς DVB-T modulators, τοποθετημένους στον χώρο των πομπών. Μια τέτοια διάταξη εικονίζεται και στο Σχήμα 2-4. Η διάταξη αυτή είναι γνωστή και ως *αποκεντρωμένη παραγωγή του σήματος DVB-T (decentralized DVB-T signal generation)*. Στην δεύτερη περίπτωση ή γνωστή ως *κεντροποιημένη παραγωγή σήματος*, το TS φτάνει ήδη διαμορφωμένο σύμφωνα με το πρότυπο DVB-T. Ο Πίνακας 2-2 παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου διάδοσης του σήματος, μέσω του Πρωτεύοντος Δικτύου Διανομής, καθώς και κάποιες ενδεικτικές τεχνολογίες υλοποίησης του τελευταίου.

| Παραγωγή DVB-T σήματος | Τεχνολογίες Primary Distribution Network | Πλεονεκτήματα | Μειονεκτήματα |
|--|---|--|--|
| Αποκεντρωμένη (<i>Decentralized</i>) | Επίγεια Σταθερά Δίκτυα (π.χ. Δίκτυα Οπτικών Ινών ή Επίγειες Ασύρματες Ζεύξεις) ή Δορυφορικά Δίκτυα (π.χ. DVB-Satellite) | - Αυξημένη ποιότητα σήματος (signal quality), αφού η μετάδοση μέσω του δικτύου διανομής παρουσιάζει ελάχιστες απώλειες. - Ευελιξία στην παροχή τοπικού περιεχομένου υπηρεσιών, λόγω της δυνατότητας re-multiplexing πριν την διαμόρφωση στον πομπό (ισχύει μόνο για MFN δίκτυα και όχι SFN) | - Αυξημένο κόστος λόγω χρήσης ενός DVB-T modulator ανά πομπό. - Εμφάνιση προβλημάτων συγχρονισμού και jitter λόγω του Δικτύου Διανομής αλλά και των πολλαπλών διαδικασιών διαμόρφωσης και multiplexing (στην περίπτωση MFN δικτύων και παροχής τοπικών υπηρεσιών) |
| Κεντροποιημένη (<i>Centralized</i>) | Επίγειες ή Δορυφορικές Ζεύξεις | - Σημαντικά μικρότερος αριθμός DVB-T modulator που απαιτούνται (Ίσως και ένας για όλο το δίκτυο). - Τα προβλήματα συγχρονισμού οφείλονται μόνο στο Δίκτυο Διανομής και όχι στην διαδικασία διαμόρφωσης ή πιθανών re-multiplexing (στην περίπτωση MFN δικτύων και παροχής τοπικών υπηρεσιών) | - Αυξημένες απώλειες στην ποιότητα σήματος (signal quality) λόγω του δικτύου διανομής, άρα και μειωμένη τελική κάλυψη. |

Πίνακας 2-2. Τεχνικές Παραγωγής DVB-T σήματος.

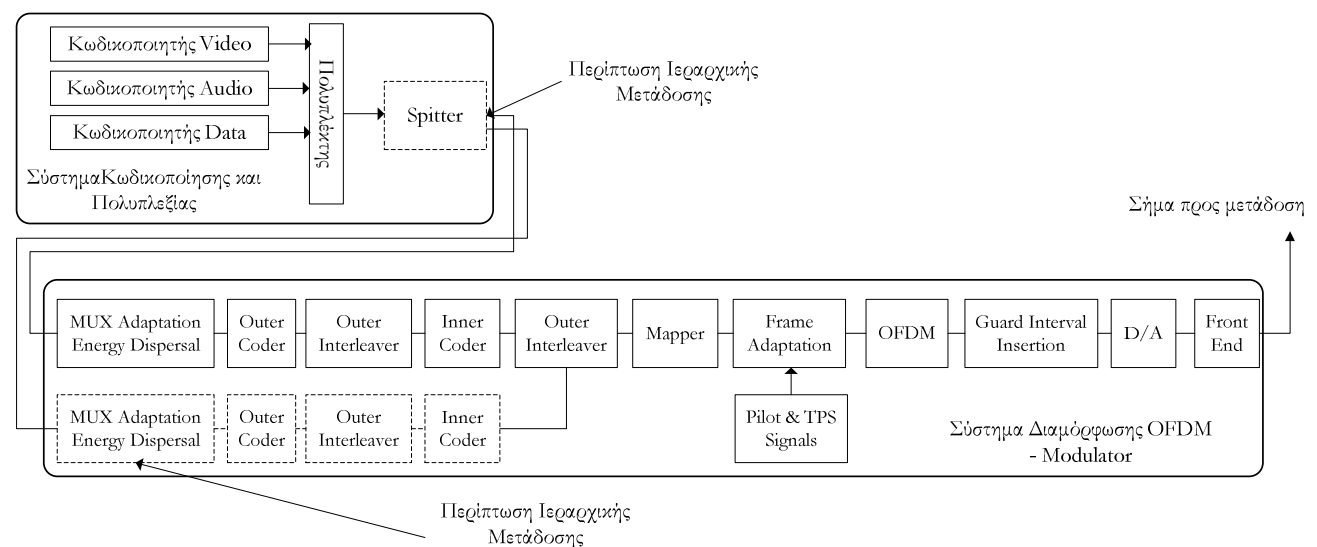
Τέλος, το διαμορφωμένο αναλογικό σήμα DVB-T μεταδίδεται προς τους τελικούς χρήστες του δικτύου, από το Δευτερεύων Δίκτυο Διανομής (*Secondary Distribution Network*), το οποίο αποτελείται από τους πομπούς μετάδοσης και τους gap-fillers.

2.4.2 Φυσικό στρώμα

Τα δίκτυα DVB-T χρησιμοποιούν την διαμόρφωση COFDM, για την μετάδοση των δεδομένων τους. Οι λειτουργίες του διαμορφωτή DVB-T, οι οποίες εφαρμόζονται στο TS και απεικονίζονται στο Σχήμα 2-6 είναι οι εξής :

- Προσαρμογή MPEG-2 πακέτων και τυχαιοποίηση (randomization).
- Εξωτερική κωδικοποίηση (προστασία έναντι των λαθών με κώδικα Reed-Solomon).
- Εξωτερική συνελικτική διεμπλοκή (convolution interleaving).
- Εσωτερική κωδικοποίηση με διάτρητο συνελικτικό κώδικα (punctured convolution code),
- Εσωτερική διεμπλοκή (inner interleaving) στον χρόνο και την συχνότητα.
- Αντιστοίχιση και διαμόρφωση των φερόντων.
- Πολυπλεξία κατά OFDM με αντίστροφο ταχύ μετασχηματισμό Fourier (IFFT) και διαμόρφωση του φέροντος IF.
- Άνω μετατροπή (up-conversion) στην τελική RF συχνότητα.

(για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τον ρόλο του καθενός από τα στάδια επεξεργασίας βλέπε στο [EN300-744]).



Σχήμα 2-6. Στάδια παραγωγής σήματος DVB-T.

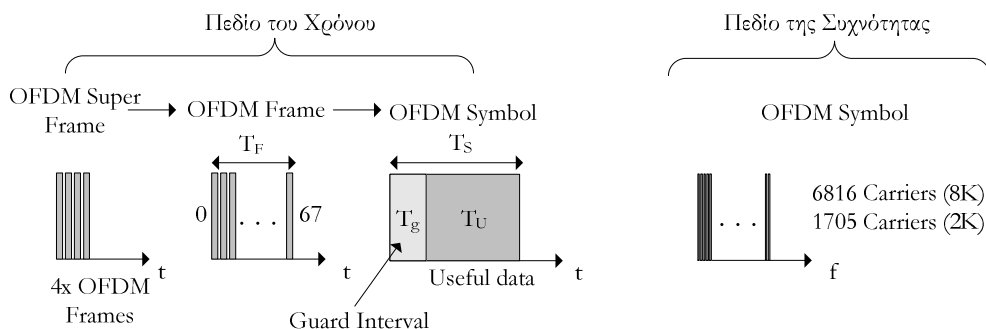
Το σύστημα DVB-T επιτρέπει διάφορα είδη διαμόρφωσης των δεδομένων (π.χ. Τετραφασική Διαμόρφωση Φάσης – *Quaternary Shift Keying* – *QPSK*, Εγκάρσια Διαμόρφωση Εύρους – *Quadrature Amplitude Modulation* - *QAM 16* σημείων και Εγκάρσια Διαμόρφωση Εύρους – *Quadrature Amplitude Modulation* - *QAM 64* σημείων) καθώς και ένα σχετικά μεγάλο εύρος σε σχέση με τους επιτρεπόμενους ρυθμούς κωδικών συνέλιξης (κατά την διάρκεια του Inner Coding σταδίου - 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8). Μέσω των δυο αυτών παραμέτρων επιτυγχάνεται ένα trade-off μεταξύ του

ρυθμού μετάδοσης (bit rate) και της ανθεκτικότητας στο θόρυβο και τις παρεμβολές. Πριν περάσουμε σε περισσότερες λεπτομέρειες σε σχέση με τον ρυθμό μετάδοσης και την οργάνωση των πλαισίων OFDM αναφέρουμε την δυνατότητα για ιεραρχική κωδικοποίηση και διαμόρφωση του εισερχόμενου TS (*Hierarchical channel coding and modulation*). Το σύστημα DVB-T προδιαγράφει ως και δύο επίπεδα ιεραρχικής κωδικοποίησης και διαμόρφωσης του καναλιού (βλέπε Σχήμα 2-6, όπου απεικονίζεται η παράλληλη επεξεργασία του δεύτερου επιπέδου με διακεκομμένες γραμμές).

Στα δίκτυα DVB-T το εύρος ζώνης ενός καναλιού μπορεί να είναι 8MHz, 7MHz και 6MHz. Επίσης ορίζονται δυο βασικοί τρόποι λειτουργίας: το “2K mode” και το “8K mode”. Ο πρώτος είναι κατάλληλος για τις περιπτώσεις όπου το δίκτυο αποτελείται από ένα μοναδικό πομπό ή για δίκτυα SFN περιορισμένης έκτασης και εμβέλειας. Το “8K mode” καλύπτει όλες τις περιπτώσεις του “2K mode”, αλλά επιπλέον συνιστάται και για τις περιπτώσεις δικτύων SFN που καλύπτουν περιοχές μεγάλης έκτασης.

Το μεταδιδόμενο σήμα οργανώνεται σε πλαίσια OFDM. Κάθε πλαίσιο έχει διάρκεια ίση με T_F και αποτελείται από 68 σύμβολα OFDM (με αριθμηση που ξεκινά από το 0 και καταλήγει στο 67). Κάθε τέσσερα πλαίσια δημιουργούν ένα super-πλαίσιο. Κάθε σύμβολο OFDM αποτελείται από 6817 (με αριθμηση που ξεκινά από το $K_{min}=0$ και καταλήγει στο $K_{max}=6816$) φέρουσες (*carriers*) στην περίπτωση του “8K mode” και 1705 (με αριθμηση που ξεκινά από το $K_{min}=0$ και καταλήγει στο $K_{max}=1704$) στην περίπτωση του “2K mode”. Ο χρόνος μετάδοσης κάθε συμβόλου είναι ίσος με T_S . Αυτός ο χρόνος χωρίζεται στο λεγόμενο χρήσιμο μέρος (*useful part*), όπου περιέχονται τα δεδομένα προς μετάδοση, με διάρκεια ίση με T_U και το χρονικό όριο ασφαλείας (*guard interval*), με διάρκεια ίση με T_g . Για μεγάλες τιμές του T_g , επιτυγχάνουμε μεγαλύτερη ανοχή στις παρεμβολές, τον θόρυβο και στο φαινόμενο πολλαπλών διαδρομών (*multipath interference*). Ειδικά σε δίκτυα SFN, όπου ο χρήστης λαμβάνει πολλαπλά αντίτυπα του ίδιου σήματος, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, ο χρόνος T_g καθορίζει το όριο πέραν του οποίου, τα σήματα που καταφθάνουν, ελαμβάνονται ως παρεμβολή. Επιπλέον όμως, μεγάλες τιμές του T_g οδηγούν σε μικρότερο μέγιστο ρυθμό μετάδοσης, αφού αντίστοιχα ο χρόνος (T_U) μετάδοσης των χρήσιμων δεδομένων μειώνεται.

Κάθε σύμβολο OFDM περιέχει δεδομένα ή χρήσιμες πληροφορίες που ρυθμίζουν τις λεπτομέρειες της μετάδοσης και υποδιαιρείται σε ξεχωριστές, με πολλαπλούς τρόπους, διαμορφωμένες φέρουσες. Το χρονικό διάστημα μεταξύ δυο γειτονικών φερουσών είναι ίσο με $1/T_U$, ενώ μεταξύ της αρχικής (K_{min}) φέρουσας και της τελικής (K_{max}), ανεξάρτητα από το είδος μετάδοσης, είναι ίσο με $(K_{max} - 1) * T_U$. Στο Σχήμα 2-7 απεικονίζεται η οργάνωση των πλαισίων OFDM τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και της συχνότητας.



Σχήμα 2-7. Οργάνωση OFDM πλαισίων στο πεδίο του Χρόνου και της Συχνότητας.

Ο Πίνακας 2-3 που ακολουθεί, παραθέτει τις τιμές των διαφόρων παραμέτρων μετάδοσης OFDM για κάθε δυνατή περίπτωση, για εύρος καναλιού ίσο με 8MHz και για τους δύο τρόπους λειτουργίας (8K και 2K modes).

| Παράμετρος | "8K mode" | | | | "2K mode" | | | |
|---|--------------------------------------|------|------|------|--------------------------------------|-----|------|------|
| Αριθμός φερουσών | 6817 ($K_{\min}=0, K_{\max}=6816$) | | | | 1705 ($K_{\min}=0, K_{\max}=1704$) | | | |
| Διάρκεια T_U | 896 μ secs | | | | 224 μ secs | | | |
| Απόσταση μεταξύ φερουσών | 1116 Hz | | | | 4464 Hz | | | |
| Απόσταση μεταξύ K_{\min} και K_{\max} | 7,61 MHz | | | | 7,61 MHz | | | |
| Guard Interval Time ($T_g = \Lambda * T_U$) | 1/4 | 1/8 | 1/16 | 1/32 | 1/4 | 1/8 | 1/16 | 1/32 |
| Διάρκεια Guard Interval ($T_g - \mu$ s) | 224 | 112 | 56 | 28 | 56 | 28 | 14 | 7 |
| Διάρκεια OFDM συμβόλου (μ s) | 1120 | 1009 | 952 | 924 | 280 | 252 | 238 | 237 |

Πίνακας 2-3. Παράμετροι OFDM μετάδοσης.

Επιπλέον, ο Πίνακας 2-4 περιέχει αποτελέσματα προσομοίωσης (*simulation*) [EN300-744], στα οποία υπολογίζεται ο απαιτούμενος σηματοθορυβικός λόγος, για την επίτευξη του ρυθμού μετάδοσης, που αναγράφεται στον ίδιο πίνακα. Η προσομοίωση έχει πραγματοποιηθεί για διάφορους τύπους καναλιών (Gaussian, Ricean και Rayleigh), διαμόρφωσης (QPSK, 16-QAM και 64-QAM), ρυθμούς κωδικοποίησης (1/2, 2/3, 3/4, 5/6 και 7/8) και τιμές του T_g ($1/4T_u$, $1/8T_u$, $1/16T_u$ και $1/32T_u$) και αναφέρεται σε bit error rate της τάξης $O(10^{-4})$.

| Mode | Διαμόρφωση | Code rate | Gaussian Κανάλι | Ricean Κανάλι | Rayleigh Κανάλι | Ρυθμός Μετάδοσης | | | |
|------|------------|-----------|-----------------|---------------|-----------------|------------------|-----------|------------|------------|
| | | | | | | 1/4 T_U | 1/8 T_U | 1/16 T_U | 1/32 T_U |
| 1 | QPSK | 1/2 | 3,1 | 3,6 | 5,4 | 4,98 | 5,53 | 5,85 | 6,03 |
| 2 | QPSK | 2/3 | 4,9 | 5,7 | 8,4 | 6,64 | 7,37 | 7,81 | 8,04 |
| 3 | QPSK | 3/4 | 5,9 | 6,8 | 10,7 | 7,46 | 8,29 | 8,78 | 9,05 |
| 4 | QPSK | 5/6 | 6,9 | 8,0 | 13,1 | 8,29 | 9,22 | 9,76 | 10,05 |
| 5 | QPSK | 7/8 | 7,7 | 8,7 | 16,3 | 8,71 | 9,68 | 10,25 | 10,56 |
| 6 | 16-QAM | 1/2 | 8,8 | 9,6 | 11,2 | 9,95 | 11,06 | 11,71 | 12,06 |
| 7 | 16-QAM | 2/3 | 11,1 | 11,6 | 14,2 | 13,27 | 14,75 | 15,61 | 16,09 |
| 8 | 16-QAM | 3/4 | 12,5 | 13,0 | 16,7 | 14,93 | 16,59 | 17,56 | 18,10 |
| 9 | 16-QAM | 5/6 | 13,5 | 14,4 | 19,3 | 16,59 | 18,43 | 19,52 | 20,11 |
| 10 | 16-QAM | 7/8 | 13,9 | 15,0 | 22,8 | 17,42 | 19,35 | 20,49 | 21,11 |
| 11 | 64-QAM | 1/2 | 14,4 | 14,7 | 16,0 | 14,93 | 16,59 | 17,56 | 18,10 |
| 12 | 64-QAM | 2/3 | 16,5 | 17,1 | 19,3 | 19,91 | 22,12 | 23,42 | 24,13 |

| | | | | | | | | | |
|----|--------|-----|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 13 | 64-QAM | 3/4 | 18,0 | 18,6 | 21,7 | 22,39 | 24,88 | 26,35 | 27,14 |
| 14 | 64-QAM | 5/6 | 19,3 | 20,0 | 25,3 | 24,88 | 27,65 | 29,27 | 30,16 |
| 15 | 64-QAM | 7/8 | 20,1 | 21,0 | 27,9 | 26,13 | 29,03 | 30,74 | 31,67 |

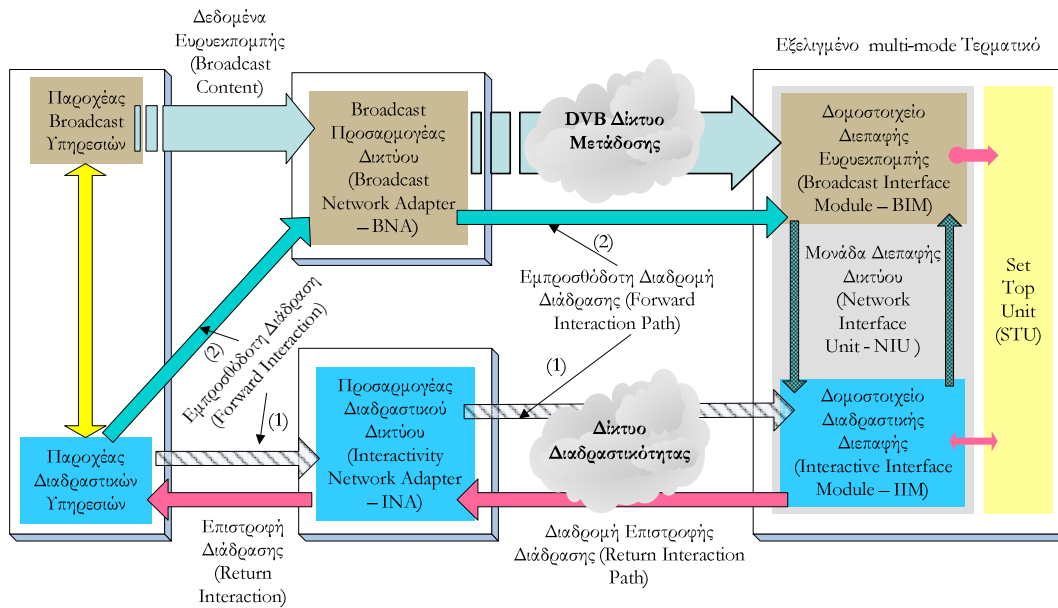
Πίνακας 2-4. Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων σε δίκτυα DVB-T για διαφορετικές παραμέτρους λειτουργίας.

2.4.3 Παροχή Διαδραστικών Υπηρεσιών σε DVB-T δίκτυα.

Τα δίκτυα Ψηφιακής Βιντεοεκπομπής (DVB), λόγω της εφαρμογής τους, κατά κύριο λόγο στην παροχή υπηρεσιών ψηφιακής τηλεόρασης, σχεδιάστηκαν ως Μονοκατευθυντικά Δίκτυα Κατερχόμενης Ζεύξης (*Downlink Unidirectional Networks*). Η απαίτηση όμως για παροχή Διαδραστικών Υπηρεσιών (*Interactive Services*), όπως η Ψηφιακή Βιντεογραφία (*Digital Video Interactive*), αλλά και απλές ή πολυμεσικές υπηρεσίες IP, οδήγησαν γρήγορα στην δημιουργία προτύπων και αρχιτεκτονικών, με στόχο την αναβάθμιση τους σε αμφίδρομα (*bidirectional*) δίκτυα. Αρχικά, ως κανάλι επιστροφής ή διαδρομή διαδραστικής επιστροφής (*return channel ή interactive return path*) χρησιμοποιήθηκαν εναλλακτικά ενσύρματα και ασύρματα δίκτυα (π.χ. το Δημόσιο Τηλεφωνικό Δίκτυο Μεταγωγής - Public Switched Telephone Network, PSTN, το Ψηφιακό Δίκτυο Ενοποιημένων Υπηρεσιών - Integrated Services Digital Network, ISDN, το GSM/GPRS κυψελωτό δίκτυο κτλ.). Σήμερα η ομάδα προτυποποίησης του DVB έχει παραδώσει μια σειρά από πρότυπα, τα οποία περιγράφουν ολοκληρωμένα διαδραστικά δίκτυα DVB, δηλαδή παραθέτουν όλες τις απαραίτητες λεπτομέρειες, σχετικά με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται ως κανάλι επιστροφής και την μεθοδολογία υλοποίησης τους. Ενδεικτικά αναφέρονται τα DVB-RCC, DVB-RCL και DVB-RCT και τα αντίστοιχα πρότυπα [ETS300-801], [EN301-195], [EN301-958] και [EN301-199] (για περισσότερες λεπτομέρειες βλέπε στο <http://www.dvb.org>).

Η αξιοποίηση του συστήματος DVB-T στην παροχή υπηρεσιών IP, από χρήστες εξοπλισμένους με κινητά τερματικά, προϋποθέτει ότι το κανάλι διάδρασης θα υλοποιείται μέσω κάποιας εναλλακτικής ασύρματης τεχνολογίας.

Η βασική αρχιτεκτονική ενός διαδραστικού δικτύου DVB-T με την χρήση πολυτροπικών τερματικών (*multi-mode terminals*) φαίνεται στο Σχήμα 2-8 που ακολουθεί.



Σχήμα 2-8. Γενική αρχιτεκτονική για επίγεια διαδραστικά συστήματα Βιντεοεκπομπής (Interactive DVB-T networks).

Σε ένα τέτοιο σύστημα είναι απαραίτητη η ύπαρξη δύο καναλιών επικοινωνίας ανάμεσα στο τεματικό και τον Service Provider (SP). Πιο συγκεκριμένα, ορίζονται:

- **Το κανάλι Ευρυεκπομπής (Broadcast Channel) :** πρόκειται για το μονοκατευθυντικό, ευρύτερο κανάλι ευρυεκπομπής, το οποίο μεταφέρει video, ήχο και δεδομένα IP από τους SPs προς τους χρήστες.
- **Το κανάλι Διάδρασης (Interaction Channel) :** πρόκειται για το αμφίδρομο κανάλι επικοινωνίας, το οποίο μεταφέρει τις απαραίτητες πληροφορίες για την υλοποίηση των διαδραστικών υπηρεσιών. Το κανάλι διάδρασης σχηματίζεται από την:
 - **Διαδρομή Επιστροφής Διάδρασης (Return Interaction Path - RIP):** πρόκειται για την κατεύθυνση του διαδραστικού καναλιού, από τον χρήστη προς τους SPs, το οποίο χρησιμοποιείται για την αποστολή των αιτημάτων για έναρξη νέων υπηρεσιών, πληροφοριών διαχείρισης ή ακόμα και δεδομένων.
 - **Εμπροσθόδοτη Διαδρομή Διάδρασης (Forward Interaction Path - FIP):** πρόκειται για την κατεύθυνση του διαδραστικού καναλιού, από τον SP προς τον χρήστη, το οποίο ενδέχεται να αποστέλλει μηνύματα διαχείρισης ή ακόμα και δεδομένα, που αφορούν τις ενεργές υπηρεσίες (βλέπε Σχήμα 2-8, διαδρομή 1).

Στα πλαίσια των επίγειων διαδραστικών δικτύων ευρυεκπομπής (DVB-T) το FIP ενσωματώνεται μέσα στο Broadcast Channel (βλέπε Σχήμα 2-8, διαδρομή 2 για το FIP). Επομένως, η υλοποίηση διαδραστικών υπηρεσιών σε δίκτυα DVB-T πραγματοποιείται με την χρήση δυο μονοκατευθυντικών καναλιών, ένα για την κατερχόμενη (*downlink*) και ένα για την ανερχόμενη ζεύξη (*uplink*). Το *downlink* κανάλι το οποίο μεταφέρει τα δεδομένα της ευρυεκπομπής (*broadcast data*) αλλά και τις

πληροφορίες του FIP, βασίζεται στο τρόπο μετάδοσης που ορίζει το πρότυπο DVB-T και παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους. Αντίθετα, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, για το uplink κανάλι υπάρχουν αρκετές επιλογές, είτε ανάμεσα από άλλα ανεξάρτητα ενσύρματα ή ασύρματα δίκτυα. Επιπλέον, όπως και στο Σχήμα 2-8 απεικονίζεται, η Μονάδα Διεπαφών Δικτύου (*Network Interface Unit – NIU*) του εξελιγμένου, multi-mode τερματικό θα πρέπει να είναι εξοπλισμένη με το κατάλληλο hardware και software, τόσο για την λήψη των δεδομένων από το δίκτυο DVB-T (βλέπε *Δομοστοιχείο Διεπαφής Ευρυεκπομπής, Broadcast Interface Module – BIM*) αλλά και για την πρόσβαση στο δίκτυο διάδρασης (*Δομοστοιχείο Διαδραστικής Διεπαφής, Interactive Interface Module – IIM*).

Στο Κεφάλαιο 3, στα πλαίσια παρουσίασης του πειραματικού Δικτύου 4^{ης} Γενιάς, εκτός των άλλων, περιγράφονται δυο εναλλακτικές λύσεις για την λειτουργία διαδραστικών δικτύων DVB-T. Η πρώτη υλοποιείται με την χρήση του δικτύου GPRS στον ρόλο του RIP, ενώ η δεύτερη υλοποιείται με την χρήση του δικτύου IEEE WLAN 802.11b.

Είναι προφανές, από την ως τώρα μελέτη, ότι η λήψη δεδομένων IP μέσω των συστημάτων DVB-T, σε συνδυασμό πάντα με ένα ασύρματο κανάλι επιστροφής, χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις, είναι σε θέση να αναβαθμίσει σημαντικά το παρεχόμενο επίπεδο ποιότητας, σε κινητούς χρήστες, όπως θα φανεί και στο Κεφάλαιο 3, όπου περιγράφονται πλήρως τα απαραίτητα βήματα για την ενσωμάτωση των συστημάτων DVB-T, σε ένα δίκτυο 4^{ης} Γενιάς.

2.4.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS) σε ένα Τερματικό DVB-T

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το επίπεδο ποιότητας των διαδραστικών υπηρεσιών IP που απολαμβάνει ένα κινητό τερματικό κατά την διάρκεια παράδοσης τους μέσω ενός δικτύου DVB-T είναι οι εξής:

- **Παράμετροι λειτουργίας δικτύου:** Ο τελικός ρυθμός μεταφοράς δεδομένων σχετίζεται άμεσα με τις παραμέτρους λειτουργίας του δικτύου DVB-T, όπως προκύπτει και από τον Πίνακα 2-4. Το επίπεδο ποιότητας των υπηρεσιών των χρηστών, μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά μέσω επαναπροσδιορισμού των παραμέτρων λειτουργίας του. Αναλυτική μελέτη για τα επαναρυθμιζόμενα δίκτυα IP-enabled DVB-T πραγματοποιείται στα Κεφάλαιο 5
- **Επίπεδο κυκλοφοριακής κίνησης:** Στην περίπτωση που στο δίκτυο DVB-T συνυπάρχουν υπηρεσίες ψηφιακής τηλεόρασης και διαδραστικές υπηρεσίες IP, απαιτείται η εφαρμογή έξυπνων σχημάτων διαχείρισης της συνολικής προσφερόμενης χωρητικότητας [GA+03]. Πιο συγκεκριμένα, οι απαιτήσεις σε χωρητικότητα των τηλεοπτικών προγραμμάτων (R_{TV}) μεταβάλλεται δυναμικά με τον χρόνο, σε σχέση με το υπό μετάδοση περιεχόμενο. Η χωρητικότητα που αποδίδεται στους χρήστες διαδραστικών υπηρεσιών (R_{Data}) θα πρέπει και αυτή να υπολογίζεται δυναμικά, σύμφωνα με τον τύπο $R_{Data} = R_{Total} - R_{TV}$, όπου

R_{Total} η συνολική χωρητικότητα του δικτύου DVB-T (ανά συχνότητα). Τέλος, οι πολιτικές διαχείρισης (π.χ. δημιουργία ξεχωριστών κλάσεων ποιότητας για τους χρήστες διαδραστικών υπηρεσιών) της χωρητικότητας R_{Data} , επηρεάζουν με τη σειρά τους το επίπεδο ποιότητας που απολαμβάνει ένα τερματικό.

- **Τεχνολογία υλοποίησης του καναλιού επιστροφής:** Οι δυνατότητες του δικτύου, που χρησιμοποιείται στην υλοποίηση του καναλιού επιστροφής, επενεργούν σημαντικά στο προσφερόμενο επίπεδο QoS. Για τις υπηρεσίες με μικρό βαθμό ασυμμετρίας μεταξύ των δεδομένων που διακινούνται από το downlink και uplink (π.χ. Videoconference) μονοπάτι, αλλά και για τις υπηρεσίες όπου η μετάδοση τους στηρίζεται σε πρωτόκολλα με επιβεβαίωση λήψης (π.χ. υπηρεσία μεταφοράς αρχείων, web browsing κ.α.), η επίδραση είναι σημαντική. Στο [XI+02] παρουσιάζονται μετρήσεις σε σχέση με την απόδοση των δικτύων IP-enabled DVB-T, για υπηρεσίες TCP, για τρία διαφορετικά δίκτυα διάδρασης (GSM, PSTN και WLAN). Τέλος σημειώνεται ότι οι υπηρεσίες που παρουσιάζουν μεγάλη ασυμμετρία μεταξύ του όγκου δεδομένων που αποστέλλονται από και προς τον τελικό χρήστη και δεν απαιτούν επιβεβαίωση λήψης (π.χ. Video Streaming), επηρεάζονται λιγότερο από τις δυνατότητες του δικτύου υλοποίησης του καναλιού επιστροφής.
- **Ποιότητα της ασύρματης ζεύξης του τερματικού με το DVB-T αλλά και με το Δίκτυο Διαδραστικότητας:** Όπως και στις δύο προηγούμενες τεχνολογίες που παρουσιάστηκαν, ο ρυθμός λανθασμένων ή αποτυχημένων πλαισίων DVB-T, κατά την διάρκεια μετάδοσης προς ένα τερματικό, σχετίζεται άμεσα με την ποιότητα της ασύρματης ζεύξης. Επιπλέον και σύμφωνα με τον προηγούμενο παράγοντα, σπουδαίο ρόλο παίζει και η ποιότητα του σήματος του δικτύου διαδραστικότητας στον χώρο του τερματικού.

Είναι φανερό ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα των διαδραστικών υπηρεσιών ενός κινητού τερματικού, μέσω ενός δικτύου IP-enabled DVB-T είναι αρκετοί και με μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας.

2.5 Παρόμοιες ερευνητικές δραστηριότητες και οφέλη από την ενσωμάτωση των συστημάτων DVB-T, στα πλαίσια των Δικτύων 4^{ης} Γενιάς.

Βασικός σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτελεί η πιστοποίηση της ικανότητας των συστημάτων DVB-T, στην προσφορά υπηρεσιών IP, μέσω της ενσωμάτωσης τους σε Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς. Στα κεφάλαια που ακολουθεί θα παρουσιαστούν τα απαραίτητα βήματα τα οποία θα επιτρέψουν την ενσωμάτωση ενός συστήματος DVB-T μέσα σε ένα πρωτότυπο περιβάλλον ασύρματων ετερογενών δικτύων και την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του.

Η μελέτη που πραγματοποιείται, στηρίζεται σε αποτελέσματα και παρόμοιες προσπάθειες άλλων συναφών ερευνητικών δραστηριοτήτων και ερευνητικών προγραμμάτων. Με τμήματα του θέματος

της αξιοποίησης των συστημάτων DVB-T, στη παροχή υπηρεσιών IP έχουν κατά καιρούς απασχοληθεί κυρίως μεμονωμένα ερευνητικά προγράμματα. Πιο συγκεκριμένα το ερευνητικό πρόγραμμα MCP (IST-1999-13046) ασχολήθηκε με την δημιουργία νέων μορφών επικοινωνίας, καθοδήγησης και ψυχαγωγίας σε επιβάτες οχημάτων, μέσω της χρήση του DVB-T, ως του βασικού δικτύου για την αποστολή των δεδομένων. Το πρόγραμμα DRiVE (Dynamic Radio for IP-Services in Vehicular Environments [DRIVE], IST-1999-12515) επικεντρώθηκε στην βελτιστοποίηση της διασυνεργασίας μεταξύ διαφορετικών ασύρματων δικτύων (GSM/GPRS/UMTS/DAB/DVB-T) με έμφαση στην δυναμική διαχείριση κοινού φάσματος λειτουργίας. Σημαντική υπήρξε η συμβολή του προγράμματος MAMBO (IST-2000-26298) στην δυναμική διαχείριση και βελτιστοποίηση της προσφερόμενης χωρητικότητας ανά ξεχωριστό MPEG-2 TS στην περίπτωση της ταυτόχρονης παροχής υπηρεσιών ήχου, εικόνας και δεδομένων σε δίκτυα DVB-T [GA+03]. Εν συνεχεία, το πρόγραμμα CISMUNDUS (Convergence of IP-based Services for Mobile Users Networks in DVB-T and UMTS Systems) ασχολήθηκε κυρίως με την διερεύνηση των ωφελειών που θα προκύψουν από την σύγκλιση των mobile και broadcast δικτύων μέσα από την εισαγωγή νέων υπηρεσιών και αληθινών application oriented σεναρίων. Σημειώνεται ότι σε όλα τα σενάκια ως βασικό σύστημα broadcast θεωρήθηκε το DVB-T. Σημαντική συμβολή στην προσπάθεια για την αξιοποίηση των συστημάτων DVB-T διαδραμάτισαν επίσης, τα ερευνητικά προγράμματα MONASIDRE (Management Of Networks And Services In A Diversified Radio Environment, IST-2000-26144) και η συνέχεια του, το CREDO (Composite Radio and Enhanced service Delivery for the Olympics, IST-2001-33093). Στο μεν πρώτο υλοποιήθηκε μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα διαχείρισης συνεργαζόμενων ασύρματων τεχνολογιών στα πλαίσια των Δικτύων 4ης Γενιάς, η οποία στα πλαίσια του CREDO, προσαρμόστηκε στις ανάγκες των συστημάτων DVB-T, καθιστώντας εφικτή την επιτυχή ενσωμάτωσή τους. Τα αναγκαία βήματα για την ενσωμάτωση των συστημάτων DVB-T αλλά και των ωφελειών που προκύπτουν, θα αποτελέσουν το κύριο αντικείμενο των δύο κεφαλαίων που ακολουθούν. Επιπλέον, μια σειρά από νέες ερευνητικές προσπάθειες βρίσκονται ήδη σε εξέλιξη. Το πρόγραμμα ATHENA (Digital Switchover: Developing Infrastructures for Broadband Access, FP6-507312) ασχολείται με την χρήση της τεχνολογίας DVB-T για την δικτυακή διασύνδεση κόμβων στα όρια μιας πόλης (δίκτυο κορμού) και εκμετάλλευση του διαθέσιμου φάσματος που θα προκύψει από την μετάβαση στην εποχή της ψηφιακής τηλεόρασης. Το πρόγραμμα INSTINCT (IP-based Networks, Services, and Terminals for Converging Systems) έχει ως βασικό στόχο την ανάπτυξη υβριδικών telecom-broadcaster δικτύων με σκοπό την παροχή υπηρεσιών σε κινούμενους χρήστες, με έμφαση στην αξιοποίηση του νέου πρότυπου DVB-H (πρώην DVB-X) (DVB handheld devices). Τέλος, όπως ήδη αναφέρθηκε το IP-Over DVB IETF WG εργάζεται συστηματικά για την προτυποποίηση μιας πιο «ελαφριάς έκδοσης» της τεχνικής MPE, γνωστή και ως ULE (Ultra-Light Encapsulation) [FG04] για την μείωση του overhead και την υποστήριξη του πρωτοκόλλου IPv6, από τα δίκτυα DVB.

Από την ως τώρα ανάλυση είναι φανερό ότι το ενδιαφέρον για την αξιοποίηση των συστημάτων DVB-T είναι αρκετά μεγάλο. Η παρούσα διδακτορική διατριβή παρουσιάζει συμπληρωματική σχέση με όλες τις πιο πάνω ερευνητικές δραστηριότητες, αφού από την μια παρουσιάζει μια ολοκληρωμένη πρόταση για την πλήρη ενσωμάτωση των συστημάτων DVB-T σε Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς, αλλά ταυτόχρονα θέτει τις βάσεις για το πολύ σημαντικό θέμα της Διαχείρισης των Ασύρματων Πόρων σε τέτοιου είδους συστήματα. Η ανάγκη για δυναμικά σχήματα διαχείρισης των ασύρματων πόρων στα συστήματα DVB-T προκύπτει ως φυσική συνέπεια από την ενσωμάτωση τους σε περιβάλλοντα όπου οι απαιτήσεις των χρηστών αλλά και η συνεργασία μεταξύ των διαφορετικών ασύρματων τεχνολογιών, δημιουργούν γρήγορες και σημαντικές αλλαγές στην περιοχή εξυπηρέτησης. Οι στατικές πολιτικές διαχείρισης των πόρων των συστημάτων DVB-T, όπως εφαρμόζονται για την περίπτωση της παροχής τηλεοπτικών υπηρεσιών, δεν είναι συμβατές με τις μεταβλητές συνθήκες που δημιουργούνται εξαιτίας των κινητών χρηστών, στα πλαίσια πάντα ενός Δικτύου 4^{ης} Γενιάς. Πριν όμως προχωρήσουμε με την αναλυτικότερη παρουσίαση των πιο πάνω θεμάτων, στα κεφάλαια που ακολουθούν, είναι σκόπιμη η συστηματική καταγραφή των σημαντικότερων κινήτρων και πλεονεκτημάτων, τα οποία μας οδήγησαν στην αξιοποίηση των συστημάτων DVB-T στην παροχή υπηρεσιών IP.

2.5.1 Σημαντικότερα κίνητρα και πλεονεκτήματα από την αξιοποίηση των συστημάτων DVB-T

Η παρούσα παράγραφος αφιερώνεται στην συστηματική καταγραφή των κυριοτέρων κινήτρων και πλεονεκτημάτων τα οποία μας οδήγησαν στην διερεύνηση της δυνατότητας εκμετάλλευσης των συστημάτων DVB-T στα πλαίσια των Δικτύων 4^{ης} Γενιάς. Πράγματι το σύστημα DVB-T παρέχει μοναδικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τον τομέα της παροχής υπηρεσιών IP, όταν συνδυαστεί με άλλα ασύρματα δίκτυα, σε ένα περιβάλλον 4^{ης} Γενιάς. Πιο συγκεκριμένα μπορεί να παρέχει :

- Υψηλό ρυθμός μεταφοράς δεδομένων στην κατεύθυνση καθόδου (~ 31 Mbps ανά συχνότητα).
 - Απαραίτητος για όλα τα είδη παραδοσιακών υπηρεσιών (TCP/UDP/IP).
 - Συγκριτικά πολύ μεγαλύτερος από πολλά αμφίδρομα, τηλεπικοινωνιακά δίκτυα στενής ζώνης.
- Ο συνδυασμός της κίνησης όλων των χρηστών σε ένα μόνο διαυλο, προσδίδει στα συστήματα DVB-T όλα τα πλεονεκτήματα της στατιστικής πολυπλεξίας. Επιπλέον επιτρέπει την ανάπτυξη και την εφαρμογή από τον παροχέα, μηχανισμών προτεραιοτήτων και υποστήριξης QoS για την κίνηση IP, σε κάθε έναν από τους χρήστες ξεχωριστά.

- Τα συστήματα DVB-T προσφέρουν μακράν την ταχύτερη σύνδεση για κινούμενη λήψη σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο ραδιοδίκτυο.
- Διευρυμένη ακτίνα ραδιοκάλυψης μέσω της αρχιτεκτονικής SFN (Single Frequency Networks).
- Μικρό κόστος υλοποίησης και ελάχιστος ο απαραίτητος εξοπλισμός από την πλευρά του χρήστη. Τα συστήματα DVB-T, εμφανίζονται ως ιδανικές λύσεις, για την παροχή ευρυζωνικής σύνδεσης σε αραιοκατοικημένες περιοχές αφού μπορούν να υποστηρίξουν κυψέλες με ακτίνα μερικά χιλιόμετρα με μικρό κόστος.
- Ειμετάλλευση της διαθέσιμης εναπομένουσας χωρητικότητας και φάσματος το οποίο προκύπτει με την μετάβαση στην ψηφιακή εποχή των τηλεοπτικών υπηρεσιών.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα πιο πάνω πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η τεχνολογία DVB-T, προκύπτει άμεσα η ανάγκη για διερεύνηση και η πιστοποίηση των δυνατοτήτων για την ενσωμάτωση των συστημάτων DVB-T μέσα σε Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς, όπου θα συνυπάρχουν ως εναλλακτικές λύσεις παροχής συνδεσιμότητας για υπηρεσίες IP, υψηλού επιπέδου.

2.6 Ανακεφαλαίωση

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε μια ανασκόπηση των ερευνητικών δραστηριοτήτων στα πλαίσια των Δικτύων 4^{ης} Γενιάς. Επιπλέον, παρουσιάστηκαν οι δυο πιο βασικοί τύποι αρχιτεκτονικής (loose και tight-coupling), που ακολουθούνται κατά την διάρκεια υλοποίησης τέτοιων συστημάτων. Μέσω της μελέτης των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων που παρουσιάζει η κάθε αρχιτεκτονική, καθορίστηκε και το είδος που εμείς ακολουθήσαμε στην πορεία υλοποίησης του πειραματικού μας Δικτύου 4^{ης} Γενιάς, για την ενσωμάτωση των συστημάτων DVB-T.

Πολύ σπουδαίο ρόλο, διαδραμάτισε το γεγονός ότι ένα από τα δίκτυα (GPRS) που χρησιμοποιήσαμε, ανήκει στον διαχειριστικό τομέα μιας εμπορικής εταιρείας, καθιστώντας αδύνατη την όποια επέμβαση σε επίπεδο δικτυακών στοιχείων. Ο παραπάνω περιορισμός μας ώθησε στην επιλογή του πρώτου μοντέλου της αρχιτεκτονικής Χαλαρής Σύζευξης για την διασύνδεση του δικτύου GPRS με τα υπόλοιπα δύο συστήματα, τα οποία με την σειρά τους επικοινωνούν μέσω του υβριδικού πυρήνα. Εδώ σημειώνεται ότι το τρίτο είδος αρχιτεκτονικής δεν επιλέχτηκε σε κανένα στάδιο του σχεδιασμού, αφού θα απαιτούσε τον επανακαθορισμό των παραμέτρων λειτουργίας του κάθε δικτύου σε επίπεδο υλικού. Η τελευταία λύση είναι σχεδόν βέβαιο ότι θα προκαλούσε την αρνητική στάση των NPs ως προς την αποδοχή της, συμπεριλαμβανομένων και των παρόχων DVB-T. Η ελκυστικότητα που παρουσιάζει η συνδυαστική αρχιτεκτονική που εμείς προτείνουμε έγκειται στο μικρό κόστος υλοποίησης, στις περιορισμένες επεμβάσεις στον ήδη υπάρχοντα εξοπλισμό, στην διατήρηση χαμηλού βαθμού πολυπλοκότητας σε σχέση με τις λειτουργικές απαιτήσεις, αλλά και την δυνατότητα να ενσωματωθούν μελλοντικά και νέες ασύρματες τεχνολογίες.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, πραγματοποιείται μια συνοπτική επισκόπηση των βασικότερων τεχνικών λεπτομερειών των δικτύων που χρησιμοποιήθηκαν για τον πιο πάνω σκοπό. Τονίζεται ότι τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε ασύρματης τεχνολογίας, επέδρασαν και αυτά με την σειρά τους στην τελική μορφή της αρχιτεκτονικής που υιοθετήθηκε, για την δημιουργία της πειραματικής μας πλατφόρμας.

3 Ενσωμάτωση συστημάτων DVB-T σε Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς.

3.1 Εισαγωγή

Αμέσως μετά το κεφάλαιο επισκόπησης και παρουσίασης των τεχνικών λεπτομερειών σε σχέση με τα συστήματα DVB-T και τα Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς, το παρόν κεφάλαιο αφιερώνεται στην εφαρμογή της επιλεγμένης αρχιτεκτονικής για την πραγματοποίηση της ενσωμάτωσης. Η υλοποίηση της αρχιτεκτονικής δημιουργεί μια σειρά από λειτουργικές απαιτήσεις (*operational requirements*), οι οποίες πρέπει να ικανοποιηθούν με αποτελεσματικότητα, ώστε να διασφαλιστεί η επιτυχία του εγχειρήματος. Πιο συγκεκριμένα, κύριος στόχος του κεφαλαίου, είναι η περιγραφή των πιο σημαντικών τεχνικών και λειτουργικών απαιτήσεων (απαραίτητα βήματα), η επισήμανση τυχόν προβλημάτων προς αντιμετώπιση αλλά και παρουσίαση των λύσεων που υιοθετήθηκαν και εφαρμόστηκαν. Με βάση τα προτεινόμενα βήματα που ακολουθήθηκαν και για την ενσωμάτωση των συστημάτων DVB-T δημιουργείται ένα ολοκληρωμένο πρωτότυπο Δίκτυο 4^{ης} Γενιάς, το οποίο δοκιμάζεται μέσω πειραματικών μετρήσεων, των οποίων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

Η διάθροση του παρόντος κεφαλαίου έχει ως εξής: στην παράγραφο 3.2 παρουσιάζεται η λεπτομερής αρχιτεκτονική της πειραματικής πλατφόρμας, μέσω της οποίας αξιολογείται και πιστοποιείται η ικανότητα των συστημάτων DVB-T στο να διαδραματίσουν σημαντικότατο ρόλο στα πλαίσια των Δικτύων 4^{ης} Γενιάς. Η παρουσίαση αφορά τα δικτυακά στοιχεία των ασυρμάτων τεχνολογιών, καθώς και των υποστηρικτικών στοιχείων του δικτύου κορμού (*backbone network*). Στις επιμέρους παραγράφους παρουσιάζονται στοιχεία, σχετικά με τις διεπαφές επικοινωνίας με τα διαφορετικά ασύρματα δίκτυα (σε επίπεδο δικτυακών στοιχείων) αλλά και η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον υπολογισμό της κυκλοφοριακής κατάστασης που επικρατεί σε αυτά. Επιπλέον, στην ίδια παράγραφο καλύπτονται θέματα σχετικά με τις αναγκαίες προσθήκες και αναβαθμίσεις σε επίπεδο υλικού και λογισμικού για την σωστή λειτουργία της πλατφόρμας. Οι λειτουργικές απαιτήσεις που απορρέουν από την ανάπτυξη και υλοποίηση του πειραματικού Δικτύου 4^{ης} Γενιάς (ή του Περιβάλλοντος Ασύρματων Ετερογενών Δικτύων – ΠΑΕΔ) αντιμετωπίστηκαν με την μικρότερη δυνατή επέμβαση στην αυτοδύναμη (*stand-alone*) λειτουργία των επιμέρους ασύρματων δικτύων. Η πλατφόρμα έχει την δυνατότητα να εξυπηρετεί τους «*παραδοσιακούς*» χρήστες των επιμέρους δικτύων αλλά και ταυτόχρονα παρέχει αυξημένο επίπεδο ποιότητας (*QoS*) και ποικιλία υπηρεσιών σε χρήστες εφοδιασμένους με τερματικές συσκευές, ικανές να εκμεταλλευτούν την υποκείμενη υποδομή. Τονίζεται, φυσικά η σημαντική συμβολή των συστημάτων DVB-T, τα οποία μέσα από την προτεινόμενη αρχιτεκτονική ενσωματώνονται πλήρως στο πειραματικό Δίκτυο 4^{ης} Γενιάς. Η σειρά των θεμάτων που προέκυψαν κατά την διάρκεια υλοποίησης της πλατφόρμας (άρα και για τα συστήματα DVB-T) σχετίζονται με την αποτελεσματική δρομολόγηση των δεδομένων, ιδιαίτερα κατά την διάρκεια των διασυστηματικών μεταπομπών (*mobility management*), την διευθυνσιοδότηση

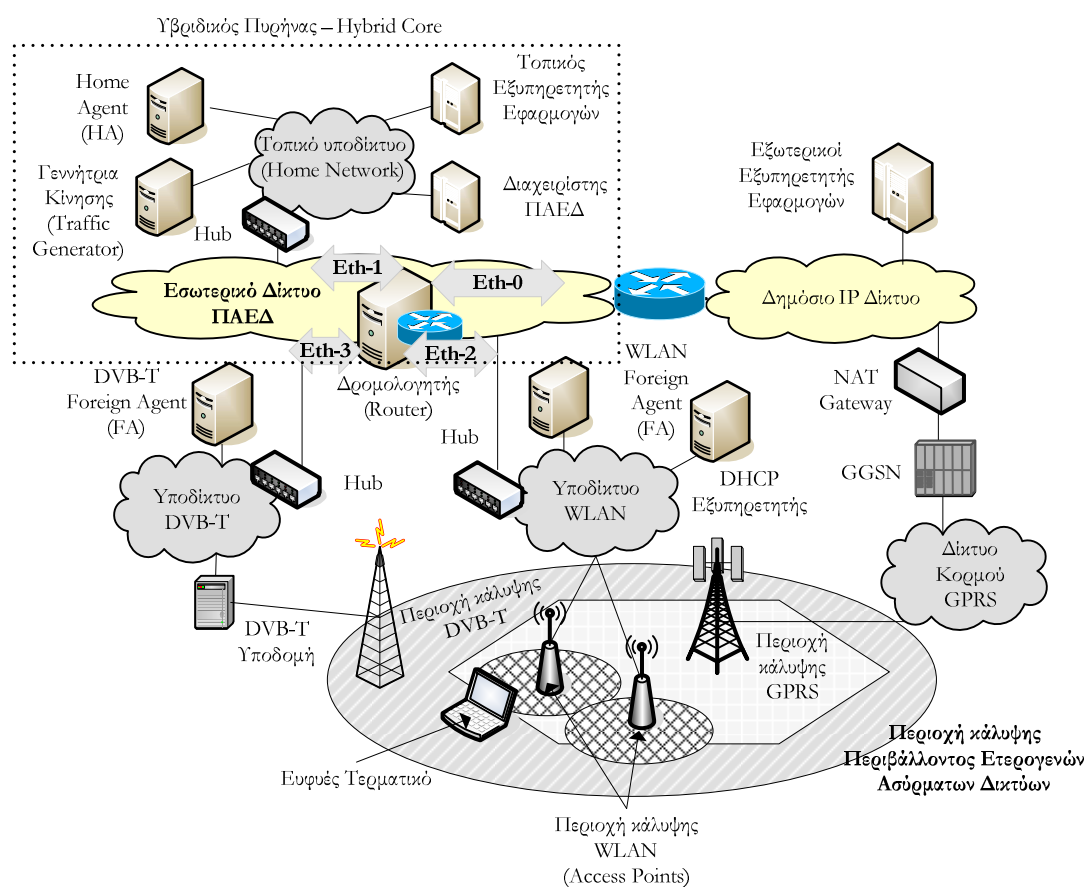
των τερματικών, την υποστήριξη του RIP για την παροχή διαδραστικών υπηρεσιών εκ μέρους του δικτύου DVB-T, την διαλειτουργικότητα (*interoperability*) με το στοιχείο NAT του GPRS και την υποστήριξη προηγμένων εφαρμογών. Η ικανοποίηση των πιο πάνω προβλημάτων, είτε στηρίχτηκε σε κοινώς αποδεκτές λύσεις από την επιστημονική κοινότητα, είτε σε τεχνολογικούς νεωτερισμούς που εισήχθησαν και δοκιμάστηκαν για πρώτη φορά. Η παρουσίαση που ακολουθεί αφορά και τα άλλα δυο ασύρματα δίκτυα (GPRS και WLAN), ώστε ο αναγνώστης να διαθέτει μια ολοκληρωμένη άποψη σε σχέση με την λειτουργία της πειραματικής πλατφόρμας.

Στην παράγραφο 3.3 παρουσιάζονται η αρχιτεκτονική και τα βασικά λειτουργικά στοιχεία ενός ευφυούς τερματικού, ικανού να αξιοποιήσει τις δυνατότητες που προσφέρει η παρουσία πολλαπλών ασύρματων δικτύων, συμπεριλαμβανομένου και του DVB-T. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στο πρωτόκολλο επικοινωνίας (*Network Access Co-ordination Protocol – NACP*) μεταξύ του τερματικού και της διαχειριστικής οντότητας του Δικτύου 4^{ης} Γενιάς. Το παρουσιαζόμενο πρωτόκολλο (σε επίπεδο μηνυμάτων που ανταλλάσσονται), δρα συμπληρωματικά στο ακολουθούμενο μηχανισμό κινητικότητας και δεν εξαρτάται από αυτόν. Πιο συγκεκριμένα, η διάδραση μεταξύ τερματικού και διαχειριστικής οντότητας, όπως αυτή υλοποιείται μέσω του NACP, αναβαθμίζει τον μηχανισμό κινητικότητας αφού επιτυγχάνει να απαντήσει στα τρία βασικά ερωτήματα που τίθενται κατά την διάρκεια των μεταπομπών. Τα ερωτήματα αυτά αναφέρονται στην χρονική στιγμή και τον λόγο της μεταπομπής (πότε και γιατί), αλλά και στο ποιο θα είναι το δίκτυο προορισμού (*target network*). Επιπλέον, η συμβολή του σε σχέση με τον καθορισμό του καναλιού διάδρασης για την περίπτωση των συστημάτων DVB-T είναι πολύ σημαντική. Αναλυτικότερες περιγραφές για όλες τις παραπάνω έννοιες παρουσιάζονται στην συνέχεια του κεφαλαίου.

Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παράγραφο 3.4 όπου παρουσιάζεται μια συνοπτική ανακεφαλαίωση και τα συμπεράσματα.

3.2 Αρχιτεκτονική πειραματικού Δικτύου 4^{ης} Γενιάς σε επίπεδο δικτυακών στοιχείων

Η ακολουθούμενη αρχιτεκτονική, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2, στην κατεύθυνση υλοποίησης του πειραματικού Δικτύου 4^{ης} Γενιάς (ΠΑΕΔ), είναι του τύπου “loose-coupling”. Η χρήση του λεγόμενου υβριδικού πυρήνα, για την διασύνδεση των δικτύων WLAN και DVB-T, βελτιώνει σημαντικά το επίπεδο ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών μέσα στην πειραματική πλατφόρμα. Στο Σχήμα 3-1 απεικονίζεται συνολικά η τοπολογία των δικτυακών στοιχείων, τόσο αυτών που συνθέτουν τα ασύρματα ραδιοδίκτυα όσο και των υποστηρικτικών στοιχείων του υβριδικού πυρήνα ή δικτύου κορμού.



Σχήμα 3-1. Αρχιτεκτονική Περιβάλλοντος 4^{ης} Γενιάς σε επίπεδο δικτυακών στοιχείων.

Τα βασικά συστατικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής συνοψίζονται στα εξής:

- Διαχειριστική Οντότητα ή Διαχειριστής Δικτύου 4^{ης} Γενιάς (βλέπε παράγραφο 3.2.1)
- Ασύρματο Δίκτυο Πρόσβασης τύπου DVB-T (βλέπε παράγραφο 3.2.4)
- Ασύρματο Δίκτυο Πρόσβασης τύπου WLAN 802.11b (βλέπε παράγραφο 3.2.2)
- Ασύρματο Δίκτυο Πρόσβασης τύπου GPRS (βλέπε παράγραφο 3.2.3)
- Άλλα στοιχεία εσωτερικού ή δικτύου κορμού (υβριδικός πυρήνας) όπως

- ο Δρομολογητής Δεδομένων (βλέπε παράγραφο 3.2.5.1)
 - ο Στοιχεία Διαχείρισης Κινητικότητας, όπως οι *Home Agent – HA* και *Foreign Agents – FAs*, απαραίτητα για την υλοποίηση του πρωτοκόλλου MIPv4 [PE97][PE02] και την υποστήριξη των διασυστηματικών μεταπομπών, (*Mobility Management Support*, βλέπε παράγραφο 3.2.5.2).
 - ο Τοπικός και ο Εξωτερικός Εξυπηρετητής Εφαρμογών (βλέπε παράγραφο 3.2.5.5)
 - ο Γεννήτρια Κίνησης – Αναλυτής Κίνησης (*Traffic Generator – Traffic Analyzer*, βλέπε παράγραφο 3.2.6), στοιχεία απαραίτητα για την διεξαγωγή πειραμάτων σε σχέση με τις επιδόσεις του πειραματικού Δικτύου 4^{ης} Γενιάς και με χρήση συστημάτων DVB-T.
- Πρότυπο multi-mode τερματικό. (βλέπε παράγραφο 3.3)
- Ο ρόλος όλων των προαναφερθέντων δικτυακών στοιχείων αναλύεται στην συνέχεια.

3.2.1 Διαχειριστής Δικτύου 4^{ης} Γενιάς.

Η βελτιστοποιημένη λειτουργία του Δικτύου 4^{ης} Γενιάς στηρίχθηκε στην αναβάθμιση και την προσαρμογή του ολοκληρωμένου NSMS (*Network and Service Management Systems*), που παρουσιάστηκε στο [DK+03], ώστε να μπορεί να αντεπεξέλθει σε ένα περιβάλλον με αληθινά δίκτυα και τερματικά. Ο Διαχειριστής είναι σε θέση να υποστηρίζει τις παρακάτω λειτουργίες:

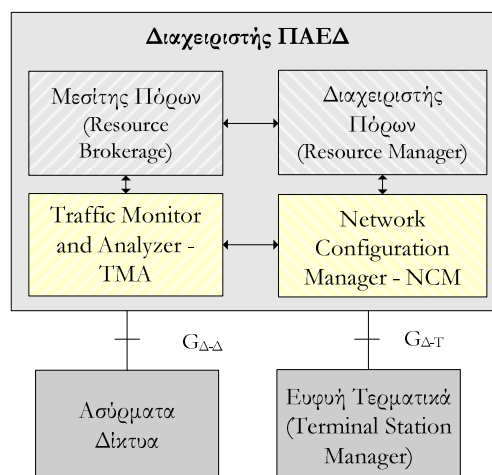
- Παρακολούθηση και ανάλυση του επιπέδου των διαθέσιμων πόρων των ασύρματων δικτύων του Διαχειριστή (*Traffic Monitor and Analyzer - TMA*). Η λειτουργία αυτή πραγματοποιείται μέσω της επικοινωνίας του Διαχειριστή με τα κατάλληλα στοιχεία των ασύρματων δικτύων που το αποτελούν. Στις αντίστοιχες παραγράφους (3.2.2.1 για το WLAN, 3.2.3.2 για το GPRS και 3.2.4.2 και για το DVB-T) παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες και η μεθοδολογία για τον υπολογισμό των διαθέσιμων πόρων αλλά και του κυκλοφοριακού φορτίου που επικρατεί, για κάθε δίκτυο ξεχωριστά. Σημαντικό ρόλο για την πραγματοποίηση της λειτουργίας αυτής έπαιξε το SNMP πρωτόκολλο (*Simple Network Management Protocol*), καθώς και οι υποστηριζόμενες MIBs (*Management Information Bases*), από τα διάφορα δικτυακά στοιχεία, συμπεριλαμβανομένων και αυτών που αφορούν τα συστήματα DVB-T. Μέσω των πιο πάνω διεπαφών και του ορισμού κατάλληλων κατωφλίων χωρητικότητας, ο Διαχειριστής, ήταν σε θέση να ανιχνεύσει καταστάσεις συμφόρησης, σε κάποιο από τα συνεργαζόμενα συστήματα αλλά και να προσδιορίσει τους διαθέσιμους πόρους για την σωστή λειτουργία της Μεσιτείας Πόρων (*Resource Brokerage*), όπως αυτή αναλύεται στην παράγραφο που ακολουθεί .
- Βελτιστοποιημένη χρήση των διαθέσιμων πόρων (*resource allocation*) μέσω της δημιουργίας αποδοτικών αλγορίθμων κατανομής του κυκλοφοριακού φορτίου στα επιμέρους ασύρματα δίκτυα (*Resource Management*). Η βελτιστοποίηση έγκειται στην σωστή κατανομή των χρηστών στα επιμέρους ασύρματα δίκτυα με κριτήρια, όπως η ικανοποίηση των απαιτήσεων

τους, η διατήρηση του επιπέδου ποιότητας (*QoS level*) των προσφερόμενων υπηρεσιών, οι συμφωνίες μεταξύ των NPs, το κόστος, οι διαθέσιμοι πόροι (*Resource Brokerage - Μεσιτεία Πόρων*) κ.α. Οι αλγόριθμοι που προορίζονται για την επίλυση προβλημάτων, όπως η κατανομή των υπηρεσιών των χρηστών σε δίκτυα και επίπεδα ποιότητας, με βάση συγκεκριμένα κριτήρια, αποτελούν ένα πολύ σημαντικό μέρος της λειτουργίας του *Resource Management*. Επιπλέον, χαρακτηρίζονται από μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας, εξαιτίας του μεγάλου αριθμού των παραμέτρων που επηρεάζουν το πρόβλημα. Καταλήγοντας, τονίζεται το γεγονός ότι το μέρος της λειτουργίας του RM, που μόλις περιγράψαμε, έχει συμπληρωματική σχέση με τους στόχους της παρούσας διδακτορικής διατριβής, αφού αποτελεί μέρος της υλοποίησης. Η λύση που υιοθετήθηκε για την συγκεκριμένη λειτουργία του Διαχειριστή, αφορά την προσαρμογή του προτεινόμενου διαχειριστικού συστήματος των [DK+03], [DS+04], στις απαιτήσεις των επιλεγμένων πραγματικών δικτύων, τερματικών και υπηρεσιών. Ενδεικτικά αναφέρονται και κάποιες επιπλέον ερευνητικές δουλειές στον τομέα αυτό: [WS00] και [SK+02]. Ειδικότερα για τα συστήματα DVB-T, η προσαρμογή αφορούσε την αναβάθμιση της οντότητας TMA για την παρακολούθηση του πραγματικού φορτίου, αλλά και την συνεργασία της με τον Μεσίτη Πόρων.

- Ολοκληρωμένες υπηρεσίες διαχείρισης των ευφών τερματικών όπως επαλήθευση ταυτότητας, εξουσιοδότηση και διαχείριση λογαριασμών (*Authorization, Authentication και Accounting – AAA*), επιλογή του καταλληλότερου δικτύου μετάδοσης/λήψης των δεδομένων (*Network Access Selection*), ασφάλεια (*Security*), προσφορά προηγμένων υπηρεσιών (π.χ. διαφορετικά επίπεδα ποιότητας, προσαρμογή περιεχομένου κ.α.), διαχείριση κινητικότητας (*Mobility Management*) και διαχείριση προφίλ χρήστη. Οι υπηρεσίες αυτές στηρίζονται εν μέρει στις υπάρχουσες αντίστοιχες λειτουργίες των ασυρμάτων δικτύων και βελτιώνονται από τις δυνατότητες που απορρέουν από την χρήση του Διαχειριστή, καθώς και από προσθήκες/αναβαθμίσεις στην πλευρά του δικτύου (π.χ. MIPv4). Επιπροσθέτως τονίζεται ότι σπουδαίο ρόλο στην επιτυχή λειτουργία τέτοιου είδους πολύπλοκων συστημάτων διαδραματίζει η διαχειριστική οντότητα στην πλευρά του τερματικού (*Terminal and Service Management System – TSMS*), αλλά και το πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ του τερματικού και του Διαχειριστή.
- Αλγόριθμοι και πολιτικές επαναπροσδιορισμού των παραμέτρων λειτουργίας των ασυρμάτων δικτύων (μέσω του *Network Configuration Manager - NCM*), με σκοπό την αποδοτικότερη χρήση τους, στα πλαίσια του RRM (*Radio Resource Management*) προβλήματος. Η σημασία της λειτουργίας αυτής, σε σχέση με την αποδοτικότερη χρήση των ασυρμάτων δικτύων, αναλύεται σε βάθος στα Κεφάλαια 5 και 6, όπου μελετάται διεξοδικά η περίπτωση RRM των συστημάτων DVB-T.

Στο σχήμα που ακολουθεί, απεικονίζεται η εσωτερική δομή του Διαχειριστή, με βάση την πιο πάνω ανάλυση, καθώς και οι διεπαφές επικοινωνίας με τα ασύρματα δίκτυα ($G_{\Delta-D}$) και τα τερματικά ($G_{\Delta-T}$).

Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την κατανομημένη μορφή (ένας Διαχειριστής ανά συνεργαζόμενο δίκτυο) αλλά και των λεπτομερειών που αφορούν την τεχνολογία υλοποίησης του συγκεκριμένου διαχειριστικού συστήματος, δίδονται στα [KK+03], [CRE8+03] και [DK+03]. Τονίζεται ότι για την περίπτωση των συστημάτων DVB-T, οι κυριότερες αναβαθμίσεις αφορούσαν τις οντότητες TMA και NCM και των Διαχειριστή Πόρων.

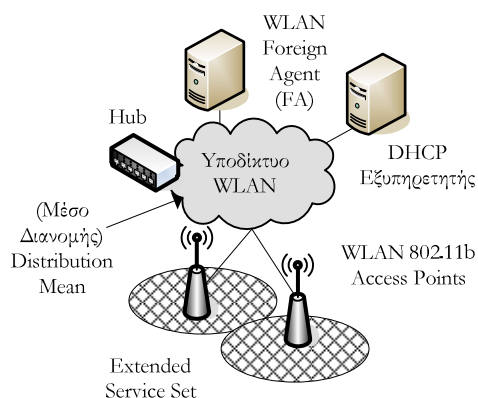


Σχήμα 3-2. Εσωτερική δομή Διαχειριστή.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα interfaces που διατηρεί ο Διαχειριστής με τα ασύρματα δίκτυα. Η επικοινωνία μεταξύ τους στηρίχθηκε στο πρωτόκολλο SNMPv2 (*Simple Network Management Protocol*) [CFS+90]. Στις παραγράφους που ακολουθούν (από 3.2.2 ως 3.2.4) δίδονται εν συντομία, οι τεχνικές λεπτομέρειες σχετικά με την υλοποίηση των ασύρματων τεχνολογιών που συμμετέχουν στο Δίκτυο 4^{ης} Γενιάς και ιδιαίτερα του συστήματος DVB-T. Επίσης περιγράφονται αναλυτικά τα interfaces επικοινωνίας μεταξύ του Διαχειριστή και των δικτυακών στοιχείων, καθώς και η μεθοδολογία που ακολουθείται στον υπολογισμό του επιπέδου κίνησης και των διαθέσιμων πόρων [KT+03].

3.2.2 Ασύρματο Δίκτυο Πρόσβασης τύπου WLAN 802.11b

Το παρόν ασύρματο δίκτυο WLAN αποτελείται από δύο AP, ρυθμισμένα κατάλληλα μέσω της παραμέτρου ESSID, (*Extended Service Set Identifier*), δημιουργώντας μια εκτεταμένη ομάδα εξυπηρέτησης (ESS). Τα συγκεκριμένα APs είναι τύπου Avaya AP-3, με αυξημένες δυνατότητες διαχείρισης μέσω SNMP πρωτοκόλλου. Το ethernet (βλέπε Σχήμα 3-3) αποτελεί το σύστημα διανομής του υποδικτύου κορμού WLAN.



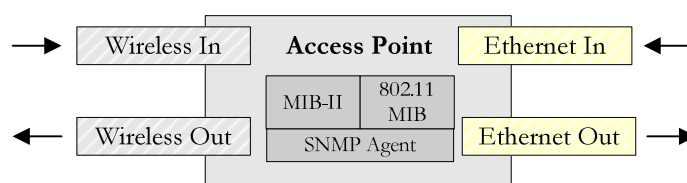
Σχήμα 3-3. Ασύρματο Δίκτυο Πρόσβασης τύπου WLAN 802.11b.

Η συνεργασία των δύο APs, στην δημιουργία ενός κοινού ESS, προσφέρει μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης καθώς και την δυνατότητα ενδοσυστηματικής μεταπομπής (*inter-system handovers*) από AP σε AP (όταν το τερματικό κινείται στην περιοχή επικάλυψης τους), χωρίς την διακοπή των ενεργών υπηρεσιών στο τερματικό. Η τελευταία δυνατότητα οφείλεται στην υποστήριξη του πρωτοκόλλου IAPP, από τον κατασκευαστή των συγκεκριμένων APs.

Τα επιπλέον στοιχεία που περιέχονται στο υποδίκτυο του WLAN είναι ο Εξυπηρετητής DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol* - Πρωτόκολλο Δυναμικής Διάρθρωσης Ξενιστή, [DR97], [AD97]) και ο Foreign Agent, μέρος της υποδομής MIP. Πιο συγκεκριμένα, ο Εξυπηρετητής DHCP προσφέρει την υπηρεσία αυτόματης διευθυνσιοδότησης (IP διεύθυνση, *Domain Name Server*, *Subnet mask* κ.α.) προς τα ευφυή τερματικά, ρυθμίζοντας έτσι την διεπαφή προσπέλασης WLAN. Λεπτομέρειες για τον WLAN Foreign Agent δίνονται στην παράγραφο 3.2.5.2.

3.2.2.1 Διεπαφή Διαχειρίστη-WLAN ($G_{\Delta-WLAN}$)

Ο Διαχειριστής (μέσω της κατάλληλης οντότητας TMA) επικοινωνεί με τα δικτυακά στοιχεία του δικτύου WLAN μέσω του πρωτοκόλλου SNMP ($G_{\Delta-WLAN}$ διεπαφή), με σκοπό την παρακολούθηση συγκεκριμένων παραμέτρων των MIBs των APs. Οι MIBs που υποστηρίζονται, από τα συγκεκριμένα APs, ακολουθούν τις προδιαγραφές των MIB-II [MR91] και 802.11 MIB [MIB11]. Στο Σχήμα 3-4 απεικονίζεται η εσωτερική δομή ενός WLAN 802.11 AP, καθώς και οι εισοδοί/έξοδοι της ασύρματης και ενσύρματης διεπαφής (*wireless/wired interfaces*) που διαθέτει. Οι μεταβλητές που παρακολουθούνται από την οντότητα TMA, αφορούν τους μετρητές της κίνησης που εμφανίζεται και στα δυο interfaces.



Σχήμα 3-4. Εσωτερική Δομή Access Point 802.11.

Ο Πίνακας 3-1 καταγράφει τις μεταβλητές που σταθμοσκοπούνται (poll) περιοδικά για κάθε AP ανά χρονικό διάστημα, ίσο με το *polling interval*.

| Μεταβλητή | Object Identifier (OID) | MIB | Περιγραφή |
|------------------|--------------------------|--------|---|
| EthInOctets | 1.3.6.1.2.1.2.2.1.16.1 | MIB-II | Μετρητής όγκου εισερχόμενων δεδομένων στο Ethernet interface (σε bytes) |
| EthOutOctets | 1.3.6.1.2.1.2.2.1.16.1 | MIB-II | Μετρητής όγκου εξερχόμενων δεδομένων στο Ethernet interface (σε bytes) |
| WirInOctets | 1.3.6.1.2.1.2.2.1.16.3 | MIB-II | Μετρητής όγκου εισερχόμενων δεδομένων στο Wireless interface (σε bytes) |
| WirOutOctets | 1.3.6.1.2.1.2.2.1.10.3 | MIB-II | Μετρητής όγκου εξερχόμενων δεδομένων στο Wireless interface (σε bytes) |
| WirFailedFrames | 1.2.840.10036.2.2.1.3.3 | 802.11 | Μετρητής αποτυχημένων 802.11 πλαισίων στο wireless interface. |
| WirACKFailure | 1.2.840.10036.2.2.1.9.1 | 802.11 | Μετρητής αποτυχημένων 802.11 πλαισίων τύπου ACK στο wireless interface |
| FCSErrorCountOID | 1.2.840.10036.2.2.1.12.3 | 802.11 | Μετρητής αποτυχημένων 802.11 πλαισίων στο wireless interface λόγω σφάλματος στο Frame Check Sum έλεγχο. |

Πίνακας 3-1. Μεταβλητές σταθμοσκόπησης στο WLAN (ανά AP)

Οι παραπάνω μεταβλητές χρησιμοποιούνται τόσο για τον ποσοτικό προσδιορισμό του επιπέδου κίνησης μέσα σε κάθε AP, αλλά παρέχουν πληροφορίες και για την ποιοτική κατάσταση τους, σε σχέση με φαινόμενα παρεμβολών ή άλλων καταστάσεων (π.χ. η περίπτωση του κρυμμένου τερματικού). Με βάση τον γενικό τύπο που ακολουθεί υπολογίζονται οι ρυθμοί μεταβολής των παραπάνω δεδομένων :

$$Rate(X) = \frac{Value(X, N_{polling} + 1) - Value(X, N_{polling})}{T_{polling}} \quad (2),$$

όπου X η μεταβλητή σταθμοσκόπησης, $Value(X, N_{polling})$ η τιμή της κατά την $N_{polling}$ -ιστη σταθμοσκόπηση και $T_{polling}$ η περίοδος σταθμοσκόπησης. Η διαθέσιμη χωρητικότητα σε επίπεδο AP εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή κάλυψής του. Πιο συγκεκριμένα οι παράγοντες που την επηρεάζουν είναι οι εξής:

- Η overhead πληροφορία που υπεισέρχεται από το πρωτόκολλο IEEE 802.11b.
- Ο αριθμός των τερματικών και το επίπεδο του κυκλοφοριακού φορτίου, που το καθένα από αυτά προκαλεί στην περιοχή εξυπηρέτησης του AP.
- Τυχόν παρεμβολές ή άλλα φαινόμενα, όπως αυτό του κρυμμένου τερματικού.
- Η μέθοδος διαμοιρασμού του ασύρματου καναλιού στους χρήστες (π.χ. λειτουργία κατανεμημένου συντονισμού ή λειτουργίας με θετική επιβεβαίωση, RTS-CTS)

Συνεχίζουμε με τους υπολογισμούς της μέγιστης δυνατής χωρητικότητας αλλά και της συνθήκης ανίχνευσης κυκλοφοριακής συμφοράς για το δίκτυο WLAN, σε επίπεδο AP.

Έστω F , ένας συντελεστής, με πεδίο τιμών από μηδέν ως ένα ($[0,1]$), ο οποίος εξαρτάται από τους πιο πάνω παράγοντες και καθορίζει κάθε στιγμή την μέγιστη δυνατή χωρητικότητα (C_{AP}) σε επίπεδο AP. Συνεπάγεται ότι η διαθέσιμη χωρητικότητα θα προσδιορίζεται από την σχέση:

$$WLAN_{avail.capacity} = C_{AP} - IP_{Throughput} \quad (3), \text{ όπου}$$

$C_{AP} = F * C_{AP}^{max}$ (4) η μέγιστη δυνατή χωρητικότητα, C_{AP}^{max} η χωρητικότητα όπως προδιαγράφεται από το πρότυπο του IEEE 802.11b και $IP_{Throughput} = Rate(EthInOctets) + Rate(EthOutOctets)$ (5), ο μέσος ρυθμός κυκλοφοριακής κίνησης σε επίπεδο IP.

Τα παραπάνω αποτελέσματα, βοηθούν τον Διαχειριστή, στην ανίχνευση καταστάσεων συμφοράς. Η έναρξη της περιόδου συμφοράς σηματοδοτείται από την παραβίαση της σχέσης :

$$IP_{Throughput} \leq W_a * C_{AP} \quad (6),$$

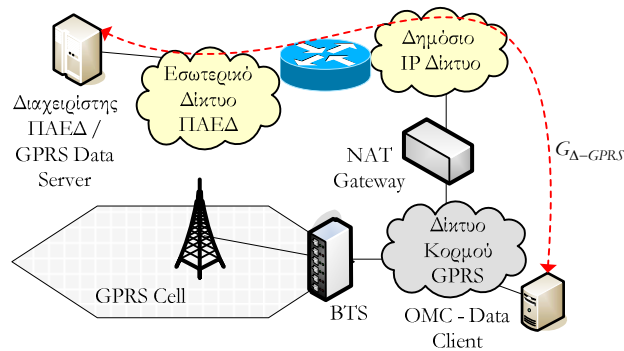
όπου W_a ο συντελεστής χρησιμοποίησης. Οι τιμές των πιο πάνω συντελεστών (F, W_a), μπορούν να προσδιοριστούν δια μέσω της χρήσης μοντέλων προσομοίωσης και διεξαγωγής πειραμάτων. Περισσότερες λεπτομέρειες θα δοθούν στο Κεφάλαιο 5.

3.2.3 Ασύρματο Δίκτυο Πρόσβασης τύπου GPRS

Ακολουθούν συνοπτικά η παρουσίαση των στοιχείων που αποτελούν το ασύρματο δίκτυο GPRS, καθώς και η περιγραφή της διεπαφής με τον Διαχειριστή.

3.2.3.1 Δικτυακά Στοιχεία GPRS

Το GPRS δίκτυο που ενσωματώθηκε στο πειραματικό Δίκτυο 4^{ης} Γενιάς, αποτελείται από μια κυψέλη, η οποία λειτουργεί στην συχνότητα των 1800MHz. Για την δημιουργία της κυψέλης χρησιμοποιήθηκαν ένα φορητό micro-BTS και ένα πομπός λήψης/αποστολής (transceiver), συνδεδεμένα απευθείας στο εμπορικό δίκτυο της Vodafone. Για λόγους μη επηρεασμού των μετρήσεων απόδοσης του GPRS, εξαιτίας της κίνησης που δημιουργείται από τους εξωτερικούς χρήστες φωνής, κατά την διάρκεια των πειραμάτων, μόνο τερματικά εξοπλισμένα με ειδικά προγραμματισμένες κάρτες SIM (*Subscriber Identity Module*) ήταν σε θέση να κάνουν χρήση του δικτύου. Κατά την διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων ήταν διαθέσιμες και οι οκτώ χρονοθυρίδες (*time-slots*) της κυψέλης για κίνηση μεταγωγής πακέτου (δηλαδή κίνησης GRPS). Σημειώνεται ότι για την σωστή συνεργασία των multi-mode τερματικών, είναι απαραίτητη η διαλειτουργικότητα (*interoperability*) με το στοιχείο NAT του GPRS. Η εκτεταμένη περιγραφή της τεχνικής λύσης που υιοθετήθηκε και βασίζεται σε κατάλληλες τροποποιήσεις στο λογισμικό του HA, παρουσιάζεται στην παράγραφο 3.2.5.3. Το Σχήμα 3-5 απεικονίζει την δομή του υποδικτύου GPRS, που χρησιμοποιήθηκε. Επίσης στο ίδιο σχήμα αναπαριστάται η διεπαφή μεταξύ του δικτύου GPRS και του Διαχειριστή.



Σχήμα 3-5. Ασύρματο Δίκτυο Πρόσβασης τύπου GPRS

Η αναλυτική περιγραφή της $G_{\Delta-GPRS}$, δηλαδή της μεθοδολογίας υλοποίησης της και των αλγορίθμων υπολογισμού του φορτίου κίνησης σε επίπεδο κυψέλης, παρατίθενται στην παράγραφο που ακολουθεί.

3.2.3.2 Διεπαφή Διαχειριστή-GPRS ($G_{\Delta-GPRS}$)

Για την ανάκτηση των δεδομένων που απαιτούνται για τον υπολογισμό της κυκλοφοριακής κίνησης που επικρατεί σε επίπεδο κυψέλης αναπτύχθηκε μια εφαρμογή client-server μεταξύ του GPRS OMC και του Διαχειριστή. Σκοπός της OMC – Data Client εφαρμογής είναι η απομόνωση (φιλτράρισμα) των δεδομένων που αφορούν την συγκεκριμένη κυψέλη, μέσα από το σύνολο των στοιχείων που είναι σε θέση να παρέχει το OMC της Vodafone. Αφού εντοπιστούν τα συγκεκριμένα δεδομένα, ακολουθεί η αποστολή τους προς την server εφαρμογή, η οποία αποτελεί μέρος του Διαχειριστή. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Ο Πίνακας 3-2 καταγράφει τις μεταβλητές που συλλέγονται περιοδικά από την client εφαρμογή και αποστέλλονται προς τον Διαχειριστή.

| Μεταβλητή | Σύμβολο | Περιγραφή |
|--------------------------------|--------------------------|--|
| averagePDCHcarryingDataTraffic | TS_{GPRS} | Μέσος όρος κατειλημμένων χρονοθυρίδων (time slots) για κίνηση GPRS, για το διάστημα παρατήρησης. |
| csTraffic | TS_{GSM} | Μέσος όρος κατειλημμένων χρονοθυρίδων για κίνηση φωνής, για στο διάστημα παρατήρησης. |
| availableTS_Numerical | TS_{Total} | Αριθμός διαθέσιμων χρονοθυρίδων για κίνηση GPRS, στο διάστημα παρατήρησης. |
| TS_Capacity_CS | $TS_{capacity}^{max}$ | Ονομαστική τιμή μέγιστου ρυθμού διέλευσης δεδομένων ανά χρονοθυρίδα. (Συνήθως 13,4Kbps για CS-2) |
| throughputPerTS | $TS_{throughput}^{GPRS}$ | Τιμή μέσου ρυθμού διέλευσης των δεδομένων ανά χρονοθυρίδα, οφειλόμενη σε GPRS κίνηση, για το διάστημα παρατήρησης. |

Πίνακας 3-2. Μεταβλητές παρατήρησης ανά GPRS κυψέλη

Το συνολικό φορτίο ανά κυψέλη GPRS προκύπτει με την βοήθεια των παρακάτω εξισώσεων :

- **Μέγιστη Χωρητικότητα Κυψέλης:**

$$C_{GPRS}^{\max} = TS_{Total} * TS_{capacity}^{\max} \quad (7)$$

- **Αριθμός Κατειλημμένων Χρονοθυρίδων :**

$$TS_{used} = TS_{GPRS} + TS_{GSM} \quad (8)$$

- **Επίπεδο GPRS Κίνησης :**

$$GPRS_{Throughput} = TS_{throughput}^{GPRS} * TS_{GPRS} \quad (9)$$

- **Διαθέσιμη Χωρητικότητα για GPRS Κίνηση:**

$$GPRS_{avail.capacity} = (TS_{Total} + TS_{used}) * TS_{capacity}^{\max} + (TS_{capacity}^{\max} - TS_{throughput}^{GPRS}) * TS_{GPRS} \quad (9)$$

Η ανίχνευση της κατάστασης συμφόρησης στην κυψέλη GPRS πραγματοποιείται με παρόμοιο τρόπο, όπως και στην περίπτωση του δικτύου WLAN. Συγκεκριμένα η παραβίαση της παρακάτω σχέσης, προσδιορίζει την συνθήκη που σηματοδοτεί την έναρξη της :

$$GPRS_{avail.capacity} \leq G_a * C_{GPRS}^{\max} \quad (10),$$

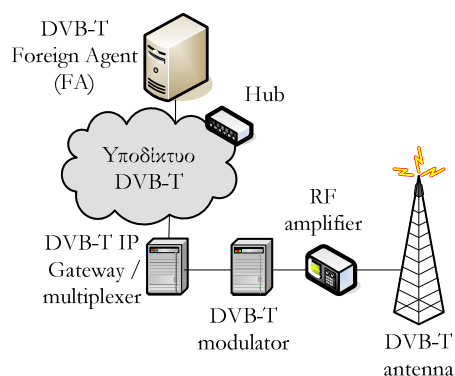
όπου G_a ο αντίστοιχος συντελεστής χρησιμοποίησης, για το δίκτυο GPRS.

3.2.4 Ασύρματο Δίκτυο Πρόσβασης τύπου DVB-T

Ολοκληρώνουμε τις περιγραφές των τεχνικών λεπτομερειών, που αφορούν τα δίκτυα που συμμετέχουν στο Δίκτυο 4^{ης} Γενιάς, με το σύστημα DVB-T.

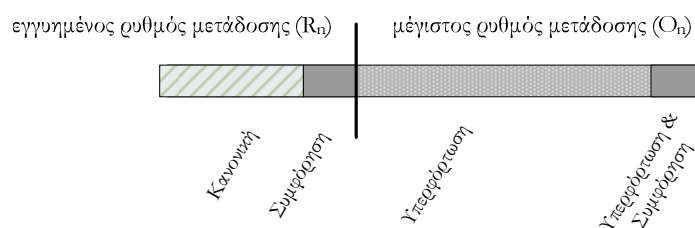
3.2.4.1 Δικτυακά Στοιχεία DVB-T

Το δίκτυο DVB-T της πειραματικής μας τοπολογίας, αποτελείται από ένα IP Gateway/Multiplexer DVB-T της εταιρείας THALES Broadcast & Multimedia, ένα modulator, ένα RF ενισχυτή και μια κεραία εκπομπής. Ο DVB-T Gateway παρέχει την δυνατότητα ενθυλάκωσης (*encapsulation*) των δεδομένων IP, σε μια ροή MPEG-2. Τα δεδομένα εισέρχονται στον DVB-T Gateway μέσω του ενσωματωμένου ethernet interface του. Επίσης μέσω των κατάλληλων εισόδων εισέρχονται και τα ψηφιακά τηλεοπτικά προγράμματα σε μορφή MPEG-2, με σκοπό την συνολική πολυπλεξία και την παραγωγή ενός μοναδικού TS. Στην συνέχεια η έξοδος του DVB-T Gateway οδηγείται στον modulator, όπου πραγματοποιείται η διαμόρφωση OFDM, σύμφωνα με το πρότυπα του DVB-T. Τέλος το σήμα ενισχύεται (*Radio Frequency Amplifier*) και μεταδίδεται προς τους χρήστες. Το συγκεκριμένο μοντέλο DVB-T IP Gateway μπορεί να υποστηρίξει ρυθμό εξερχόμενης πληροφορίας μέχρι 24Mbps (C_{DVB-T}^{\max}). Επίσης όλα τα θέματα λειτουργίας του (*configuration* και *management*) υποστηρίζονται μέσω μιας μη-προτυποποιημένης MIB. Το Σχήμα 3-6 απεικονίζει την δομή του δικτύου DVB-T ολοκληρωμένα.



Σχήμα 3-6. Ασύρματο Δίκτυο Πρόσβασης τύπου DVB-T

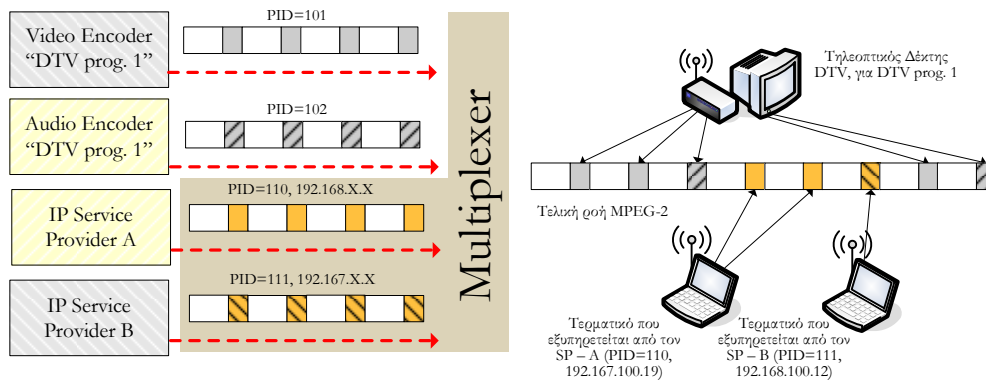
Η προσφερόμενη χωρητικότητα διαμοιράζεται ανάμεσα στις IP και τηλεοπτικές υπηρεσίες με την βοήθεια των Ομάδων Προγράμματος (*Groups of Programs*), οι οποίες ξεχωρίζουν με βάση το PID (*Packet Identifier*). Ενδεικτικά ο ορισμός ενός Group θα απαιτούσε τα εξής στοιχεία : $Group_i = [PID, R_n, O_n]$, εύρος IP διευθύνσεων], όπου R_n ο εγγυημένος ρυθμός μετάδοσης και O_n ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης. Στην περίπτωση που η συνολική ζήτηση σε ένα $Group_i$ ξεπεράσει την τιμή R_n (ως την μέγιστη τιμή O_n), δεν παρέχονται εγγυήσεις για την σίγουρη μετάδοση των επιπλέον δεδομένων, όταν το δίκτυο βρεθεί σε κατάσταση συμφόρησης. Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 3-7) αναγράφονται όλες οι πιθανές καταστάσεις, σε σχέση με το επίπεδο κίνησης στην Ομάδα Προγράμματος.



Σχήμα 3-7. Πιθανές καταστάσεις Ομάδας Προγράμματος

Επιπλέον το εύρος των διευθύνσεων IP, καθορίζει το Group που θα χρησιμοποιηθεί στην αποστολή των δεδομένων προς το τερματικό. Για της ανάγκες της πειραματικής πλατφόρμας, ορίστηκε ένα Group, με χωρητικότητα ίση με 10 Mbps και με εύρος διευθύνσεων, το οποίο αναγράφεται στην παράγραφο 3.2.5.1.

Ο χρήστης με την σειρά του, αφού λάβει το σήμα DVB-T, αποκωδικοποιεί μόνο το περιεχόμενο του Group από το οποίο εξυπηρετείται, ενώ χρησιμοποιεί μόνο τα δεδομένα που αναφέρονται στην δική του διεύθυνση. Το σχήμα που ακολουθεί, μέσω ενός απλού παραδείγματος λειτουργίας, αναπαριστά γραφικά την όλη διαδικασία.



Σχήμα 3-8. Μοντέλο Λειτουργία DVB-T IP/Gateway

Στην επόμενη παράγραφο ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή του interface μεταξύ του Διαχειριστή και του πειραματικού δικτύου DVB-T.

3.2.4.2 Διεπαφή Διαχειριστή-DVB-T ($G_{\Delta-DVBT}$)

Στην περίπτωση του DVB-T, όπως και για την διεπαφή διαχείρισης του WLAN, χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο SNMP. Οι αυξημένες δυνατότητες που προσέφερε η υλοποιημένη MIB του DVB-T IP Gateway διευκόλυνε αρκετά την διαδικασία υπολογισμού του κυκλοφοριακού φορτίου για το συγκεκριμένο δίκτυο. Ο Πίνακας 3-3 παρουσιάζει τις μεταβλητές που συλλέγονται περιοδικά από τον Διαχειριστή.

| Μεταβλητή | Σύμβολο | Περιγραφή |
|---------------------|-------------|--|
| TransmissionBitRate | TBR | Μέγιστος ρυθμός δεδομένων που μπορεί να υποστηριχθεί από το συγκεκριμένο configuration του DVB-T IP/Gateway. |
| UsefulBitRate | UBR | Στιγμιαίος αθροιστικός ρυθμός δεδομένων όλων των ενεργών υπηρεσιών (TV+IP). |
| TVServicesBitRate | $TVBitRate$ | Στιγμιαίος αθροιστικός ρυθμός δεδομένων όλων των ενεργών τηλεοπτικών υπηρεσιών. |
| $Group_i$ | $Group_i$ | Στιγμιαίος ρυθμός δεδομένων για κάθε i Group. |

Πίνακας 3-3. Μεταβλητές παρατήρησης ανά DVB-T IP/Gateway

Με την βοήθεια των σχέσεων 5 και 6, υπολογίζουμε κάθε στιγμή το επίπεδο της κίνησης, καθώς και της εναπομένουσας χωρητικότητας του δικτύου DVB-T.

$$\square \quad IP_{traffic} = \sum_{\forall i \in IP \text{ traffic Groups}} Group_i \quad (11),$$

$$\square \quad DVB_{avail.capacity} = TBR - UBR \quad (12)$$

Επίσης η διαθέσιμη χωρητικότητα ανά Group δίνεται από την σχέση 7.

$$\square \quad Group_{avail.capacity}^i = \max(O_i - Group_i, \min(R_i - Group_i, TBR - IP_{traffic})) \quad (13)$$

Η έναρξη της περιόδου συμφόρησης για την περίπτωση του δικτύου DVB-T, σηματοδοτείται από την παραβίαση της σχέσης :

$$Group^i_{avail.capacity} \leq C_{Group}^{\min} \quad (14),$$

όπου C_{Group}^{\min} μια ελάχιστη τιμή χωρητικότητας.

3.2.5 Δικτυακά Στοιχεία Υβριδικού Πυρήνα (Δίκτυο Κορμού)

Σε αυτό το σημείο του κεφαλαίου παρουσιάζονται αναλυτικά τα υπόλοιπα μέρη του πρότυπου πειραματικού Δικτύου 4^{ης} Γενιάς. Πιο συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στον εσωτερικό router, καθώς και στα θέματα δρομολόγησης των δεδομένων και διευθυνσιοδότησης. Επιπλέον αναφέρονται οι απαιτήσεις αλλά και οι λεπτομέρειες υλοποίησης της λειτουργίας Διαχείρισης Κινητικότητας (*Mobility Management*), ο ρόλος της Γεννήτριας και του Αναλυτή Κίνησης, των τοπικών και εξωτερικών Εξυπηρετητών Εφαρμογών και το είδος των υπηρεσιών που υποστηρίζονται από το σύστημα.

3.2.5.1 Δρομολογητής Δικτύου 4^{ης} Γενιάς - Διευθυνσιοδοσία

Κατά την διάρκεια ανάπτυξης του πειραματικού Δικτύου 4^{ης} επιλέχθηκε το πρωτόκολλο IPv4 έναντι της νεότερης του έκδοσης IPv6 [STA96]. Οι λόγοι που οδήγησαν στην συγκεκριμένη επιλογή είναι οι εξής :

- Το IPv4 είναι ευρύτατα διαδεδομένο και υποστηρίζεται από όλα τα δίκτυα. Επιπλέον, η πλατφόρμα Mobile IPv4 (αναγκαία για την υποστήριξη των intersystem μεταπομπών) είναι ήδη προτυποποιημένη, με αποτέλεσμα την ύπαρξη μιας μεγάλης ποικιλίας εμπορικών αλλά και open-source υλοποιήσεων. Σε αντίθεση με την τεχνολογική ωριμότητα που παρουσιάζει το IPv4, το IPv6 και ειδικότερα το MIPv6 βρίσκονται στα πρώιμα στάδια της προτυποποίησης, με ελάχιστες υλοποιήσεις.
- Αδυναμία υποστήριξης του IPv6 και MIPv6 [MN02] από τους κατασκευαστές εξοπλισμού για τα δίκτυα DVB-T, παρόλο που στο στάνταρτ ορίζεται ο τρόπος μετάδοσης πακέτων που ακολουθούν το IPv6 πρωτόκολλο. Παρόμοια κατάσταση επικρατεί και στα εμπορικά δίκτυα GPRS, όπως αυτό που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια υλοποίησης του πειραματικού μας περιβάλλοντος, αν και ήδη έχει ξεκινήσει η διερεύνηση των μεθόδων για την μετάβαση τους στο πρωτόκολλο IPv6 [WIL02].
- Έλλειψη εφαρμογών συμβατών με το IPv6.

Σημειώνεται επιπλέον ότι η μετάβαση σε IPv6 και MIPv6 (όταν το επιτρέψουν οι πιο πάνω περιοριστικές συνθήκες) θα διευκολύνει την ανάπτυξη συστημάτων που ακολουθούν την φιλοσοφία των Δικτύων 4^{ης} Γενιάς, μειώνοντας την πολυπλοκότητα τους και βελτιώνοντας τις επιδόσεις τους.

Στα πλαίσια ανάπτυξης του υβριδικού πυρήνα, ως δρομολογητής (*router*) χρησιμοποιήθηκε ένας υπολογιστής, εξοπλισμένος με τέσσερα ethernet interfaces και λειτουργικό σύστημα Linux. Κάθε interface, μέσω των κατάλληλων ρυθμίσεων, ορίζει ένα διαφορετικό υποδίκτυο (*subnet*) και αναλαμβάνει την μεταφορά των δεδομένων από και προς αυτό. Τα υποδίκτυα που ορίζονται είναι τα εξής: το Τοπικό Δίκτυο ή Home Network (μέσω του *eth-1*), το υποδίκτυο WLAN (μέσω του *eth-2*)

και το υποδίκτυο DVB-T (μέσω του *eth-3*). Επίσης μέσω του *eth-0* interface επιτυγχάνεται η διασύνδεση της πλατφόρμας με το ασύρματο δίκτυο GPRS αλλά και το Διαδίκτυο (*Internet*). Σχετικά με την διευθυνοδότηση χρησιμοποιήθηκε το 143.233.222.0/24 εύρος διευθύνσεων, το οποίο αποτελεί μέρος του χώρου διευθυνοδοσίας του Εθνικού Κέντρου Ερευνών «Δημόκριτος», όπου πραγματοποιήθηκε η όλη ανάπτυξη της πλατφόρμας. Ο Πίνακας 3-4 περιγράφει τις ρυθμίσεις που απαιτούνται στον router (ανά interface) και την κατανομή των διευθύνσεων.

| Router Interface και Διεύθυνση / Μάσκα Διευθ. | Όνομα | Def.Gateway | Προς / Από | Κατανομή Διευθύνσεων |
|---|-----------------|---------------------|-------------------|---|
| Eth0 – 143.233.252.214/30 | Εξωτ. Δίκτυο | 143.233.252. 213 | GPRS/Inter net | |
| Eth1 – 143.233.222.1/26 | home- subnet | 143.233.252. 214 | Home Network | - 143.233.222.2 – Home Agent - 143.233.222.3 – Διαχειριστής - 143.233.222.4 – Τοπικός Εξυπηρετητής Εφαρμογών - 143.233.222.5-12 - Δεσμευμένες - 143.233.222.13-62 – Home Addresses Τερματικών |
| Eth2 – 143.233.222.65/26 | wlan- subnet | | WLAN Network | - 143.233.222.66 – WLAN FA - 143.233.222.67-68 – AP1 και AP2 - 143.233.222.69-76 - Δεσμευμένες - 143.233.222.77-126 – WLAN τοπ. διευθύνσεις τερματικών οι οποίες ανατίθενται μέσω του WLAN DHCP server. |
| Eth3 – 143.233.222.129/26 | dvb- subnet | | DVB Network | - 143.233.222.130 – DVB-T FA - 143.233.222.131 – DVB-T IP Gateway - 143.233.222.132-191 – Δεσμευμένες |

Πίνακας 3-4. Ρυθμίσεις δρομολογητή

3.2.5.2 Διαχείριση Κινητικότητας – Mobility Management

Στην παρούσα παράγραφο εξετάζεται το πολύ σημαντικό θέμα της κινητικότητας (*mobility*) των τερματικών. Τα πιο σπουδαία είδη των μεταπομπών (handovers) που συναντούνται σε τέτοιου είδους περιβάλλοντα είναι τα εξής :

- **Ενδοσυστηματικές Μεταπομπές (Intra-system handovers):** Αφορούν τις μεταπομπές που συμβαίνουν στα όρια του ίδιου δικτύου (π.χ. μεταξύ GPRS κυψελών ή WLAN Access Points). Το είδος αυτό των μεταπομπών είναι γνωστό και με τον όρο *micro-mobility* και μια σειρά από πρωτόκολλα, όπως το *Cellular IP* [CG+00] και το *HAWAII* [RA+00] έχουν προταθεί για την βελτιστοποίηση της δρομολόγησης των δεδομένων. Στα πλαίσια του πειραματικού μας περιβάλλοντος, οι ενδοσυστηματικές μεταπομπές υποστηρίζονται από τους εγγενείς μηχανισμούς των δικτύων GPRS και WLAN. Επιπλέον για το δίκτυο DVB-T, το ζήτημα αποτελεί ένα ανοικτό ερευνητικό θέμα με προτεινόμενες λύσεις όπως αυτή που περιγράφεται στο [SEG02], ενώ στην συγκεκριμένη περίπτωση η ύπαρξη ενός μόνο DVB-T cell, απλοποιεί την κατάσταση αρκετά.

- **Διασυστηματικές Μεταπομπές (Inter-system handovers):** Στην περίπτωση αυτή, οι μεταπομπές αφορούν την μεταπήδηση του τερματικού ανάμεσα σε διαφορετικής τεχνολογίας συστήματα. Η υποστήριξη των διασυστηματικών μεταπομπών (ή *macro-mobility*) στηρίζεται συνήθως στην πλατφόρμα Mobile IP. Για τις ανάγκες υλοποίησης χρησιμοποιήθηκε η open-source υλοποίηση [HUT01] του πρωτοκόλλου MIPv4. Σημειώνεται ότι οι διασυστηματικές μεταπομπές οφείλονται είτε σε λόγους πραγματικής μετακίνησης του χρήστη (π.χ. κίνησης του εκτός περιοχής ραδιοκάλυψης του ενεργού δικτύου), είτε λόγω εντολής της διαχειριστικής οντότητας (π.χ. στην περίπτωση αντιμετώπισης καταστάσεων υπερβολικού κυκλοφοριακού φορτίου), είτε λόγω ασυμβατότητας μεταξύ των απαιτήσεων του χρήστη και των δυνατοτήτων του ενεργού δικτύου. Τονίζεται, ότι για την επίτευξη αποδοτικών διασυστηματικών μεταπομπών (δηλαδή ελαχιστοποίηση των απωλειών δεδομένων και διατήρηση των ενεργών συνδέσεων) απαιτείται η συνεργασία της διαχειριστικής οντότητας, του τερματικού και των εφαρμογών που τρέχουν σε αυτό. Επιπλέον, όπως και στο Κεφάλαιο 2 αναφέρθηκε, η αρχιτεκτονική ενοποίησης των δικτύων που ακολουθείται, επηρεάζει σημαντικά τις επιδόσεις των μεταπομπών (περίπτωση διασυστηματικών μεταπομπών ανάμεσα σε δίκτυα με κοινό ή διαφορετικό διαχειριστικό τομέα). Τέλος, περισσότερες λεπτομέρειες για τις ελάχιστες απαιτήσεις σε σχέση με την υλοποίηση αποδοτικών σε ένα σύστημα 4^{ης} Γενιάς, δίνονται στην παράγραφο 3.2.5.2.1.

Ακολουθεί η περιγραφή των πιο σημαντικών όρων αλλά και ενός ενδεικτικού παραδείγματος διασυστηματικής μεταπομπής, με την βοήθεια της υποδομής MIPv4.

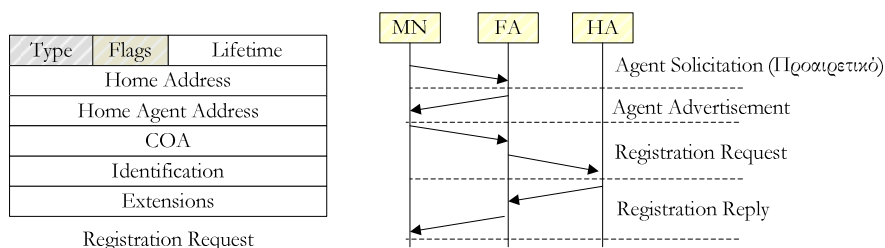
Στην προδιαγραφή του πρωτοκόλλου MIPv4 [PER02] ορίζονται οι εξής λειτουργικές οντότητες :

- **Mobile Node – MN (Κινητός κόμβος):** Χαρακτηρίζεται το τερματικό το οποίο μετακινείται μεταξύ των διαφορετικών δικτύων, χωρίς να τερματίζονται οι ενεργές συνδέσεις, οι οποίες εξυπηρετούνται μέσω μιας σταθερής διεύθυνσης.
- **Home Agent – HA (Οικείων Πράκτορας):** Πρόκειται για την οντότητα, η οποία επιτελεί την δρομολόγηση των δεδομένων προς τους mobile nodes, διατηρώντας πληροφορίες σχετικά με την θέση του καθενός τους.
- **Foreign Agent – FA (Επισκεπτών Πράκτορας):** Πρόκειται για την οντότητα, η οποία τοποθετείται σε επισκεπτόμενα από τους mobile nodes δίκτυα (*visited networks*) και συνεργάζεται με τον HA στην λειτουργία δρομολόγησης των δεδομένων.

Επίσης ορίζονται και οι παρακάτω νέοι όροι :

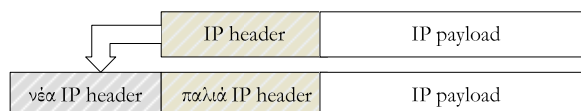
- **MIP Μηνύματα:** Ειδικού τύπου μηνύματα, τα οποία υλοποιούνται μέσω της επέκτασης του πρωτοκόλλου ICMP (*Internet Control Message Protocol Router Discovery*) [DEE91]. Τα μηνύματα αυτά είτε αποστέλλονται περιοδικά από τους HA και FAs, με σκοπό την ενημέρωση των MN για την ύπαρξη τους (*agent advertisements*), είτε αφορούν την διαδικασία εγγραφής (*registration requests/replies*), είτε άλλους ειδικούς σκοπούς και ρυθμίσεις. Στο

Σχήμα 3-9 απεικονίζεται ενδεικτικά η δομή του *Registration Request* μηνύματος, καθώς και η ακολουθία ανταλλαγής μηνυμάτων, στην διάρκεια εγγραφής του MN στον HA.



Σχήμα 3-9. Ακολουθία ανταλλαγής μηνυμάτων κατά την εγγραφή του MN στον HA

- **Foreign Agent Care-of-Address – FA CoA:** Διεύθυνση με βάση την οποία ο MN εγγράφεται στον FA, με σκοπό την δρομολόγηση των δεδομένων. Τα δεδομένα που καταφθάνουν στον FA, με βάση αυτή την διεύθυνση IP του, δρομολογούνται εν συνεχεία προς τους κινητούς κόμβους.
- **Collocated Care-of-Address – CCoA:** Νέα διεύθυνση που ανατίθεται από το φιλοξενών δίκτυο (π.χ. μέσω DHCP μηχανισμού) στον MN, με την οποία ο τελευταίος ενημερώνει (*mobile binding*) είτε τον HA (στην περίπτωση μη ύπαρξης FA στο *visited network*), είτε τον παρόντα FA, με σκοπό την δρομολόγηση των δεδομένων.
- **Home Address:** Πρόκειται για την σταθερή IP διεύθυνση, η οποία ανατίθεται στον MN, για ένα εκτεταμένο χρονικό διάστημα, με βάση την οποία τα δεδομένα διοχετεύονται προς αυτόν, ανεξάρτητα από το τρέχον δίκτυο στο οποίο βρίσκεται.
- **Tunneling (Σηράγωση):** Περιγράφει την διαδικασία κατά την οποία ο HA συλλαμβάνει τα δεδομένα που αποστέλλονται με προσορισμό την Home Address ενός MN και τα δρομολογεί προς την CoA του τελευταίου, μέσω του κατάλληλου tunnel (μονοπατιού). Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται με την ενθυλάκωση των δεδομένων στον HA, μέσω της τεχνικής IP in IP encapsulation, όπως περιγράφεται στο [PRC96] και απεικονίζεται στο Σχήμα 3-10 και την από-ενθυλάκωση (de-capsulation) τους είτε στον MN είτε στον FA, ανάλογα την μέθοδο διευθυνσιοδότησης που χρησιμοποιείται.



Σχήμα 3-10. Τεχνική IP in IP encapsulation

Ενδεικτικά αναφέρονται οι Minimal Encapsulation Protocol [PER96] και Generic Routing Encapsulation Protocol [HAN94], ως εναλλακτικές μέθοδοι ενθυλάκωσης των δεδομένων IP. Στην παράγραφο 3.2.5.3 παρουσιάζεται και η τεχνική IP in UDP (*User Datagram Protocol*) μέθοδος, απαραίτητη για την συνεργασία μεταξύ MIP και του NAT gateway του GPRS.

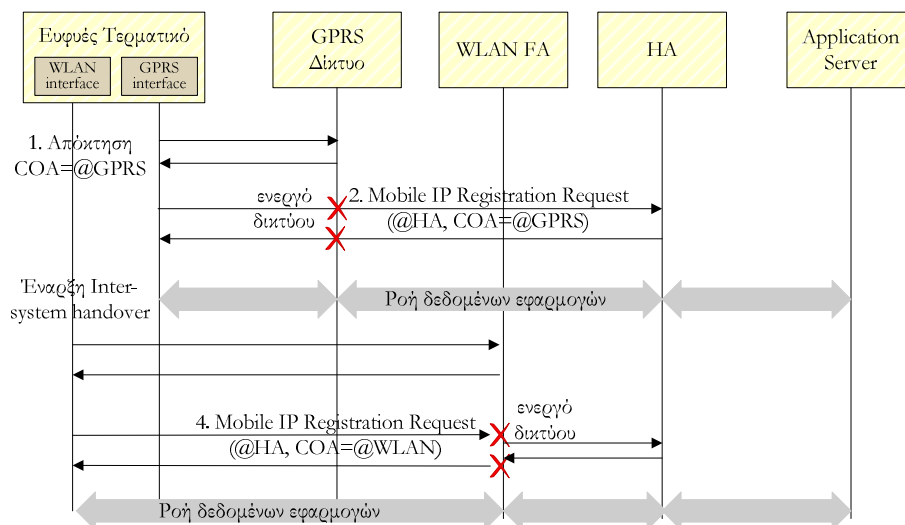
Οι βασικές λειτουργίες πάνω στις οποίες στηρίζεται η όλη φιλοσοφία του MIP είναι οι εξής :

- **Μηχανισμός Ανακάλυψης – Discovery Mechanism:** Μέσω των ειδικών μηνυμάτων (*agent advertisements*) επιτυγχάνονται λειτουργίες όπως η ανίχνευση των HA και FAs από τους MN.
- **Registering – Διαδικασία Εγγραφής:** Καταχώρηση νέας ή διαφορετικής διεύθυνσης στον HA από τους MNs.
- **Tunneling – Σηράγωση**

Ήδη από την ως τώρα περιγραφή των βασικών εννοιών και όρων του MIPv4, έχει γίνει προφανής η ύπαρξη δυο μεθόδων σε σχέση με την ανάθεση διεύθυνσης στο επισκεπτόμενο κινητό κόμβο, δηλαδή είτε με την *collocated* ή την *foreign agent care-of-address*. Στην μεν πρώτη περίπτωση ο κινητός κόμβος αποτελεί το τερματικό σημείο του tunnel των δεδομένων που δημιουργείται, ενώ επιπλέον είναι υπεύθυνος για την από-ενθυλάκωση τους. Αντίθετα στην δεύτερη μέθοδο, ο FA είναι το τερματικό σημείο του tunnel των δεδομένων που καταφθάνουν από τον HA, τα οποία μετά την από-ενθυλάκωση τους, δρομολογούνται στο κινητό κόμβο. Στα θετικά της πρώτης μεθόδου σημειώνεται ότι δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη FA στο επισκεπτόμενο δίκτυο, διευκολύνοντας την κινητικότητα των τερματικών σε δίκτυα που δεν ανήκουν στον αρχικό σχεδιασμό ή δεν είναι δυνατή η εγκατάσταση του (όπως στην περίπτωση του δικτύου GPRS). Η δεύτερη μέθοδος προτιμάται γιατί δεν απαιτείται η ανάθεση και δέσμευση «πολύτιμων» διεύθυνσεων IPv4 στους κινητούς κόμβους, παρά μόνο αυτής του FA. Επιπλέον εξοικονομούνται δικτυακοί πόροι, επειδή η από-ενθυλάκωση των δεδομένων, άρα και η απομάκρυνση του overhead του πρωτοκόλλου MIPv4 (βλέπε Σχήμα 3-10), πραγματοποιείται στον FA, πριν τα δεδομένα αποσταλούν στο τελικό προορισμό τους.

Ακολουθεί η περιγραφή ενός ενδεικτικού παραδείγματος λειτουργίας του MIPv4 και με τις δύο μεθόδους διευθυνσιοδότησης των κινητών κόμβων. Στο ευφές τερματικό αποδίδεται μια μοναδική σταθερή διεύθυνση IP, έστω *@HA*. Η ανάθεση γίνεται στατικά από τον Διαχειριστή. Επίσης το τερματικό γνωρίζει εκ των προτέρων την διεύθυνση του HA στο δίκτυο, καλύπτοντας με τον τρόπο αυτό και την περίπτωση ενεργοποίησης του τερματικού σε διαφορετικό δίκτυο από το Home Network (όπου τα *advertisement messages* του HA δεν μεταδίδονται). Ας υποθέσουμε ότι αρχικά το ευφές τερματικό αποικιά προσβασιμότητα μέσω του GPRS. Έστω *@GPRS*, η διεύθυνση που του ανατίθεται από το συγκεκριμένο δίκτυο. Λόγω της μη ύπαρξης FA στο δίκτυο GPRS, το τερματικό χρησιμοποιεί την μέθοδο *collocated care-of-address (CCoA)*, για την εγγραφή του στον HA, αποστέλλοντας απευθείας το κατάλληλο μήνυμα (*registration mobility binding*) προς τον τελευταίο. Μετά το *registration mobile binding* μεταξύ του τερματικού και του HA, όλα τα πακέτα που αφορούν την *@HA* διεύθυνση δρομολογούνται από και προς την CCoA διεύθυνση (δηλαδή την *@GPRS*). Συνεχίζουμε με την υπόθεση ότι ο κινητός κόμβος πραγματοποιεί διασυστηματική μεταπομπή στο δίκτυο WLAN. Αρχικά το τερματικό θα απευθυνθεί στον WLAN FA (του οποίου η διεύθυνση γίνεται γνωστή μέσω των περιοδικών *Agent Advertisements*), πραγματοποιώντας εγγραφή με την μέθοδο *foreign agent care-of-address*. Το τερματικό δια μέσου του WLAN FA θα ενημερώσει τον HA για την αλλαγή στην CoA του (νέο *registration mobile binding*). Τα δεδομένα που αφορούν την διεύθυνση *@HA* δρομολογούνται μέσω του HA και του WLAN FA στην καινούργια CoA,

ολοκληρώνοντας με τον τρόπο αυτό την διασυστηματική μεταπομπή. Στο Σχήμα 3-11 αναπαριστώνται με γραφικό τρόπο όλα τα βήματα του πιο πάνω ενδεικτικού παραδείγματος.



Σχήμα 3-11. Διασυστηματική μεταπομπή με την βοήθεια του MIPv4

Στα πλαίσια της παρουσιαζόμενης πειραματικής πλατφόρμας χρησιμοποιήθηκαν και οι δύο τρόποι λειτουργίας του MIPv4. Ο HA εντοπίζεται στο Home Network (βλέπε Σχήμα 3-1), ενώ για τα δίκτυα WLAN και DVB-T χρησιμοποιήθηκαν ο FA_{WLAN} και ο FA_{DVB-T} αντίστοιχα, εγκατεστημένοι στα κατάλληλα υποδίκτυα. Τέλος για το δίκτυο GPRS έγινε χρήση της μεθόδου της collocated-CoA, άρα δεν χρησιμοποιήθηκε επιπλέον FA. Οι λόγοι που οδήγησαν στην επιλογή αυτή σε σχέση με το GPRS δίκτυο, είναι οι εξής :

- Περιορισμός στην ανάπτυξη FA σε ένα εμπορικό δίκτυο, όπως αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην υλοποίηση της πειραματικής πλατφόρμας.
- Απαραίτητη η αναβάθμιση του λογισμικού του GGSN με την προσθήκη του [SG98], ώστε να είναι δυνατή η συνεργασία του FA με το πρωτόκολλο μετάδοσης δεδομένων στο GPRS ([SIM94], *Point-to-Point Protocol*).

Στην παράγραφο που ακολουθεί περιγράφονται οι απαιτήσεις για την διεξαγωγή βελτιστοποιημένων και αποτελεσματικών διασυστηματικών μεταπομπών.

3.2.5.2.1 Βελτιστοποίηση Διασυστηματικών Μεταπομπών.

Έχοντας παρουσιάσει τον μηχανισμό υψηλού επιπέδου κινητικότητας που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της υλοποίησης μας, ακολουθεί μια περιγραφή των απαιτήσεων για την επίτευξη αποτελεσματικών μεταπομπών μέσα σε ασύρματα ετερογενή δίκτυα. Ο όρος αποτελεσματικές μεταπομπές αντικατοπτρίζει ιδιότητες όπως η αδιάκοπη συνέχιση των ενεργών συνδέσεων (*seamless*), η ελαχιστοποίηση των απωλειών δεδομένων (*minimize handover data losses*) και του χρόνου διάρκειας των μεταβατικών φαινομένων (*transition effects*), η διατήρηση του προσφερόμενου επιπέδου ποιότητας (*QoS*) και ασφάλειας (*security*), βέλτιστη δρομολόγηση των δεδομένων και προαιρετική προσαρμογή

του περιεχομένου των εφαρμογών (*content adaptation*). Για την επίτευξη όλων των πιο πάνω στόχων επιβάλλεται η συνεργασία των high-level μηχανισμών κινητικότητας (π.χ. MIP) με εγγενή στοιχεία των χαμηλότερων επιπέδων του χρησιμοποιούμενου πρωτοκόλλου επικοινωνίας (π.χ. πληροφορίες radio-level) από την πλευρά του τερματικού. Επιπλέον στην βελτιστοποίηση της απόδοσης των μεταπομπών, σπουδαίο ρόλο διαδραματίζει η Διαχειριστική Οντότητα, το είδος των εφαρμογών και οι πληροφορίες που αφορούν την κατάσταση τους στην πλευρά του τερματικού (*application level statistics*). Με βάση τις πιο πάνω παρατηρήσεις προκύπτουν οι παρακάτω απαιτήσεις για την αποτελεσματική διαχείριση της κινητικότητας (επιεντρώνοντας στις δια συστηματικές μεταπομπές):

1. Οι διαδικασίες κινητικότητας θα πρέπει να επιδεικνύουν ανοχή (*robustness*) σε αποτυχίες των δικτυακών συνδέσεων. Πιο χαρακτηριστική είναι η περίπτωση απώλειας σύνδεσης λόγω μετακίνησης του τερματικού εκτός περιοχής κάλυψης του ασύρματου δικτύου (*radio coverage loss*). Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει το τερματικό να μπορεί να ανιχνευθεί από το σύστημα ξανά, ακόμα και αν έχει εγκατασταθεί σε δίκτυο διαφορετικής τεχνολογίας.
2. Συμβατότητα και διαλειτουργικότητα με τις υπάρχουσες πλατφόρμες και τεχνολογίες (π.χ. MIPv4 ή MIPv6) που εξασφαλίζουν *IP-level* ή *Application level mobility*.
3. Ελαχιστοποίηση των μηνυμάτων σηματοδότησης (*signaling*) που απαιτούνται για την υλοποίηση του μηχανισμού *mobility*.
4. Συνύπαρξη των μηχανισμών υψηλού επιπέδου κινητικότητας (*macro-mobility*) με τους εγγενείς μηχανισμούς κινητικότητας (*micro-mobility*) που παρέχονται από τα ασύρματα δίκτυα.
5. Οι διαδικασίες κινητικότητας θα πρέπει να είναι ανεξάρτητες από τους μηχανισμούς δρομολόγησης των δεδομένων, ενώ είναι επιθυμητή η απαίτηση για αδιάκοπη σύνδεση όταν οι τελευταίοι αλλάζουν δυναμικά.
6. Υποστήριξη κινητικότητας των τερματικών μεταξύ διαφορετικών τεχνολογικά δικτύων, αλλά και δικτύων που ανήκουν σε διαφορετικούς φορείς (γνωστή και με τον όρο *global mobility*).
7. Διατήρηση των ενεργών συνδέσεων (στο επίπεδο εφαρμογών) κατά την διάρκεια της μεταπομπής (*seamless handover*).
8. Υποστήριξη προγραμματισμένων μεταπομπών (π.χ. λόγω κακής ραδιοκάλυψης) αλλά και εναλλακτικών λύσεων στην περίπτωση αποτυχίας με σκοπό την διατήρηση της συνδεσιμότητας του τερματικού.
9. Δυνατότητα γένεσης συμβάντων σιανδάλισης (*triggering events*) τα οποία να οδηγούν στις λεγόμενες προληπτικές (*proactive*) ή προγραμματισμένες (*programmable*) μεταπομπές. Η δημιουργία *triggering events* μπορεί να οφείλεται στο ίδιο το τερματικό (π.χ. λόγω εξασθένησης του σήματος) ή στην διαχειριστική οντότητα (π.χ. κατά την διάρκεια αντιμετώπισης κατάστασης συμφόρησης). Στην μεν πρώτη περίπτωση η μεταπομπή χαρακτηρίζεται ως *mobile-assisted*, ενώ στην δεύτερη ως *network-assisted*.
10. Αποδοτική μεταπομπή με ελαχιστοποίηση των απωλειών δεδομένων καθώς και του συνολικού χρόνου επανάκτησης της σύνδεσης.

Είναι προφανές ότι για την επίτευξη των πιο πάνω απαιτήσεων πραγματοποιήθηκαν τα εξής :

- Αναβάθμιση των multi-mode τερματικών με κατάλληλο λογισμικό με στόχο την διαχείριση των δικτυακών συνδέσεων (συμπεριλαμβανομένου του μηχανισμού κινητικότητας) και των ενεργών εφαρμογών. Επιπλέον μέσω της δημιουργίας κατάλληλου πρωτοκόλλου, επιτυγχάνεται η συνεργασία των τερματικών με την διαχειριστική οντότητα (περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με το τερματικό καθώς και τα βασικά μηνύματα παρουσιάζονται στην παράγραφο 3.3.2). Η διεπαφή τερματικού και Διαχειριστή οδηγεί στην επίτευξη λειτουργιών όπως η βέλτιστη επιλογή δικτύου σύνδεσης αλλά και προληπτικής (*proactive*) μεταπομπής, με κριτήρια την κυκλοφοριακή κατάσταση των δικτύων, τις συνθήκες ραδιοκάλυψης στην περιοχή όπου εντοπίζεται ο χρήστης, τις απαιτήσεις και τις δυνατότητες του τερματικού αλλά και σε σχέση με το κόστος χρήσης των διαφορετικών συστημάτων.
- Η ενσωμάτωση μηχανισμού που να προσφέρει IP-level mobility όπως το MIPv4, που ήδη παρουσιάστηκε. Επιπλέον πραγματοποιήθηκε προσαρμογή του MIPv4 για την υποστήριξη αδιάλειπτων διασυστηματικών μεταπομπών μεταξύ διαφορετικών ασύρματων τεχνολογιών, όπως η περίπτωση διαλειτουργικότητας με το στοιχείο GPRS NAT (βλέπε 3.2.5.3)
- Η εκμετάλλευση και συνεργασία με τους εγγενείς μηχανισμούς κινητικότητας των επιμέρους ασυρμάτων δικτύων (*Inter Access Point Protocol* στην περίπτωση των WLANs και τον μηχανισμό μεταπομπών που διαθέτουν τα κυψελωτά GPRS δίκτυα).
- Εκμετάλλευση low-level (π.χ. *radio level*) αλλά και high-level (π.χ. στατιστικά δεδομένα προερχόμενα από το επίπεδο των εφαρμογών) πληροφοριών με στόχο την βελτιστοποίηση των μεταπομπών στην πλευρά του τερματικού. Οι πιο πάνω πληροφορίες αξιοποιήθηκαν με σκοπό την γένεση *triggering events* προς την κατεύθυνση προγραμματισμένων και προληπτικών μεταπομπών, από την πλευρά του τερματικού και της διαχειριστικής οντότητας.
- Προσαρμογή και αναβάθμιση των εφαρμογών (*application adaptation*) και του περιεχομένου των υπηρεσιών (*content adaptation*) στις απαιτήσεις της λειτουργίας της κινητικότητας (λεπτομέρειες παρουσιάζονται στην παράγραφο 3.2.5.5).

Ρεαλιστικά σενάρια και πειραματικά αποτελέσματα που καταδεικνύουν την αποτελεσματικότητα του συστήματος στην διαχείριση της κινητικότητας για όλες τις περιπτώσεις διασυστηματικών μεταπομπών, αποτελούν το μέρος του παρόντος κεφαλαίου.

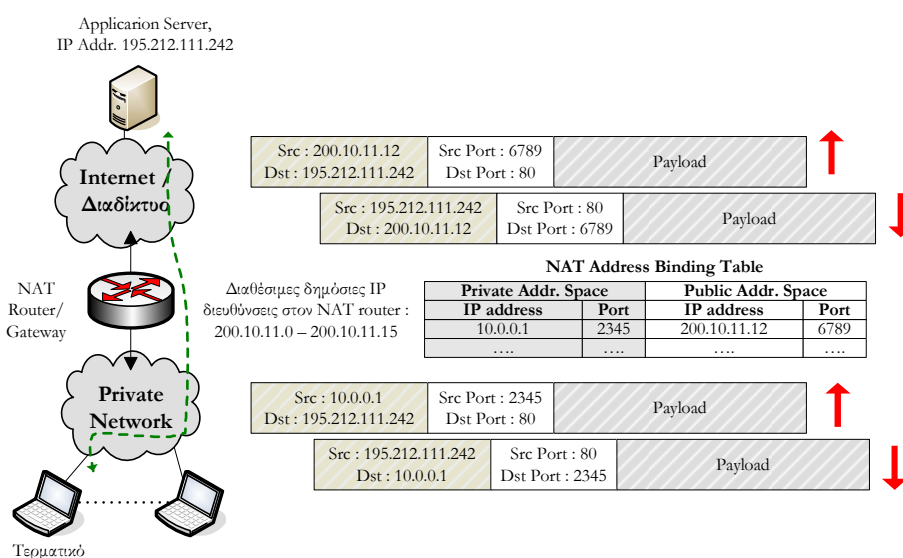
Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται και αναλύονται οι απαραίτητες προσθήκες τόσο στο λογισμικό του HA, όσο και στον $F4_{DVB-T}$, με στόχο την συνεργασία του GPRS NAT με το MIP καθώς και την υποστήριξη του DVB-T RIP, αντίστοιχα.

3.2.5.3 Διαλειτουργικότητα με το GPRS NAT

Ο περιορισμένος αριθμός των διαθέσιμων δημόσιων διευθύνσεων της έκδοσης 4 του πρωτοκόλλου IP, σε σχέση με την ραγδαία αύξηση των χρηστών του Διαδικτύου αλλά και την καθυστέρηση στην

προτυποποίηση και υλοποίηση της έκδοσης 6 του ίδιου πρωτοκόλλου, οδήγησε στην εφεύρεση νέων τεχνικών διευθυνσιοδότησης. Ο πιο γνωστός είναι αυτός του Δρομολογητή/Πύλη NAT (*Network Address Translator Router/Gateway* ή Μεταφραστής Διευθύνσεων Δικτύου) [SH99], [SE01]. Μέσω του NAT δίδεται η δυνατότητα απεικόνισης (*mapping*) μιας ομάδας ιδιωτικών διευθύνσεων σε μια και μόνο δημόσια (άρα και προσβάσιμη ή *routable*) διεύθυνση. Ο NAT Router/Gateway τοποθετείται στα όρια του ιδιωτικού υποδίκτυο με το Διαδίκτυο, εξασφαλίζοντας προσβασιμότητα στους χρήστες του πρώτου, αλλά και εξοικονόμηση «πολυτίμων» διευθύνσεων IPv4.

Στο Σχήμα 3-12 αναπαριστάται ένα τυπικό σενάριο λειτουργίας του NAT. Στο σενάριο αυτό ο NAT Gateway χρησιμοποιεί πολλαπλές δημόσιες διευθύνσεις IP (από 200.10.11.0-15) για καλλίτερες επιδόσεις. Επίσης στα τερματικά που εξυπηρετούνται μέσα από το ιδιωτικό υποδίκτυο (*private network*) αποδίδονται διευθύνσεις που ακολουθούν την μορφή 10.0.0.0/8.



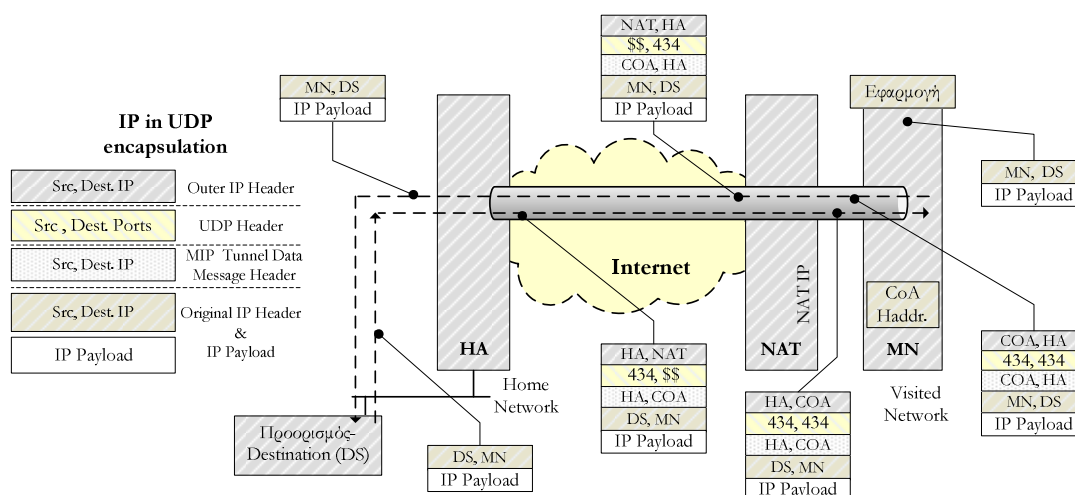
Σχήμα 3-12. Παράδειγμα λειτουργίας NAT

Η διαδικασία δρομολόγησης έχει ως εξής : Το τερματικό αποστέλλει τα δεδομένα, κάνοντας χρήση της ιδιωτικής του διεύθυνσης και μιας θύρας (*port*), προς τον κόμβο προορισμού. Τα δεδομένα διασχίζουν (*traverse*) τον NAT Gateway με αποτέλεσμα την τροποποίηση της διεύθυνσης πηγής (*source address*) και της αντίστοιχης θύρας (*source port*) με μια από τις δημόσιες διευθύνσεις του NAT Gateway και ενός νέου port αντίστοιχα, στην επικεφαλίδα του μεταδιδόμενου πακέτου IP. Η πληροφορία [Τερματικό <Private IP address, port>, <NAT Public IP address, port>] αποθηκεύεται ως νέα εγγραφή στον πίνακα διευθυνσιοδεσίας του NAT Gateway (*Address Binding Table*), την πρώτη φορά που το τερματικό θα αποστείλει δεδομένα προς το δημόσιο δίκτυο και θα παραμείνει ενεργή ως την διακοπή της σύνδεσης ή την παρέλευση συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος (*time-out period*). Στην αντίθετη κατεύθυνση επικοινωνίας, ο NAT Gateway αναλαμβάνει να δρομολογήσει τα δεδομένα προς το τερματικό, τροποποιώντας ξανά την επικεφαλίδα του πακέτου IP, σύμφωνα με τις πληροφορίες που περιέχονται στον Address Binding Table.

Η εφαρμογή του NAT εκτός από τα οφέλη που προσφέρει, παρουσιάζει και συγκεκριμένα μειονεκτήματα, όπως αυτά περιγράφονται από τους [HAI00] και [HS01]. Πιο συγκεκριμένα :

- Προσθ εται  να ακ ομα  πιπεδο στην λειτουργία του πρωτοκόλλου IP, καταργώντας την ιδιότητα της σύνδεσης *end-to-end*. Συγκεκριμένα μια από τις βασικές αρχές του μοντέλου IP είναι  τι η πληροφορία σχετικά με την κατάσταση της σύνδεσης διατηρείται μόνο στα endpoints και τερματίζεται μόνο  ταν αυτά καταρρεύσουν ή δεν υπάρχει  λλη επιλογή δρομολόγησης των δεδομένων. Σε περίπτωση αποτυχίας του NAT Gateway τερματίζονται αυτόματα  λες οι υπάρχουσες συνδέσεις που εξυπηρετούνται μέσω του τελευταίου.
- Οι υπάρχουσες προδιαγραφές και υλοποιήσεις υποστηρίζουν συγκεκριμένα πρωτοκόλλα,  πως TCP, UDP και ICMP. Δεν υποστηρίζεται επικοινωνία βασισμένη στην IP in IP encapsulation τεχνική, η οποία χρησιμοποιείται στην υλοποίηση του πρωτοκόλλου MIP (βλέπε παράγραφο 3.2.5.2).
- Δεν είναι δυνατή η  ναρξη επικοινωνίας προς σταθμούς που λειτουργούν «πίσω» από NAT Gateways (δηλαδή σε ιδιωτικά δίκτυα – *private networks*), από χρήστες που βρίσκονται σε δημόσια δίκτυα. Επιπλέον οι σταθμοί αυτοί δεν αντιλαμβάνονται την  παρξη του NAT Gateway,  τε μπορούν να κάνουν χρήση της public IP που τους ανατίθεται. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την αδυναμία υποστήριξης της επικοινωνίας IP in IP encapsulation,  χει σαν αποτέλεσμα την μη σωστή λειτουργία του πρωτοκόλλου MIP, σε κινητούς σταθμούς, στους οποίους παρεμβάλλεται NAT Gateway. Στην συνέχεια δίδεται η περιγραφή της λύσης που υιοθετήθηκε με σκοπό την διαλειτουργικότητα μεταξύ του MIP και του GPRS NAT Gateway, στα πλαίσια υλοποίησης του πειραματικού Δικτύου 4th Γενιάς.

Στην αρχική  κδοση του MIPv4 [PER02] δεν ήταν δυνατή η υποστήριξη κινητών κόμβων, οι οποίοι συνδέονταν μέσω NAT Gateways. Η ασυμβατότητα αυτή ξεπεράστηκε με των  πέκταση του πρωτοκόλλου MIP,  πως περιγράφεται στο [LV03]. Η λύση στηρίζεται στην αλλαγή της τεχνικής ενθυλάκωσης των δεδομένων από IP in IP σε IP in UDP , με στόχο την εκμετάλλευση του γεγονότος  τι το port που χρησιμοποιείται στην υλοποίηση του UDP πρωτοκόλλου παραμένει σταθερό. Οι προτεινόμενες αλλαγές αφορούν μόνο τον HA και τον MN, χωρίς να επηρεάζουν τις αρχές λειτουργίας του NAT και επικεντρώνονται στην τροποποίηση των Registration Request και Reply μηνυμάτων, με την προσθήκη ενός επιπλέον πεδίου, το οποίο να σηματοδοτεί την χρήση της τεχνικής ενθυλάκωσης των δεδομένων, IP in UDP. Στο Σχήμα 3-13 απεικονίζεται η τεχνική IP in UDP encapsulation, καθώς και  να παράδειγμα MIP traversal μέσα από NAT Gateway, χωρίς την παρουσία FA.



Σχήμα 3-13. IP in UDP Encapsulation – Παράδειγμα MIP traversal μέσω από NAT Gateways (χωρίς την παρουσία FA)

Στο προαναφερθέν σχήμα, φαίνονται όλα τα στάδια επεξεργασίας των δεδομένων από και προς το MN. Συγκεκριμένα τόσο στον HA και στον MN εφαρμόζεται η τεχνική του IP in UDP encapsulation και de-capsulation. Ο HA αντιλαμβάνεται την ύπαρξη NAT, εξαιτίας της διαφοράς ανάμεσα στην source IP διεύθυνση του μηνύματος Registration Request και την CoA, που εμπεριέχεται στο ίδιο μήνυμα. Όπως φαίνεται και στο σχήμα ο NAT Gateway επενεργεί μόνο στον Outer IP header και UDP header, αφήνοντας ανεπηρέαστα τα υπόλοιπα πεδία του πακέτου.

3.2.5.4 Υποστήριξη RIP για DVB-T Δίκτυα

Η υποστήριξη υπηρεσιών IP από την πλευρά του δικτύου DVB-T, απαιτεί την ύπαρξη ενός καναλιού διάδρασης (*Return Interaction Path - RIP*), με βασικό στόχο την υλοποίηση της κατεύθυνσης ανόδου των δεδομένων (uplink). Στην προτεινόμενη πειραματική πλατφόρμα, οι διαθέσιμες εναλλακτικές ασύρματες τεχνολογίες, ικανές να διαδραματίσουν τον ρόλο του καναλιού επιστροφής, είναι το δίκτυο IEEE 802.11b WLAN και το δίκτυο GPRS. Η τεχνική λύση που ακολούθηθηκε είναι σχετικά απλή, συγκριτικά με λύσεις όπως η [DD+01] και στηρίζεται σε μικρές αλλαγές στο λογισμικό του DVB-T FA, αλλά και στον καθορισμό ενός επιπλέον κανόνα δρομολόγησης (*routing rule*) στο μηχάνημα που φιλοξενεί τον τελευταίο. Οι τροποποιήσεις στον DVB-T FA αφορούν την αναβάθμιση του με την δυνατότητα να διαχειρίζεται MIP Registration Requests από μονοκατευθυντικά δίκτυα. Η λογική που ακολουθείται, είναι παρόμοια με τις τεχνικές αντιμετώπισης του NAT Gateway, για την περίπτωση των δικτύων GPRS. Πιο συγκεκριμένα, ο DVB-T FA αντιλαμβάνεται την περίπτωση μονοκατευθυντικού δικτύου, εξαιτίας της διαφοράς ανάμεσα στην source IP διεύθυνση του μηνύματος Registration Request και της FA CoA, που εμπεριέχεται στο ίδιο μήνυμα. Επιπλέον, μέσω του ειδικού κανόνα δρομολόγησης, στο μηχάνημα που φιλοξενεί το λογισμικό του DVB-T FA, τα δεδομένα με διευθύνσεις προορισμού που ανήκουν στον χώρο διευθυνσιοδοσίας του υποδικτύου DVB-T (όπως προκύπτουν μετά την διαδικασία αποενθυλάκωσης),

κατευθύνονται στον DVB-T IP Gateway/Multiplexer. Στην τελική φάση, ο DVB-T IP Gateway/Multiplexer αναλαμβάνει να αποστείλει τα δεδομένα προς το τερματικό, μέσω της ανάθεσης τους στην κατάλληλη Ομάδα Προγράμματος (ρύθμιση της PID παραμέτρου).

3.2.5.5 Παρεχόμενες Υπηρεσίες - Εξυπηρετητές και Προηγμένοι Πελάτες Εφαρμογών

Ο ορισμός συγκεκριμένων τύπων υπηρεσιών καθώς και των προφίλ που περιγράφουν τις απαιτήσεις τους, σε ότι αφορά τον ελάχιστο (ή μέσο) ρυθμό δεδομένων και της καθυστέρησης (*delay*) άφιξης των πακέτων, έχει διπλό στόχο. Από την μια επιτυγχάνεται να καθοριστεί το επίπεδο ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών προς τους χρήστες (ειδικά στα είδη των δικτύων που επιλέχθηκαν, τα οποία προσφέρουν μόνο *best-effort* υπηρεσίες) αλλά και επιτρέπεται η ποσοτική αξιολόγηση των επιδόσεων του συστήματος. Η επιλογή του τύπου των υπηρεσιών και των λειτουργικών απαιτήσεων τους έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτουν όλο το εύρος των εφαρμογών Internet, αλλά και να είναι συμβατές με τις δυνατότητες των επιλεγμένων ασύρματων δικτύων. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ταξινόμηση των παρεχόμενων υπηρεσιών με βάση τον μέσο ρυθμό δεδομένων, την ευαισθησία στην καθυστέρηση (real time ή όχι), το είδος των δεδομένων που μεταφέρουν (audio, video και data) και το πρωτόκολλο (TCP ή UDP) που χρησιμοποιούν, ανά επίπεδο ποιότητας στο οποίο προσφέρονται. Σημειώνεται ότι για κάθε υπηρεσία ορίστηκαν μόνο δύο επίπεδα ποιότητας (*Low* και *High*) για λόγους απλότητας. Επίσης στον ίδιο πίνακα υπάρχει η πληροφορία σχετικά με την συμβατότητα τους με τα επιμέρους ασύρματα δίκτυα.

| Υπηρεσία | Επίπεδο Ποιότητας | Ρυθμός Δεδομένων | Audio | Video | Data | Real Time | TCP/UDP | GPRS | WLAN | DVB-T GPRS | DVB-T WLAN | Εφαρμογές |
|---|-------------------|------------------|-------|-------|------|-----------|---------|------|------|------------|------------|--|
| Γενική Υπηρεσία Internet (Generic Internet Service Provision – GISP) | <i>Low</i> | 9,6 Kbps | ✗ | ✗ | ✓ | ✗ | T | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | Πλοήγηση στο Διαδίκτυο, Email, μεταφορά αρχείων. |
| | <i>High</i> | 32 Kbps | ✗ | ✗ | ✓ | ✗ | T | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |
| Πολυμεσική Υπηρεσία Internet (Multimedia Internet Service Provision – MISP) | <i>Low</i> | 36 Kbps | ✗ | ✗ | ✓ | ✗ | T | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | » » Επιπλέον πλοήγηση στο Διαδίκτυο σε τόπους με πολυμεσικό περιεχόμενο, υπηρεσίες ήχου |
| | <i>High</i> | 64 Kbps | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | T | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | |
| Υπηρεσία Ροής Video (Video Streaming Service - VSS) | <i>Low</i> | 128 Kbps | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | U | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | Υπηρεσία ροής video. |
| | <i>High</i> | 512 Kbps | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | U | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | |

Πίνακας 3-5. Παρεχόμενες Υπηρεσίες

Ο ορισμός των πιο πάνω προσφερόμενων υπηρεσιών συνοδεύεται από την αναβάθμιση των «παραδοσιακών» Πελατών Εφαρμογών (π.χ. Internet browsers ή video players) σε *Προηγμένους Πελάτες Εφαρμογών (Enhanced Application Clients)*, των οποίων ο ρόλος είναι διττός:

- Επιτρέπουν την συνεργασία τους με την διαχειριστική οντότητα του τερματικού, ώστε ο τελευταίος να ενημερώνει τον Διαχειριστή για τον αριθμό και το είδος των ενεργών υπηρεσιών που επιθυμεί ο χρήστης κάθε στιγμή.
- Παρέχουν στατιστικά στοιχεία επιπέδου εφαρμογής (*Application Level Statistics*).

Σημειώνεται ότι είναι δυνατή η παράλληλη λειτουργία των *Legacy Application Clients* (Κληροδοτημένων Πελατών Εφαρμογών).

Το περιεχόμενο των υπηρεσιών προέρχεται από τον Τοπικό ή Εξωτερικούς Εξυπηρετητές Εφαρμογών (βλέπε Σχήμα 3-1). Με την χρήση του Τοπικού Εξυπηρετητή κατά την διάρκεια των πειραμάτων, αποφεύγεται ο επηρεασμός των αποτελεσμάτων από αστάθμητους και μη μετρήσιμους παράγοντες που έχουν σχέση με την κατάσταση των εξωτερικών δικτύων. Σημειώνεται ότι η υπηρεσία VSS στηρίχθηκε στο πρότυπο MPEG4. Η κωδικοποίηση και η αναπαραγωγή του περιεχομένου, αλλά και η λήψη χρήσιμων στατιστικών στοιχείων (*bit και frame rate*), όπως παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο, στηρίχθηκε στα εργαλεία που παρέχονται από το [MPE04].

Περισσότερες λεπτομέρειες για την μεθοδολογία καθορισμού του προφίλ των προσφερόμενων υπηρεσιών, του τρόπου οργάνωσης του περιεχομένου στον Τοπικό Εξυπηρετητή, θεμάτων που σχετίζονται με την λειτουργία των προηγμένων εφαρμογών αλλά και την παροχή αυξημένου επιπέδου ποιότητας περιέχονται στα [ST+03] και [CRE9+03].

3.2.6 Γεννήτρια Κίνησης – Αναλυτής Κίνησης (TG-TA)

Ένα από τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την αξιολόγηση της αποδοτικότητας του Δικτύου 4^{ης} Γενιάς και ειδικότερα των συστημάτων DVB-T, ήταν η Γεννήτρια Κίνησης (*Traffic Generator - TG*). Πρόκειται για ένα συνδυασμό λογισμικού και hardware, συμβατού με το σύστημα Linux, με δυνατότητα παραγωγής UDP κίνησης υψηλής ακρίβειας, ως προς τη μορφή (*shape*) και τον χρονισμό που ακολουθείται. Η υλοποίηση πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της [ΛΟ02]. Οι υποστηριζόμενοι τρόποι παραγωγής κίνησης είναι δυο:

- “*Playback*” mode, όπου η ροή UDP δημιουργείται με βάση μια ακολουθία αποθηκευμένων γεγονότων κίνησης, στα οποία περιέχονται πληροφορίες τόσο για το μέγεθος των πακέτων, όσο και για το χρόνο (*inter-arrival time*) μεταξύ των διαδοχικών γεννήσεων τους. Το αρχείο με την αποθηκευμένη ακολουθία γεγονότων, συνήθως είναι αποτέλεσμα επεξεργασίας και μελέτης των χαρακτηριστικών μιας αληθινής ροής δεδομένων, η οποία συνελήφθη με την βοήθεια ειδικών εργαλείων (π.χ. tcprdump [JL+89]).
- “*Parametric*” mode, όπου η ροή UDP γεννιέται με βάση ένα πλήρως παραμετροποιημένο αρχείο, μέσω του οποίου ο χρήστης καθορίζει την μορφή της, με την βοήθεια προκαθορισμένων πιθανοτικών μοντέλων κίνησης.

Η συγκεκριμένη Γεννήτρια Κίνησης υποστηρίζει ως δέκα ανεξάρτητες πηγές μετάδοσης δεδομένων ταυτόχρονα. Ο προσορισμός της κάθε ροής είναι δυνατόν να ρυθμιστεί πριν την παραγωγή των δεδομένων αλλά και να διαφοροποιείται από πηγή σε πηγή. Επίσης σημειώνεται ότι τα υπό

μετάδοση πακέτα είναι κατάλληλα μαριαρισμένα, με αύξοντα αριθμό σειράς (*Sequence Number - SN*), ώστε να είναι δυνατή η μετέπειτα ανάλυση και επεξεργασία της παραγόμενης ροής. Στα πλαίσια της [ΛΟ02] αναπτύχθηκαν και τα κατάλληλα εργαλεία Ανάλυσης Κίνησης (*Traffic Analyzer - TA*) των ροών που παράγονται από τον TG.

Για τους σκοπούς της μελέτης των επιδόσεων του συστήματος, δύο είδη κίνησης χρησιμοποιήθηκαν:

- **Δοκιμαστική Κίνηση χαμηλού ρυθμού (*Low Rate Test Traffic*)**. Πρόκειται για ροές κίνησης, πολύ χαμηλού ρυθμού, που διοχετεύτηκαν σε διάφορα μέρη της υπό μελέτης πλατφόρμας, με σκοπό την παρατήρηση μεγεθών, όπως η καθυστέρηση (*delay*) αλλά και οι απώλειες πακέτων. Η μελέτη και τα αποτελέσματα αφορούσαν την διαδρομή μεταξύ της πηγής της ροής (TG) και του προορισμού της. Η Δοκιμαστική Κίνηση χαμηλού ρυθμού ακολουθεί το κανονικό μοτίβο παραγωγής, δηλαδή ισομεγέθη πακέτα μεταδιδόμενα ανά σταθερό *inter-arrival* χρόνο [PA+98].
- **Κίνηση Παρασκηνίου (*Background Traffic*)**. Πρόκειται για ροές που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία UDP background κίνησης, με σκοπό την προσομοίωση καταστάσεων συμφόρησης στα ασύρματα δίκτυα (*congestion traffic*).

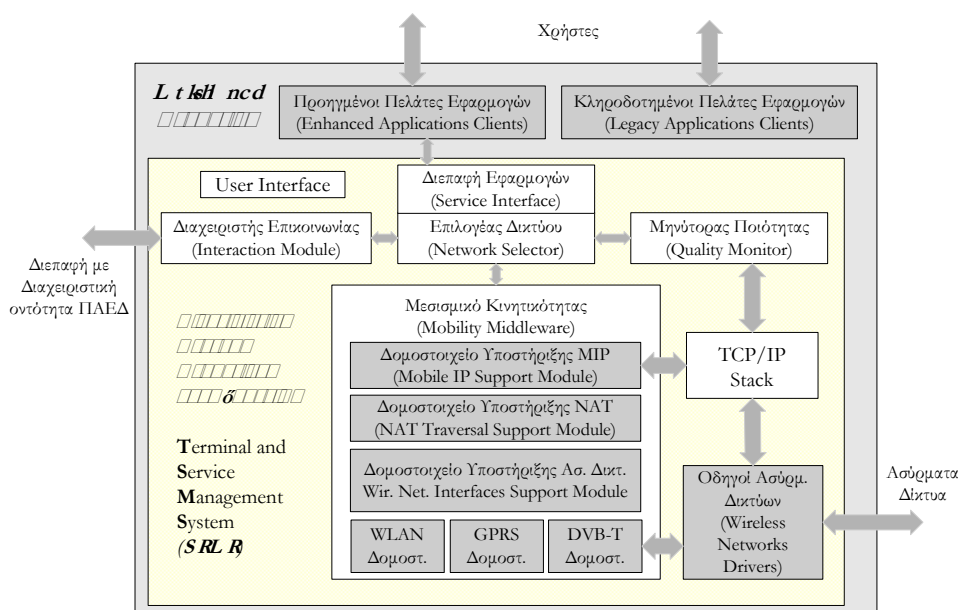
Για την πλήρη κατανόηση του μοντέλου λειτουργίας του TG και TA, ο αναγνώστης παραμπέεται στο [ΛΟ02]

3.3 Πρότυπα Multi-mode Τερματικά

Ακολουθεί η περιγραφή της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής και θεμάτων υλοποίησης των πρότυπων multimode τερματικών. Μέσω της προτεινόμενης υλοποίησης επιτυγχάνεται η πλήρης υποστήριξη των συστημάτων DVB-T. Επίσης σε ξεχωριστή παράγραφο παρουσιάζονται λεπτομέρειες σχετικά με τα μηνύματα που ανταλλάσσονται μέσω της διεπαφής του τερματικού και της διαχειριστικής οντότητας ($G_{\Delta-T}$).

3.3.1 Αρχιτεκτονική Multimode Τερματικού – Βασικές Λειτουργίες

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική με βάση την οποία σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν τα multi-mode τερματικά. Κυρίαρχο ρόλο προς την κατεύθυνση της σωστής λειτουργίας του τερματικού κατέχει το Διαχειριστικό Σύστημα Τερματικού και Υπηρεσιών (*Terminal and Service Management System - TSMS*). Στο Σχήμα 3-14 απεικονίζεται η εσωτερική δομή του τερματικού, τα κύρια δομοστοιχεία (*modules*) του TSMS, καθώς και οι Πελάτες Εφαρμογών (*Application Clients*). Ακολουθούν αμέσως μετά το σχήμα, η περιγραφή των βασικών λειτουργιών του TSMS και των εμπλεκόμενων modules σε αυτές.



Σχήμα 3-14. Αρχιτεκτονική Πρότυπου Multimode Τερματικού

Η TSMS οντότητα είναι υπεύθυνη για τις παρακάτω λειτουργίες:

- Δέχεται αιτήσεις για έναρξη ή διακοπή υπηρεσιών από τον χρήστη. Τα εμπλεκόμενα modules είναι οι Προηγμένοι Πελάτες Εφαρμογών (*Enhanced Application Clients*), η Διεπαφή Υπηρεσιών (*Service Interface*), ο Επιλογέας Δικτύου (*Network Selector*) και ο Διαχειριστής Επικοινωνίας (*Interaction Module*). Μέσω της λειτουργίας αυτής επιτυγχάνεται η ενημέρωση της διαχειριστικής οντότητας, σχετικά με την κατάσταση του τερματικού αλλά και η καθοδήγηση του τελευταίου στην επιλογή του πιο κατάλληλου δικτύου πρόσβασης. Τα μηνύματα που ανταλλάσσονται περιγράφονται στην παράγραφο 3.3.2.
- Διαχειρίζεται θέματα διάθρωσης του δικτύου προσπέλασης (*access network configuration*) καθώς και υποστηρίζει τις απαραίτητες λειτουργίες με στόχο την διενέργεια αποτελεσματικών διασυστηματικών μεταπομπών. Οι οντότητες που εμπλέκονται είναι όλα τα δομοστοιχεία που περιέχονται στο Μεσιμικό Κινητικότητας (*Mobility Middleware*), οι εγγενείς οντότητες υποστήριξης επικοινωνίας μέσω πρωτοκόλλου IP που προσφέρονται από το λειτουργικό σύστημα του τερματικού, καθώς και οι οδηγοί των προσαρμογέων δικτύων (*network adapters*), υπεύθυνοι για την προσπέλαση των διαφορετικών ασύρματων τεχνολογιών. Τονίζεται εδώ ότι το Μεσιμικό Κινητικότητας είναι σε θέση να διατηρεί ενεργές περισσότερες από μια δικτυακές διεπαφές (ή και όλες) κάθε φορά, επιτυγχάνοντας με αυτό τον τρόπο αποδοτικότερες διασυστηματικές μεταπομπές, μέσω της μείωσης του χρόνου διάρκειας του handover. Επιπλέον σημειώνεται ότι τόσο η εξυπηρέτηση των ενεργών εφαρμογών αλλά και η ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ του Διαχειριστή και του τερματικού, πραγματοποιείται μόνο μέσω του επιλεγμένου, κάθε στιγμή, ασύρματου δικτύου. Τέλος επισημαίνεται ο πολύ σημαντικός ρόλος του Μεσιμικό Κινητικότητας στην επιλογή και την διαχείριση του καναλιού διάδρασης στην περίπτωση του DVB-T.

- Παρακολουθεί και επεξεργάζεται στατιστικά στοιχεία, προερχόμενα από όλα τα επίπεδα του πρωτοκόλλου επικοινωνίας του τερματικού, για όλα τα δίκτυα. Μέσω αυτής της λειτουργίας και του ορισμού κατάλληλων κατωφλίων (*thresholds*), επιτυγχάνεται η γένεση *triggering events*, τα οποία οδηγούν στις *terminal-assisted* μεταπομπές, με στόχο πάντα την διατήρηση του επιπέδου ποιότητας στην παροχή των ενεργών υπηρεσιών. Υπεύθυνη οντότητα για αυτή την λειτουργία είναι το δομοστοιχείο *Quality Monitor*.

Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με θέματα υλοποίησης και λειτουργίας του τερματικού μπορούν να αναζητηθούν στα [CRE3+03], [CRE7+03] και [CS03]. Τονίζεται ότι η υλοποίηση των συγκεκριμένων πρότυπων τερματικών συμπεριλάμβανε φορητούς και επιτραπέζιους υπολογιστές, με λειτουργικό σύστημα Linux, εξοπλισμένα με όλων των ειδών προσαρμογείς δικτύων (δηλαδή GPRS, WLAN και DVB-T *network adapters*).

Η επόμενη παράγραφος αφιερώνεται στην περιγραφή των βασικών μηνυμάτων που ανταλλάσσονται μεταξύ του TSMS και της διαχειριστικής οντότητας, στοχεύοντας στην πληρέστερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας τόσο της πειραματικής πλατφόρμας όσο και του τερματικού.

3.3.2 Πρωτόκολλο Συντονισμού Προσπέλασης Δικτύου

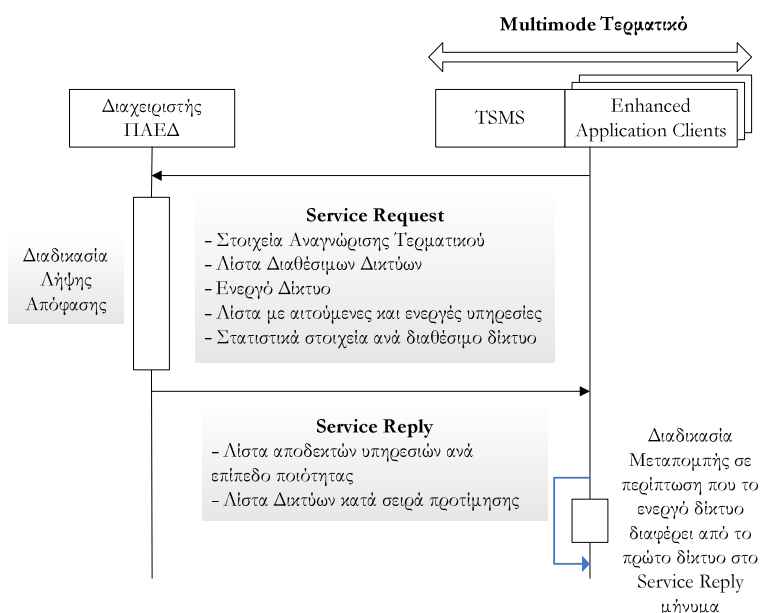
Από την ως τώρα συζήτηση σχετικά με τις διασυστηματικές μεταπομπές έχει γίνει εμφανής η ανάγκη για συνεργασία μεταξύ του Διαχειριστή και του τερματικού στην κατεύθυνση της βελτιστοποίησης τους. Η σημασία του Network-Assisted Mobility σε αυτού του είδους τα περιβάλλοντα είναι σημαντική λόγω της αναγκαιότητας προσδιορισμού του λόγου, της χρονικής στιγμής και του προσορισμού για την πραγματοποίηση βελτιστοποιημένων μεταπομπών. Επιπλέον, η παρουσία των συστημάτων DVB-T περιπλέκει περισσότερο την κατάσταση, αφού εκτός από των άλλων θα πρέπει να προσδιορίζεται κάθε φορά και το κανάλι διάδρασης. Λαμβάνοντας υπόψη την πιο πάνω παρατήρηση, η υλοποίηση ενός νέου πρωτοκόλλου για τον συντονισμό της προσπέλασης των ασύρματων δικτύων από τα *multimode* τερματικά ήταν αναγκαίος. Μέσω λοιπόν του προτεινόμενου Πρωτοκόλλου Συντονισμού Προσπέλασης Δικτύου (*Network Access Co-ordination Protocol – NACP*) επιτρέπεται από την πλευρά του διαχειριστή δικτύου η καθοδήγηση (ή σε διαφορετικές συνθήκες η επιβολή) του τερματικού στην επιλογή της καλλίτερης ασύρματης τεχνολογίας κάθε φορά. Το πρωτόκολλο αυτό βοηθά στην ανταλλαγή των απαραίτητων εκείνων πληροφοριών μεταξύ του τερματικού και του διαχειριστή του δικτύου με στόχο την επίτευξη σκοπών, όπως η βέλτιστη χρήση των προσφερόμενων δικτυακών πόρων, προσφορά καλλίτερου επιπέδου υπηρεσιών, υλοποίηση συγκεκριμένων πολιτικών διαχείρισης των δικτύων κ.α. Επισημαίνεται εδώ ότι η εισαγωγή του NACP δεν επηρεάζει τους υποκείμενους μηχανισμούς κινητικότητας, αφού δρα συμπληρωματικά και όχι μόνο επιτρέπει την παράλληλη εξέλιξη τους, αλλά προσβλέπει στην βελτίωση τους.

Το NACP που υλοποιήθηκε στα πλαίσια του πειραματικού Δικτύου 4^{ης} Γενιάς, του οποίου τα βασικά μηνύματα περιγράφονται αμέσως μετά, ακολουθεί την λογική του MIP σε ότι αφορά την δομή και τεχνολογία υλοποίησης των μηνυμάτων (UDP-based). Οι επιλογές σε σχέση με τον χρόνο ανταλλαγής μηνυμάτων είναι δυο: περιοδικός τρόπος λειτουργίας ή ο ασύγχρονος, δηλαδή γένεση

μηνυμάτων σε περίπτωση διαφοροποίησης της κατάστασης του τερματικού ή των συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή εξυπηρέτησης. Αναλυτική μελέτη σχετικά με τις επιδόσεις και την επεκτασιμότητα του συστήματος σε συνάρτηση με τον προτεινόμενο πρωτόκολλο NACP περιέχονται στα [KS+03] και [SK+04]. Ακολουθεί η παρουσίαση των πιο σημαντικών μηνυμάτων του πρωτοκόλλου.

3.3.2.1 Μήνυμα Αίτησης Υπηρεσίας

Μέσω του συγκεκριμένου μηνύματος (Service Request) το multimode τερματικό απευθύνεται προς τον Διαχειριστή, με σκοπό την καθοδήγηση του στο κατάλληλο δίκτυο. Η πληροφορία σχετικά με το καταλληλότερο δίκτυο επιστρέφει στο τερματικό μέσω του μηνύματος Service Request Reply. Το Σχήμα 3-15 απεικονίζει την ροή ανταλλαγής μηνυμάτων μεταξύ του τερματικού και του Διαχειριστή για την περίπτωση αίτησης νέας υπηρεσίας.



Σχήμα 3-15. Μήνυμα Service Request/Service Reply

Τα πεδία του μηνύματος Service Request περιέχουν τις εξής πληροφορίες:

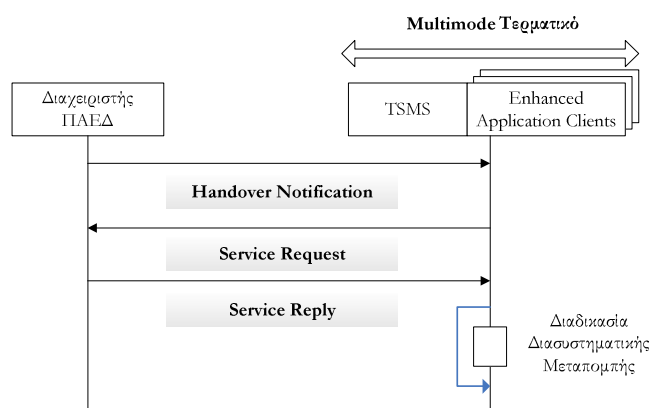
- **Στοιχεία Αναγνώρισης του Τερματικού**: Πρόκειται για δεδομένα όπως η Home Address του τερματικού αλλά και επιπλέον στοιχεία για την πιστοποίηση του χρήστη.
- **Λίστα Διαθέσιμων Δικτύων**: Αναγράφονται οι τύποι των ασύρματων τεχνολογιών με τις οποίες το τερματικό δύναται να προσπελάσει το δίκτυο.
- **Ενεργό Δίκτυο**: Επισημαίνεται πιο από τα προαναφερθέντα διαθέσιμα δίκτυα χρησιμοποιείται τώρα.
- **Λίστα με αιτούμενες και ενεργές υπηρεσίες**: Πρόκειται για την λίστα με τις ήδη ενεργές αλλά και τις αιτούμενες, νέες υπηρεσίες από την μεριά του τερματικού. Η διαχειριστική οντότητα ενημερώνεται για την διακοπή μιας υπηρεσίας έμμεσα, δηλαδή μέσω της μη περίληψης της στην λίστα.

- **Στατιστικά Στοιχεία ανά διαθέσιμο δίκτυο** : Πρόκειται για πληροφορίες σχετικές με την ποιοτική κατάσταση των συνδέσεων των διαθέσιμων ασύρματων δικτύων. Στην παρούσα έκδοση του συστήματος τα στοιχεία αυτά περιορίζονται στις τιμές της ισχύος του σήματος, του θορύβου και των αναγνωριστικών των σημείων πρόσβασης (π.χ. Access Point ή GPRS cell identifiers) για όλα τα δίκτυα.

Μετά την έλευση του μηνύματος Service Request, ο Διαχειριστής θα αποστείλει στο τερματικό, μέσω του Service Request Reply, την λίστα με τις αποδεκτές υπηρεσίες καθώς και το επίπεδο ποιότητας που τελικά αυτές θα είναι διαθέσιμες προς τον χρήστη (low ή high). Το περιεχόμενο του μηνύματος Service Request Reply είναι αποτέλεσμα της εσωτερικής λειτουργία του Διαχειριστή, όπως αυτή παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.2.1. Επιπροσθέτως, το πρώτο μέλος της λίστα των δικτύων, η οποία επίσης περιέχεται στο μήνυμα Service Request Reply, χρησιμοποιείται από το τερματικό ως το καταλληλότερο δίκτυο, ώστε να επιτευχθεί το υψηλότερο επίπεδο ποιότητας. Τα υπόλοιπα δίκτυα (όταν αυτά είναι παρόντα στην λίστα) χρησιμοποιούνται από το TSMS ως λύσεις έκτακτης ανάγκης (π.χ. σε περίπτωση απότομης απομάκρυνσης από την περιοχή ραδιοκάλυψης του ενεργού δικτύου). Σημειώνεται τέλος ότι αν το πρώτο μέλος της λίστας των προτεινόμενων δικτύων διαφέρει από το ενεργό δίκτυο του τερματικού, τότε πραγματοποιείται διασυστηματική μεταπομπή. Ειδικότερα για την περίπτωση των συστημάτων DVB-T, η λίστα των προτεινόμενων δικτύων εμπεριέχει και την ένδειξη για το καταλληλότερο κανάλι διάδρασης.

3.3.2.2 Μήνυμα Ειδοποίησης Απαιτούμενης Μεταπομπής

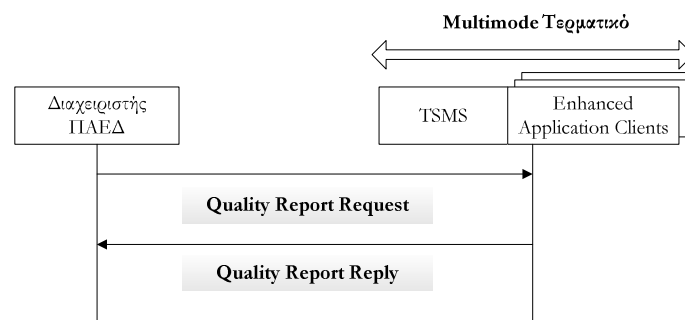
Το δεύτερο είδος μηνυμάτων αφορά την περίπτωση κατά την οποία ο Διαχειριστής του ΠΑΕΔ αποφασίζει να μετακινήσει κάποια από τα τερματικά σε διαφορετικό δίκτυο (π.χ. για την αντιμετώπιση καταστάσεων συμφόρησης). Όπως και στο Σχήμα 3-16 απεικονίζεται αφού σταλεί το Μήνυμα Ειδοποίησης Απαιτούμενης Μεταπομπής (*Handover Required Notification Message*) προς το τερματικό, ξεκινάει ένα κύκλος μηνυμάτων τύπου Service Request/Service Request Reply, με αποτέλεσμα την ενημέρωση του τελευταίου για το νέο καταλληλότερο δίκτυο.



Σχήμα 3-16. Μήνυμα Handover Required Notification

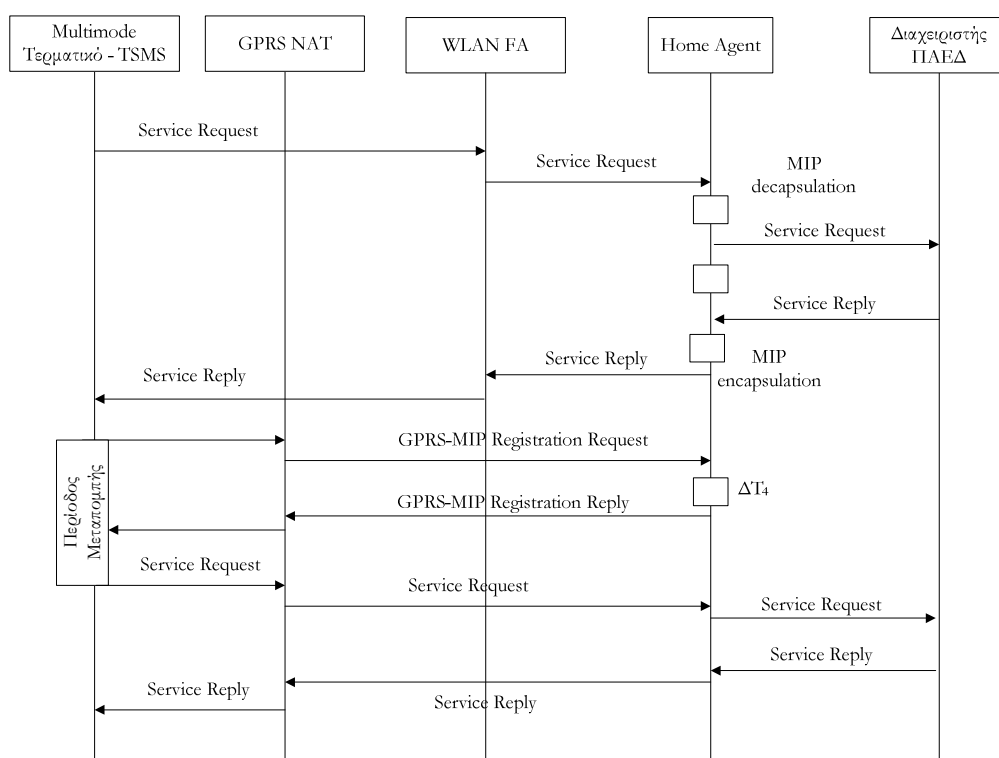
3.3.2.3 Μήνυμα Αίτησης Αναφοράς Ποιότητας

Μέσω του συγκεκριμένου μηνύματος ο Διαχειριστής απευθύνεται προς το multimode τερματικό, στην περίπτωση που παρατηρηθεί υπερφόρτωση του δικτύου και το επίπεδο ποιότητας των λαμβανομένων υπηρεσιών δεν ανταποκρίνεται στο αναμενόμενο. Μέσω της χρήσης του μηνύματος Quality Report Request και της απάντησης του τερματικού (*Quality Report Reply*), αποστέλλονται στατιστικά δεδομένα σχετικά με την κατάσταση των δικτύων (π.χ. ισχύς σήματος και θορύβου κ.α.) αλλά και των ενεργών εφαρμογών (π.χ. ρυθμός πλαισίων βίντεο). Επιπλέον, ο Διαχειριστής συλλέγει συγκεντρωτικά δεδομένα για την κατάσταση της περιοχής εξυπηρέτησης αλλά έχει και την δυνατότητα να επιταχύνει την μεταπομπή για ένα υποσύνολο τερματικών, σε καταστάσεις συμφόρησης, απώλειας ραδιοκάλυψης ή άλλων ειδικών συνθηκών, σε σχέση με την περιοδική ανταλλαγή μηνυμάτων του τύπου Service Request/Service Request Reply. Επιπλέον προλαμβάνεται και τυχόν περίπτωση καθυστερημένης αντίδρασης των οντοτήτων (TMA) που παρακολουθούν την κατάσταση των δικτύων. Στο Σχήμα 3-17 απεικονίζεται η ακολουθία των μηνυμάτων Quality Report και Quality Report Reply.



Σχήμα 3-17. Μήνυμα Quality Report

Στην συνέχεια, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της συμπληρωματικής λειτουργίας του NACP με το MIP, παρουσιάζονται όλα τα μηνύματα των δυο πρωτοκόλλων, στο σενάριο μεταπομπής από το δίκτυο WLAN στο δίκτυο GPRS, ως αποτέλεσμα της διαδικασίας Service Request / Service Request Reply.



Σχήμα 3-18. Μηνύματα NACP και MIP κατά την διάρκεια μεταπομπής από WLAN σε GPRS. Τέλος αναφέρεται ο τίτλος του Service Contract Information Request/ Reply μηνύματος, το οποίο χρησιμεύει στην λειτουργία πιστοποίησης των χρηστών, κατά την διάρκεια της πρώτης επαφής τους με τον Διαχειριστή.

Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την υλοποίηση των μηνυμάτων του πρωτοκόλλου NACP, μπορούν να αναζητηθούν στο [CGP03].

3.3.2.4 Λεπτομέρειες Υλοποίησης των Multi-mode Τερματικών

Τα πρότυπα τερματικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων, υλοποιήθηκαν με την χρήση φορητών και επιτραπέζιων υπολογιστών, εξοπλισμένα με network adapters για την προσπέλαση και των τριών δικτύων. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα εξής:

- *TechnoTrend DVB-T* δεκτής για την πρόσβαση στο DVB-T δίκτυο,
- *Orinoco IEEE80.211b* προσαρμογέας για την πρόσβαση στο WLAN 802.11b δίκτυο,
- *Motorola TimePort GPRS* κινητό τηλέφωνο, κλάσης 4/1, προσβάσιμο μέσω USB καλωδίου για την πρόσβαση στο GPRS δίκτυο.

Τα πρότυπα τερματικά χρησιμοποιούν λειτουργικό σύστημα Linux, στο οποίο πραγματοποιήθηκε και η ανάπτυξη του λογισμικού TSMS και των Enhanced Applications Clients. Τα υποστηριζόμενα mode λειτουργίας του τερματικού αναγράφονται στο παρακάτω πίνακα. (*U-uplink, D-downlink*)

| Mode Λειτουργίας | GPRS | WLAN | DVB-T |
|------------------|------|------|-------|
| GPRS | U/D | ✗ | ✗ |
| WLAN | ✗ | U/D | ✗ |
| DVB-T/WLAN | ✗ | U | D |
| DVB-T/GPRS | U | ✗ | D |

Πίνακας 3-6. Mode λειτουργίας πρότυπου multi-mode τερματικού

Περισσότερες στοιχεία για την υλοποίηση του τερματικού μπορούν να αναζητηθούν στο [CRE7+03].

3.4 Συμπεράσματα - Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο που μόλις παρουσιάστηκε, πραγματοποιήθηκε μια αναλυτική παρουσίαση της αρχιτεκτονικής σε επίπεδο δικτυακών στοιχείων, των λειτουργικών απαιτήσεων της πλατφόρμας του πειραματικού Δικτύου 4^{ης} Γενιάς (ΠΑΕΔ) και των πρότυπων multi-mode τερματικών. Η υλοποίηση που επιτεύχθηκε αποτελεί μια παγκόσμια πρωτοτυπία και τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο είναι μοναδικά. Επιπλέον για πρώτη φορά ένα σύστημα DVB-T ενσωματώνεται πλήρως σε ένα Δίκτυο 4^{ης} Γενιάς και δρα συμπληρωματικά μαζί με τις άλλες ασύρματες τεχνολογίες στον τομέα της παροχής υπηρεσιών IP. Οι επεμβάσεις που κρίθηκαν απαραίτητες στην πορεία ενσωμάτωσης των συστημάτων DVB-T, αφορούσαν τους εξής τομείς :

- Διασύνδεση της λειτουργίας της Μεσιτείας Πόρων, όπως αυτή κληρονομήθηκε από προηγούμενα ερευνητικά έργα, με την λειτουργία της παρακολούθησης και ανάλυσης του επιπέδου των διαθέσιμων πόρων στο σύστημα DVB-T (*DVB-T Traffic Monitor and Analyzer - TMA*).
- Επίλυση των θεμάτων συνδεσιμότητας και διευθυνσιοδότησης για το σύστημα DVB-T μέσω της κατάλληλης ρύθμισης των δρομολογητών της πλατφόρμας.
- Επιπλέον, διαχείριση της κινητικότητας των χρηστών από και προς το σύστημα DVB-T μέσω της αναβάθμιση του MIPv4 (HA και DVB-T FA) και την εισαγωγή ενός νέου Πρωτοκόλλου Συντονισμού Προσπέλασης Δικτύου (*Network Access Co-ordination Protocol – NACP*). Το προτεινόμενο πρωτόκολλο υποστηρίζει και την λειτουργία καθορισμού του καναλιού διάδρασης για την περίπτωση των συστημάτων DVB-T.
- Αναβάθμιση των τερματικών με την διεπαφή DVB-T και ρύθμιση της διαχειριστικής οντότητας του για την υποστήριξη της.

Τα οφέλη που προκύπτουν από την ενσωμάτωση των συστημάτων DVB-T σε Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς, αναλύονται διεξοδικά μέσω πειραμάτων στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

Γενικότερα, η επιτυχία και η κυριάρχηση της ιδέας των συνεργαζόμενων ασύρματων ετερογενών δικτύων (4G) στην προσφορά ολοκληρωμένων υπηρεσιών σε χρήστες με ευφυή multi-mode τερματικά θα εξαρτηθεί από τις εξελίξεις στους εξής τομείς :

- Δημιουργία ολοκληρωμένων συστημάτων διαχείρισης ασύρματων δικτύων, με στόχους όπως :
 - Βέλτιστη χρήση των διαθέσιμων δικτυακών πόρων και αξιοποίηση τους μέσω προσφορών/ανταλλαγών μεταξύ των συνεργαζόμενων δικτύων.
 - Υλοποίηση αποδοτικών αλγορίθμων για την εφαρμογή πολιτικών και στρατηγικών επανακαθορισμού των παραμέτρων λειτουργίας (RRM) των επιμέρους ασυρμάτων δικτύων.
 - Συνολική διαχείριση των θεμάτων του χρήστη, με τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η απλότητα στην προσφορά των υπηρεσιών αλλά και η απόκρυψη όλων των τεχνικών λεπτομερειών.

- Δημιουργία ευφυών, εξελιγμένων multi-mode φορητών τερματικών, ικανά να λειτουργούν σε περιβάλλοντα με πολλαπλά ασύρματα δίκτυα και να συνεργάζονται με τα αντίστοιχα διαχειριστικά συστήματα.
- Επίλυση των θεμάτων που αφορούν την κινητικότητα των τερματικών με την εισαγωγή του πρωτοκόλλου IPv6, αλλά και μηχανισμών, υπεύθυνων για την προετοιμασία και την πραγματοποίηση όλων των ειδών των μεταπομπών που είναι πιθανόν να συμβούν, κατά τρόπο βέλτιστο. Σημαντικό ρόλο προς την κατεύθυνση αυτή θα διαδραματίσει η σύγκλιση των διαφορετικών ασύρματων δικτύων και η ενοποίηση τους μέσω του πρωτοκόλλου IP.
- Εξέλιξη των «παραδοσιακών» εφαρμογών, ώστε να εκμεταλλευτούν τις νέες δυνατότητες που τους προσφέρονται. Η υψηλή μεταβλητότητα της κατάστασης του υποκείμενου ασύρματου περιβάλλοντος, σε συνδυασμό με τις αυξανόμενες απαιτήσεις του χρήστη στην παροχή υπηρεσιών, επιβάλλουν την αναβάθμιση των υπαρχόντων μονολιθικών εφαρμογών, σε έξυπνες εφαρμογές, ικανές να «διαισθάνονται» τις μεταβολές και να προσαρμόζουν την λειτουργία τους.

Η πειραματική πλατφόρμα που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο αυτό αποτελεί ουσιαστικά την πρώτη προσπάθεια υλοποίησης ενός ολοκληρωμένου περιβάλλοντος συνεργαζόμενων ετερογενών ασύρματων δικτύων, όπου συμπεριλαμβάνονται και συστήματα DVB-T, οριοθετώντας απαιτήσεις, προβλήματα και λύσεις που σχετίζονται με θέματα που απορρέουν από την πραγματοποίηση ενός τέτοιου εγχειρήματος.

4 Πειραματική αξιολόγηση των ωφελειών που προκύπτουν μέσω της ενσωμάτωση των συστημάτων DVB-T σε Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς.

4.1 Εισαγωγή

Στην συνέχεια της διδακτορικής διατριβής πραγματοποιείται μια συνολική αξιολόγηση του Δικτύου 4^{ης} Γενιάς (ΠΑΕΔ) μετά την ενσωμάτωση και των συστημάτων DVB-T, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3. Η πειραματική επαλήθευση της αποδοτικότητας του στηρίζεται σε δυο μεγάλες κατηγορίες πειραματικών μετρήσεων:

- **Μέρη Αξιολόγησης Επίπεδο Συστήματος (System Plane Evaluation):** Στην κατηγορία αυτή ανήκουν μετρήσεις αξιολόγησης των επιμέρους ασύρματων δικτύων συμπεριλαμβανομένου και του DVB-T, σε σχέση με την αποτελεσματικότητά τους στην παροχή υπηρεσιών IP. Με δεδομένη την χωρητικότητα ($C_{network}$) που προσφέρει η κάθε ασύρματη τεχνολογία, η οποία καθορίζεται από τις προδιαγραφές της και του best-effort τρόπου λειτουργίας, η προσοχή επικεντρώνεται στις μετρικές της Καθυστέρησης Πλήρους Διαδρομής (Round Trip Delay – RTD), ιδιαίτερα σημαντική στην παροχή υπηρεσιών TCP-based (π.χ. web-browsing) και στην μετρική της Μονόδρομης Καθυστέρησης (One Way Delay – OWD), σημαντική στην παροχή υπηρεσιών UDP-based (π.χ. υπηρεσία βιντεοροής). Τα αποτελέσματα που παρατίθενται αφορούν όλα τα πιθανά mode λειτουργίας του ευφυούς τερματικού και στηρίχθηκαν στην χρησιμοποίηση του εργαλείου ring [JL+89] για την μετρική του RTD και των υποδομών του TG και TA για την μετρική του OWD. Οι μετρήσεις που θα παρουσιαστούν πραγματοποιήθηκαν για κυκλοφοριακά φορτία μικρότερα από την συνολική χωρητικότητας του κάθε δικτύου. Σκοπός τους είναι η αξιολόγηση των επιλεγμένων ασύρματων τεχνολογιών σε σχέση με τις απαιτήσεις των υπηρεσιών που προδιαγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας αλλά και η πιστοποίηση της βελτίωσης που επιφέρει η ενσωμάτωση του συστήματος DVB-T. Τα μεγέθη RTD και OWD που προέκυψαν, αποτελούν μια εκτίμηση της τάξης μεγέθους της καθυστέρησης ανά δίκτυο και αναφέρονται στην κατάσταση όπου συνολική κίνηση ($T_{network}$) δεν ξεπερνά την χωρητικότητά τους. Όπως είναι αναμενόμενο, στις συνθήκες κανονικής λειτουργίας ($T_{network} \leq a * C_{network}$, με $a < 1$), οι τιμές των RTD και OWD δεν αναμένεται να μεταβληθούν σημαντικά από αυτές που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο, ενώ για την περίπτωση υπερβολικού φορτίου ($T_{network} > C_{network}$), θα αυξηθούν σε βαθμό που δεν θα είναι δυνατή η παροχή υπηρεσιών με αυστηρές απαιτήσεις ως προς την χωρητικότητα και την καθυστέρηση. Δεδομένου όμως της παρουσίας του Διαχειριστή του Δικτύου 4^{ης} Γενιάς (ή Διαχειριστή ΠΑΕΔ), οι καταστάσεις συμφόρησης προλαμβάνονται μέσω της ανακατανομής του επιπλέον φορτίου στα υπόλοιπα δίκτυα (αντικείμενο σεναρίων δεύτερης

κατηγορίας). Η ακριβής μεθοδολογία για τον προσδιορισμό του επιπέδου κίνησης ανά δικτυακό στοιχείο (π.χ. κυψέλη DVB-T ή GPRS, WLAN AP κτλ.) και των συνθηκών για την ανίχνευση των καταστάσεων συμφόρησης, παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3. Η παρούσα διδακτορική διατριβή δεν είχε σκοπό την ανάπτυξη νέων αναλυτικών μοντέλων για την αξιολόγηση των δικτύων σε καταστάσεις υπερβολικής κίνησης, αφού ο κύριος στόχος της είναι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση περιβαλλόντων ενοποιημένης λειτουργίας τους. Επιπλέον, η απουσία μηχανισμών διασφάλισης ενός ελαχίστου επιπέδου ποιότητας ανά χρήστη, σε όλα τα δίκτυα (best-effort τρόπος λειτουργίας), θα οδηγούσε στην υποβάθμιση των παρεχόμενων υπηρεσιών στην περίπτωση υπερφόρτωσης τους, ιδιαίτερα για την υπηρεσίας βιντεοροής. Όπως θα προκύψει και από την ανάλυση που πραγματοποιείται στις παραγράφους που ακολουθούν, οι επιδόσεις των υπό εξέταση δικτύων, στις συνθήκες κανονικής λειτουργίας, παραμένουν σταθερές, άρα και οι τιμές των OWD και RTD κινούνται στα όρια των τιμών που παρατίθενται στο παρόν κεφάλαιο. Καταλήγοντας, στην ίδια κατηγορία πειραματικών μετρήσεων ανήκουν και αυτές που αφιερώθηκαν για την αξιολόγηση του μηχανισμού διασυστηματικών μεταπομπών για όλες τις περιπτώσεις των δικτύων που εναλλάσσονται και ιδιαίτερα για τις περιπτώσεις όπου συμμετέχουν και τα συστήματα DVB-T. Τα φαινόμενα που εμφανίζονται κατά την διάρκεια των μεταβάσεων του τερματικού, οδηγούν σε μια σειρά συμπερασμάτων με πολύ μεγάλο ενδιαφέρον.

- ***Ρεαλιστικά Σενάρια Λειτουργίας - Operational scenarios. Αξιολόγηση Επιδόσεων σε Επίπεδο Χρήστη (User Plane Evaluation)*** : Η αποδοτικότητα της υπό εξέτασης πειραματικής πλατφόρμας επαληθεύτηκε και με την πραγματοποίηση ρεαλιστικών σεναρίων λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκε η βελτίωση που επιφέρει η ενσωμάτωση του συστήματος DVB-T στις περιπτώσεις αντιμετώπισης καταστάσεων συμφόρησης και προβληματικής ραδιοκάλυψης. Μέσω των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την διεξαγωγή των ρεαλιστικών σεναρίων λειτουργίας αποδείχθηκε η χρησιμότητα και η αποτελεσματικότητα της ιδέας των συνεργαζόμενων ασύρματων δικτύων αλλά και η αξία των συστημάτων DVB-T. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.3, αφορούν μια πληθώρα περιπτώσεων και καταδεικνύουν τόσο την βελτίωση του επιπέδου ποιότητας των παρεχομένων υπηρεσιών στην πλευρά του χρήστη αλλά και την αποτελεσματική αξιοποίηση των δικτυακών πόρων από την πλευρά των Network Providers.

Τέλος, η παράγραφος 4.4 παρουσιάζει την ανακεφαλαίωση και τα συμπεράσματα.

4.2 Μετρήσεις Αξιολόγησης Επιδόσεων Δικτύου 4^{ης} Γενιάς σε Επίπεδο Συστήματος

Πριν την πραγματοποίηση σεναρίων ρεαλιστικής λειτουργίας, κρίθηκε αναγκαία μια σειρά από μετρήσεις με στόχο την ποιοτική αξιολόγηση των επιδόσεων του ΠΑΕΔ. Σκοπός των μετρήσεων αυτών είναι η διαπίστωση της συμβατότητας των χρησιμοποιούμενων δικτύων, σε σχέση με τις απαιτήσεις των προσφερόμενων εφαρμογών και ιδιαίτερα της Υπηρεσίας Ροής Video (VSS). Οι μετρήσεις επικεντρώνονται στον υπολογισμό της καθυστέρησης μετάδοσης των δεδομένων (πλήρους και μονόδρομης διαδρομής), για όλες τις περιπτώσεις δρομολόγησης τους. Δεδομένου ότι η μέγιστη χωρητικότητα των ασύρματων δικτύων που χρησιμοποιήθηκαν καθορίζεται από τις προδιαγραφές λειτουργίας τους αλλά και ότι παρέχουν υπηρεσίες *best-effort* (χωρίς δηλαδή εγγυημένο επίπεδο ποιότητας), η γνώση των τυπικών τιμών καθυστέρησης (*delay*) που υπεισέρχονται στα διάφορα σημεία της διαδρομής των δεδομένων προς τους χρήστες, αποτελεί ένα πολύ σημαντικό μέτρο για την αξιολόγηση του πειραματικού ΠΑΕΔ. Οι μετρήσεις αφορούν όλα τα ασύρματα δίκτυα και πραγματοποιούνται για διαφορετικές καταστάσεις κυκλοφοριακού φορτίου, μέσα στα όρια της μέγιστης χωρητικότητας τους. Η παράγραφο που ακολουθεί, οριοθετεί την έννοια «κανονικές συνθήκες» λειτουργίας, μέσω του καθορισμού των τιμών των συντελεστών χρησιμοποίησης για κάθε δίκτυο, όπως αυτοί ορίστηκαν στο Κεφάλαιο 4, για την ανίχνευση των καταστάσεων συμφόρησης. Έπειτα ακολουθούν τα αποτελέσματα με τις μετρήσεις για τις καθυστερήσεις RTD και OWD, ενώ στην παράγραφο 4.2.3.4 παρουσιάζονται οι μετρήσεις σχετικά με την αποτελεσματικότητα των διασυστηματικών μεταπομπών (*delay* και απώλειες δεδομένων), για όλες τις δυνατές περιπτώσεις.

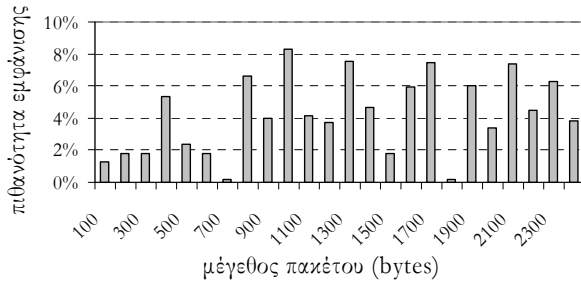
4.2.1 Κανονικές Συνθήκες Λειτουργίας – Ορισμός Συντελεστών Χρησιμοποίησης

Όπως έχει καταστεί σαφές τα δίκτυα που χρησιμοποιήθηκαν, προσφέρουν υπηρεσίες του τύπου *best-effort*. Ο καθορισμός των συνθηκών «κανονικής λειτουργίας» ανά δίκτυο, έγκειται στον προσδιορισμό των ορίων της κυκλοφοριακής κίνησης, για την οποία οι επιδόσεις των δικτύων, παραμένουν σταθερές και συμβατές με τις προσφερόμενες υπηρεσίες. Με βάση αυτά τα όρια, ο Διαχειριστής ΠΑΕΔ θα είναι σε θέση να ανιχνεύει τις καταστάσεις συμφόρησης και να προχωρεί σε αναδιανομή των χρηστών, ανάμεσα στα εναλλακτικά δίκτυα. Ακολουθεί ο καθορισμός των συνθηκών αυτών ανά δίκτυο.

▪ Πρίπτωση IEEE 802.11b WLAN

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την μέγιστη δυνατή χωρητικότητα ανά AP, αναλύθηκαν στην παράγραφο 4.2.2.1. Στόχος είναι ο προσδιορισμός μιας ρεαλιστικής τιμής του παράγοντα F , η οποία θα καλύπτει τις περισσότερες δυνατές περιπτώσεις συνθηκών λειτουργίας. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήσαμε το αναλυτικό μοντέλο των [VL02], με στόχο τον υπολογισμό της

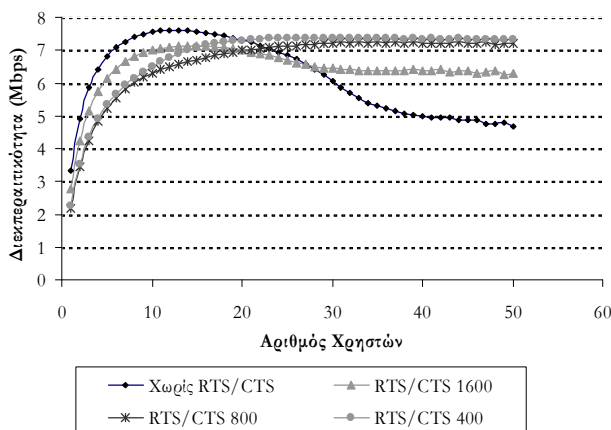
μέγιστης δυνατής χωρητικότητας, σε σχέση με τον αριθμό των χρηστών, τα επίπεδα ραδιοκάλυψης αλλά και την εφαρμογή ή όχι του σχήματος της μετάδοσης με θετική επιβεβαίωση (RTS/CTS). Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4-1), δίνονται το διάγραμμα της τυχαίας κατανομής πιθανότητας του μεγέθους των πακέτων και οι παράμετροι λειτουργίας του δικτύου IEEE 802.11b, κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.



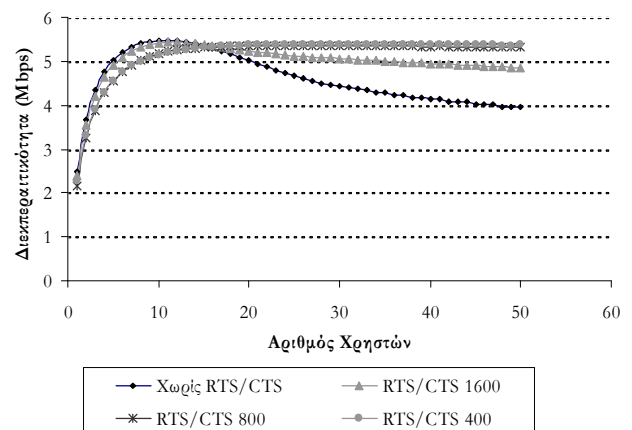
| Παράμετροι Λειτουργίας πρωτοκόλλου IEEE 802.11b | |
|---|--|
| Slot time, σ 20 μs | Propagation time, δ 1 μs |
| MAC+PHY Header 49 bytes | Length of ACK and CTS 29 bytes |
| Header transfer time, H 121 μs | ACK transfer time, t_{ACK} 106 μs |
| RTS length 35 bytes | RTS transfer time, t_{RTS} 111 μs |
| SIFS 10 μs | DIFS 50 μs |
| EIFS 212 μs | C_{AP}^{max} 11 Mbps |
| Short retry limit, N_s 7 | Long retry limit, N_l 4 |
| Minimal contention window, W_0 32 | Maximal contention window, W_m 1024 |

Σχήμα 4-1. Κατανομή πιθανότητας μεγέθους πακέτων και παράμετροι λειτουργίας κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.

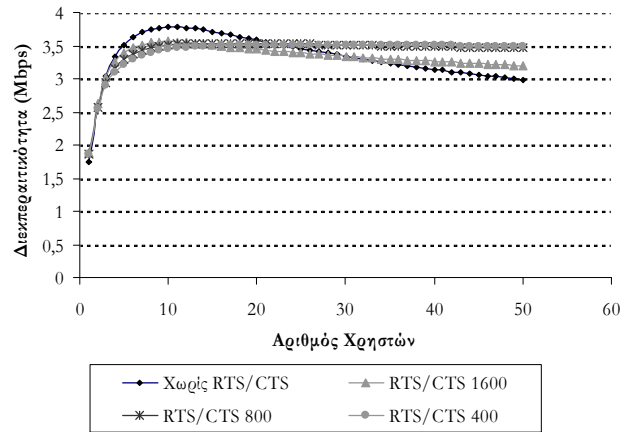
Η προσομοίωση, πραγματοποιήθηκε με την προϋπόθεση ότι τα τερματικά, διέθεταν συνεχώς δεδομένα για μετάδοση. Τα αποτελέσματα που ακολουθούν, παρουσιάζουν την τιμή της μέγιστης δυνατής χωρητικότητας για διάφορες περιπτώσεις Bit Error Rate (BER), σε σχέση με τον αριθμό των χρηστών και την εφαρμογή ή όχι του σχήματος της μετάδοσης με θετική επιβεβαίωση (RTS/CTS). Ο παράγοντας BER συνδέεται άμεσα με το επίπεδο σήματος στην πλευρά του τερματικού.



(1) Ιδανικές συνθήκες κάλυψης (BER $8 \cdot 10^{-6}$)

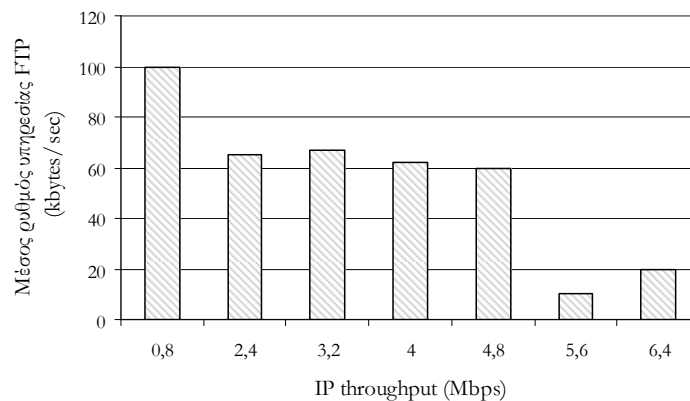


(2) Καλές συνθήκες κάλυψης (BER $1,6 \cdot 10^{-5}$)

(3) Μέτριες συνθήκες κάλυψης ($BER 6,4 \cdot 10^{-5}$)

Σχήμα 4-2. Υπολογισμός μέγιστης δυνατής χωρητικότητας ανά WLAN AP, σε διαφορετικές συνθήκες, με την χρήση προσομοίωσης.

Με βάση τα πιο πάνω αποτελέσματα, ως κανονικές συνθήκες λειτουργίας για το δίκτυο WLAN, ορίζονται οι συνθήκες που προκύπτουν για την δεύτερη περίπτωση με μέγιστο αριθμό χρηστών γύρω στους δέκα. Η τιμή του παράγοντα F για τις πιο πάνω συνθήκες, είναι ίση περίπου με 0,48. Επομένως, σύμφωνα με την σχέση $C_{AP} = F * C_{AP}^{max}$, η μέγιστη δυνατή χωρητικότητα, είναι ίση με 5,33 Mbps, ενώ ο συντελεστής W_a ορίζεται ίσος με 0,8. Η συνθήκη, η οποία σηματοδοτεί την έναρξη περιόδου κυκλοφοριακής συμφόρησης διαμορφώνεται ως εξής : $IP_{Throughput} \geq 4,6 Mbps$. Πράγματι, κατά την διάρκεια ενός ftp σε ένα αληθινό τερματικό, ο μέσος ρυθμός μεταφοράς των δεδομένων παραμένει σταθερός ως και για τιμή $IP_{Throughput}$ 4,8 Mbps, ενώ για μεγαλύτερες τιμές ο ρυθμός ελαττώνεται δραματικά.

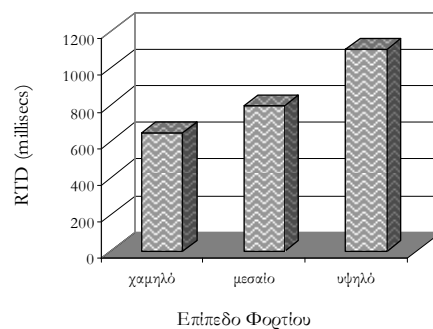


Σχήμα 4-3 . Μεταβολή ρυθμού υπηρεσίας FTP, σε σχέση με το επίπεδο του κυκλοφοριακού φορτίου στο AP

Οι τιμές RTD και OWD, που παρουσιάζονται για το δίκτυο WLAN στην συνέχεια, αφορούν τις πιο πάνω συνθήκες λειτουργίας.

- **Περίπτωση δικτύου GPRS**

Οι διαθέσιμες χρονοθυρίδες στο φορητό micro-BTS, της πειραματικής πλατφόρμας είναι 8. Το σχήμα κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται είναι το CS-2 (βλέπε πίνακα 3.2, Κεφαλαίου 3), με αποτέλεσμα η μέγιστη χωρητικότητα, σύμφωνα με την σχέση $C_{GPRS}^{\max} = TS_{Total} * TS_{capacity}^{\max}$, να υπολογίζεται στα επίπεδα των 107,2 Kbps. Υπενθυμίζεται ότι τα τερατικά που χρησιμοποιήθηκαν, στην διάρκεια των πειραμάτων, είχαν την δυνατότητα κατάληψης ως και 4 χρονοθυρίδες στην κατεύθυνση λήψης των δεδομένων (downlink). Η τιμή του παράγοντα G_d , τίθεται ίση με 0,2, με αποτέλεσμα η συνθήκη, η οποία σηματοδοτεί την έναρξη περιόδου κυκλοφοριακής συμφόρησης, για την περίπτωση του δικτύου GPRS, να διαμορφώνεται ως εξής : $GPRS_{avail.capacity} \leq 21,44Kbps$. Πράγματι, κατά την διάρκεια πειραμάτων με την χρήση ενός (χαμηλό φορτίο), δύο (μεσαίο φορτίο) και τριών (υψηλό φορτίο) τερατικών GPRS, με ενεργές υπηρεσίες του τύπου ftp (άρα χρήση και των τεσσάρων διαθέσιμων χρονοθυρίδων), η μετρική RTD αυξάνεται σταδιακά, ως και επίπεδα παραπάνω του ενός δευτερολέπτου. Τονίζεται ότι οι συνθήκες ραδιοκάλυψης σε όλη την διάρκεια των πειραμάτων ήταν καλές (ισχύς σήματος > -85dBm).



Σχήμα 4-4 Μεταβολή GPRS RTD σε σχέση με το φορτίο της κυψέλης

Αναλυτικότερα αποτελέσματα για τις τιμές RTD και OWD, σε σχέση με το δίκτυο GPRS, για τις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας παρουσιάζονται στην συνέχεια του κεφαλαίου.

■ Πείραξη δικτύου DVB-T

Οι παράμετροι λειτουργίας, για την περίπτωση του δικτύου DVB-T, ακολουθούσαν το mode 6 του Πίνακα 3.6 (Κεφάλαιο 3), με τιμή T_g ίση με $1/4 T_U$. Η τιμή μέγιστης χωρητικότητας TBR , σύμφωνα με το συγκεκριμένο σετ παραμέτρων λειτουργίας είναι ίση με 9,95Mbps. Μια μοναδική Ομάδα Προγράμματος ορίστηκε για όλους τους χρήστες του ΠΑΕΔ, με χαρακτηριστικά τα οποία δίνονται από την παρακάτω σχέση :

$$Group_1 = [PID, R_1 = 9,95Mbps, O_1 = TBR = 9,95Mbps]$$

Όσο το συνολικό κυκλοφοριακό φορτίο παρέμενε κάτω από το όριο του O_n , ο ρυθμός μεταφοράς των δεδομένων που απολάμβαναν οι χρήστες δεν επηρεαζόταν. Η συνθήκη, η οποία σηματοδοτεί την έναρξη περιόδου κυκλοφοριακής συμφόρησης, για την περίπτωση του δικτύου

DVB-T, ακολουθεί την σχέση : $Group_{avail}^1 \cdot capacity \leq C_{Group}^{min} = 0,5Mbps$. Επιπλέον, οι επιδόσεις του δικτύου σε σχέση με τις μετρικές RTD και OWD, παραμένουν σταθερές για τις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας και συμφωνούν με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην συνέχεια. Έχοντας οριοθετήσει πλήρως τα όρια «κανονικής λειτουργίας» ανά δίκτυο, συνεχίζουμε με την παρουσίαση των αναλυτικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τις μετρικές RTD και OWD, που ισχύουν σε αυτές τις συνθήκες.

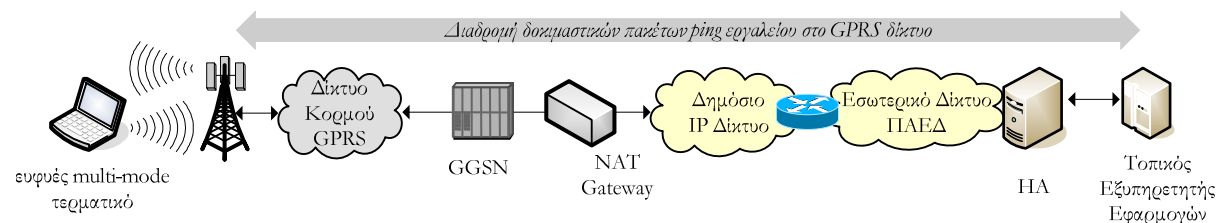
4.2.2 Καθυστέρηση Πλήρους Διαδρομής (Round Trip Delay)

Οι μετρήσεις καθυστέρησης πλήρους διαδρομής (RTD) πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια του στάνταρτ εργαλείου ring. Η ακρίβεια που παρουσιάζει το εργαλείο αυτό είναι της τάξης του 1ms και ικανοποιεί πλήρως τις απαιτήσεις των μετρήσεων RTD, σε σχέση με τις αναμενόμενες τιμές για αυτού του είδους τα δίκτυα, ενώ δεν απαιτεί την ύπαρξη επιπλέον εξοπλισμού για τον συγχρονισμό του χρόνου (π.χ. χρήση Network Time Protocol [MIL92]), αφού οι μετρήσεις λαμβάνονται στον ίδιο κόμβο.

Η μετρική του RTD για τα διάφορα μέρη του ΠΑΕΔ συσχετίζεται άμεσα με το επίπεδο των προσφερόμενων υπηρεσιών και ιδιαίτερα αυτών που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο TCP (π.χ. Web browsing, email, ftp κτλ.). Οι μετρήσεις αφορούσαν όλες τις πιθανές διαδρομές παράδοσης των δεδομένων και συνδέονται άμεσα με τις επιλογές προσπέλασης του δικτύου, που είχαν στην διάθεση τους τα ευφυή τερματικά. Πιο συγκεκριμένα μετρήθηκαν οι τιμές του RTD για την αυτόνομη λειτουργία των δικτύων GPRS και WLAN, καθώς και για την συνδυασμένη χρήση DVB-T με κανάλι διάδρασης είτε το WLAN είτε το GPRS. Σημειώνεται ότι τα δοκιμαστικά πακέτα του εργαλείου ring πραγματοποιούν την διαδρομή από το τερματικό προς τον Τοπικό Εξυπηρετητή Εφαρμογών και επιστρέφουν.

4.2.2.1 Αυτοδύναμη Λειτουργία GPRS

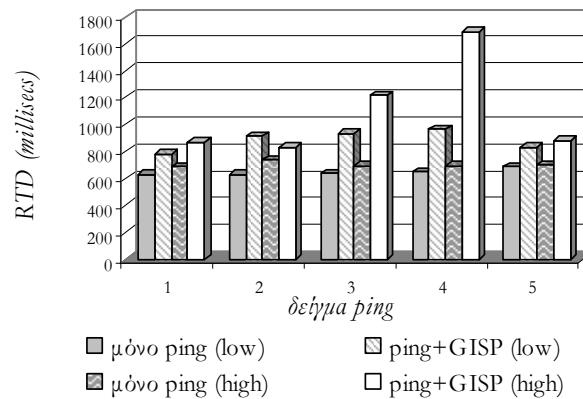
Στο σχήμα που ακολουθεί αναπαρίσταται γραφικά η διαδρομή που ακολουθούν τα δοκιμαστικά πακέτα του εργαλείου ring για την περίπτωση που το ενεργό δίκτυο στην πλευρά του τερματικού είναι το GPRS.



Σχήμα 4-5. Διαδρομή δοκιμαστικών πακέτων εργαλείου ring στο GPRS δίκτυο

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που παρατίθενται στο Σχήμα 4-6, αφορούν την τιμή του RTD για δυο περιπτώσεις κυκλοφοριακής φόρτισης στην κυψέλη GPRS (*low* και *high*), σε συνδυασμό με τον χρήστη να μην έχει άλλες ενεργές υπηρεσίες ή μια υπηρεσία τύπου GISP. Σημειώνεται ότι η

υπηρεσία VSS δεν είναι συμβατή με τις δυνατότητες του δικτύου GPRS και ότι οι διαφορετικές συνθήκες φόρτισης της κυψέλης επιτυγχάνονται με την ύπαρξη (*high*) ή όχι (*low*) άλλων τερματικών με πρόσβαση GPRS μέσω του micro-BTS. Τέλος τονίζεται ότι οι ενδείξεις του οριζόντιου άξονα, οι οποίες χαρακτηρίζονται σαν «δείγμα *ping*», αναφέρονται στον μέσο όρο του RTD, ο οποίος προκύπτει από μια σειρά είκοσι διαδοχικών, ξεχωριστών μετρήσεων (γενόμενες σε κοντινό χρόνο). Η ίδια μεθοδολογία ακολουθείται και για τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στις επόμενες παραγράφους.



Σχήμα 4-6. RTD για αυτοδύναμη λειτουργία GPRS

Ο παρακάτω πίνακας περιγράφει την μέση τιμή (*Mean*) του RTD και τυπική απόκλιση (*Standard Deviation*) ανά περίπτωση.

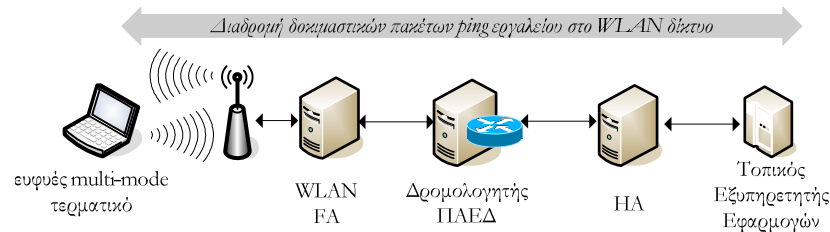
| Περίπτωση / Μέγεθος | μόνο ping (low) | ping + GISP (low) | μόνο ping (high) | ping + GISP (high) |
|-----------------------------------|-----------------|-------------------|------------------|--------------------|
| <i>Mean (msecs)</i> | 645,34 | 882,74 | 699,75 | 1097,5 |
| <i>Standard Deviation (msecs)</i> | 24,82 | 76,55 | 19,92 | 365,18 |

Πίνακας 4-1. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση για αυτοδύναμη λειτουργία GPRS

Παρατηρούμε ότι οι επιδόσεις του δικτύου GPRS, σε συνδυασμό με τις δυνατότητες του τερματικού (4 time-slots στο uplink) είναι αρκετά χαμηλές. Ιδιαίτερα, σε συνθήκες υψηλής κυκλοφοριακής κίνησης, προκαλούμενης από πολλαπλά τερματικά, η τιμή του RTD αυξάνει σημαντικά (σε μερικές περιπτώσεις ξεπερνάει το ένα δευτερόλεπτο) προκαλώντας υποβάθμιση του επιπέδου ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών. Συμπερασματικά, η χαμηλή χωρητικότητα και οι ισχυρές διακυμάνσεις στην τιμή του RTD που εμφανίζονται στο δίκτυο GPRS, το καθιστούν δίκτυο περιορισμένων δυνατοτήτων σε σχέση με τις απαιτήσεις των σύγχρονων πολυμεσικών υπηρεσιών. Στην παράγραφο 4.2.3.1 παρουσιάζονται αποτελέσματα σχετικά με το GPRS OWD στην κατεύθυνση της καθόδου των δεδομένων (downlink). Τέλος τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν, είναι απολύτως συμβατά με τις μετρήσεις και τα συμπεράσματα των [CP02].

4.2.2.2 Αυτοδύναμη Λειτουργία WLAN

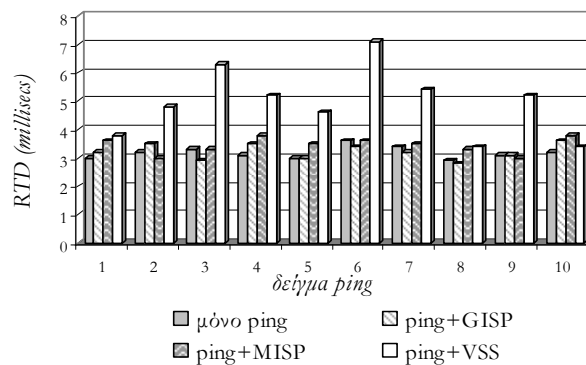
Το Σχήμα 4-7 απεικονίζει την πλήρη διαδρομή των δοκιμαστικών πακέτων ping, όταν το τερματικό χρησιμοποιεί σαν δίκτυο πρόσβασης, το WLAN (IEEE 802.11b).



Σχήμα 4-7. Διαδρομή δοκιμαστικών πακέτων εργαλείου ring στο WLAN δίκτυο

Τονίζεται ότι στην περίπτωση του WLAN υπεισέρονται οι καθυστερήσεις των λειτουργιών του HA αλλά και του FA (*encapsulation/de-capsulation* δεδομένων), ενώ στην περίπτωση του GPRS, την συνολική καθυστέρηση επηρέαζε μόνο ο HA. Το Σχήμα 4-8 και ο Πίνακας 4-2 παρουσιάζουν τις τιμές του RTD για μια σειρά μετρήσεων και την μέση τιμή και τυπική απόκλιση, για τις ίδιο σύνολο δεδομένων, αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα οι μετρήσεις αφορούν τις εξής περιπτώσεις σχετικά με την κατάσταση του τερματικού :

- μόνο ping.
- ping και ενεργή μια υπηρεσία GISP.
- ping και ενεργή μια υπηρεσία MISP.
- ping και ενεργή μια υπηρεσία VSS, με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων περίπου 500Kbps.



Σχήμα 4-8. RTD για αυτοδύναμη λειτουργία WLAN

| Περίπτωση / Μέγεθος | μόνο ping | ping + GISP | ping + MISP | ping + VSS |
|----------------------------|-----------|-------------|-------------|------------|
| Mean (msecs) | 3,18 | 3,22 | 3,44 | 4,92 |
| Standard Deviation (msecs) | 0,21 | 0,27 | 0,29 | 1,20 |

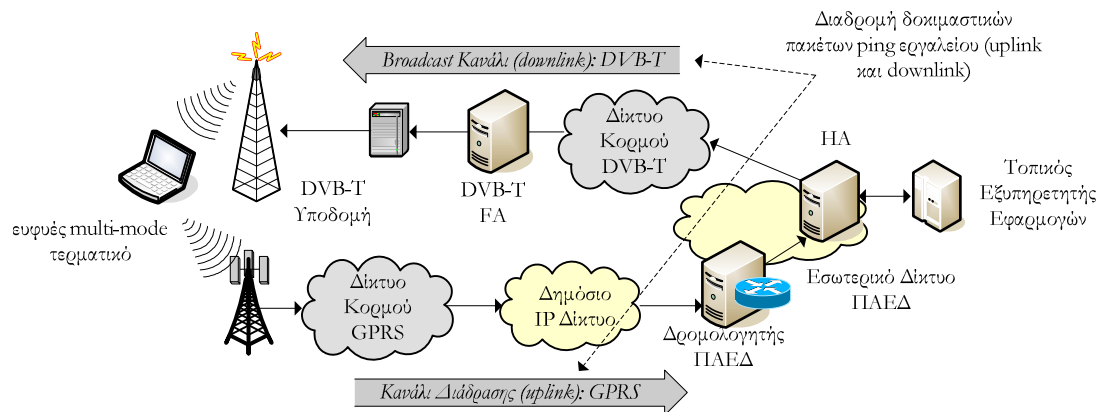
Πίνακας 4-2. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση για αυτοδύναμη λειτουργία WLAN

Η μελέτη των παραπάνω αποτελεσμάτων οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η χρήση του δικτύου WLAN μπορεί να συνδυαστεί με όλα τα ήδη των παρεχόμενων υπηρεσιών (TCP και UDP based), παρέχοντας υψηλό επίπεδο ποιότητας. Σημειώνεται βέβαια ότι στην περίπτωση ενός εμπορικού WLAN δικτύου και Εξωτερικών Εξυπηρετητών Εφαρμογών ή σε συνθήκες μεγαλύτερης

κυκλοφοριακής φόρτισης ($\leq C_{network}$), οι καθυστερήσεις θα ήταν μεγαλύτερες, χωρίς φυσικά όμως να παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις (ίδια τάξη μεγέθους).

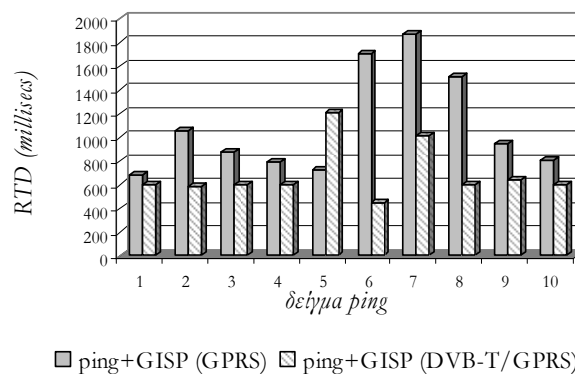
4.2.2.3 Λειτουργία DVB-T/GPRS

Η περίπτωση του DVB-T παρουσιάζει την ιδιαιτερότητα της ύπαρξης δυο εκδοχών για την υλοποίηση του καναλιού διαδραστικότητας (ή καναλιού επιστροφής). Στην παράγραφο αυτή δίδονται αποτελέσματα σχετικά με τον χρόνο RTD, όταν για κανάλι επιστροφής χρησιμοποιείται το δίκτυο GPRS (με συνθήκες χαμηλής φόρτισης). Το Σχήμα 4-9 απεικονίζει την διαδρομή που ακολουθούν τα δοκιμαστικά πακέτα του εργαλείου ping, όταν το τερματικό χρησιμοποιεί τον συνδυασμό δικτύων DVB-T/GPRS.



Σχήμα 4-9. Διαδρομή δοκιμαστικών πακέτων εργαλείου ping στην περίπτωση DVB-T/GPRS

Το Σχήμα 4-10 και ο Πίνακας 4-3 παρουσιάζουν ταυτόχρονα τις τιμές του RTD για την περίπτωση της αυτοδύναμης λειτουργίας του GPRS και για την περίπτωση του DVB-T/GPRS, όταν στο τερματικό υπάρχει μια ενεργή υπηρεσία τύπου GISP. Τονίζεται ότι η μια σειρά αποτελεσμάτων (δηλαδή αυτά που αφορούν το GPRS) δεν σχετίζεται με την σειρά μετρήσεων για το DVB-T/GPRS, αφού πραγματοποιήθηκαν σε κοντινές αλλά διαφορετικές χρονικές στιγμές. Η κοινή παρουσίαση έγινε καθαρά για λόγους σύγκρισης. Τα συμπεράσματα ακολουθούν αμέσως μετά τον πίνακα (Πίνακας 4-3).



Σχήμα 4-10. Συγκριτικά αποτελέσματα RTD για αυτοδύναμη λειτουργία GPRS και DVB-T/GPRS

| Περίπτωση / Μέγεθος | ping + GPRS (GPRS) | ping + GISP (DVB-T/GPRS) |
|----------------------------|--------------------|--------------------------|
| Mean (msecs) | 1097,50 | 690,11 |
| Standard Deviation (msecs) | 432,78 | 231,04 |

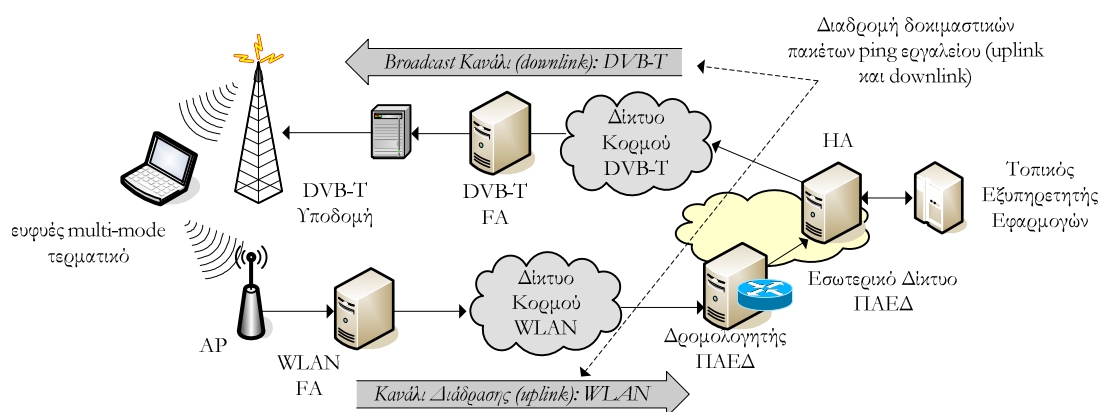
Πίνακας 4-3. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση για αυτοδύναμη λειτουργία GPRS και DVB-T/GPRS

Είναι προφανές ότι η συνεργασία ενός ευρυζωνικού ασύρματου δικτύου (όπως το DVB-T) για την υλοποίηση της downlink κατεύθυνσης των δεδομένων και ενός κυψελωτού, χαμηλής χωρητικότητας δικτύου (όπως το GPRS) επιφέρει σημαντική βελτίωση στο επίπεδο ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών. Ειδικότερα, η μείωση του μέσου χρόνου RTD και της τιμής της τυπικής απόκλισης αγγίζει ποσοστά της τάξης του 37,1% και 46,6% αντίστοιχα, σε σχέση με την αυτόνομη λειτουργία του δικτύου GPRS. Η βελτίωση αυτή του χρόνου RTD, σε συνδυασμό με την αυξημένη χωρητικότητα που μπορούν να προσφέρουν τα δίκτυα DVB-T, στην κρίσιμη κατεύθυνση καθόδου των δεδομένων (downlink), επηρεάζουν θετικά το επίπεδο ποιότητας στην παροχή υπηρεσιών που στηρίζονται στο πρωτόκολλο TCP. Επιπλέον, τονίζεται αλλά θα αποδειχθεί μέσω των αποτελεσμάτων που ακολουθούν, στην συνέχεια του κεφαλαίου, ότι ο συνδυασμός DVB-T και GPRS (στον ρόλο του καναλιού επιστροφής) ταιριάζει απόλυτα και με τις απαιτήσεις των UDP-based υπηρεσιών (π.χ. ροή video), γεγονός που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, ως προς την εμπορική αξιοποίηση του, τόσο από τους GPRS και DVB-T NPs.

Η επόμενη παράγραφος, ακολουθώντας ακριβώς την ίδια μεθοδολογία, παρουσιάζει αποτελέσματα σε σχέση με το DVB-T/WLAN mode λειτουργίας του τερματικού.

4.2.2.4 Λειτουργία DVB-T/WLAN

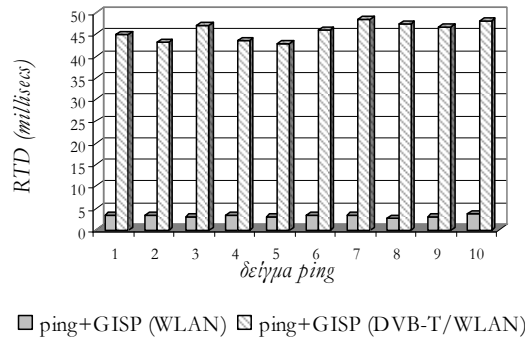
Στην παρούσα παράγραφο δίδονται αποτελέσματα σχετικά με τον χρόνο RTD για τον συνδυασμό του DVB-T δικτύου με κανάλι επιστροφής το WLAN. Το Σχήμα 4-9 απεικονίζει την διαδρομή που ακολουθούν τα δοκιμαστικά πακέτα του εργαλείου ping για την περίπτωση του DVB-T/WLAN.



Σχήμα 4-11. Διαδρομή δοκιμαστικών πακέτων εργαλείου ping στην περίπτωση DVB-T/WLAN

Το Σχήμα 4-10 και ο Πίνακας 4-3 παρουσιάζουν ταυτόχρονα τις τιμές του RTD για την περίπτωση της αυτοδύναμης λειτουργίας του WLAN και για την περίπτωση του DVB-T/WLAN, όταν στο

τερματικό υπάρχει μια μόνο ενεργή υπηρεσία τύπου GISP. Οι συνθήκες λήψης των δεδομένων ακολουθούν την λογική που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.2.2.3.



Σχήμα 4-12. Συγκριτικά αποτελέσματα RTD για αυτοδύναμη λειτουργία WLAN και DVB-T/WLAN

| Περίπτωση / Μέγεθος | ping + GISP (WLAN) | ping + GISP (DVB-T/WLAN) |
|----------------------------|--------------------|--------------------------|
| Mean (msecs) | 3,22 | 45,72 |
| Standard Deviation (msecs) | 0,27 | 2,06 |

Πίνακας 4-4. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση για αυτοδύναμη λειτουργία WLAN και DVB-T/WLAN

Επεκτείνοντας τα συμπεράσματα σχετικά με τα οφέλη της συνεργασίας ετερογενών ασύρματων δικτύων και για την περίπτωση του DVB-T/WLAN, είναι προφανές ότι ο συνδυασμός αυτός μπορεί να υποστηρίξει το ίδιο σύνολο υπηρεσιών με την περίπτωση της αυτόνομης λειτουργίας του WLAN. Πιο συγκεκριμένα η αύξηση της μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης που εμφανίζεται για το RTD, κατά μια τάξη μεγέθους, είναι απολύτως συμβατή με τις απαιτήσεις των πολυμεσικών εφαρμογών που προσφέρονται από το σύστημα.

Πριν παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από τα ρεαλιστικά σενάρια λειτουργίας ακολουθούν μετρήσεις σχετικά με την μονόδρομη καθυστέρηση (*OWD*) ανά ασύρματο δίκτυο, καθώς και στοιχεία σχετικά με την αποτελεσματικότητα των διασυστηματικών μεταπομπών.

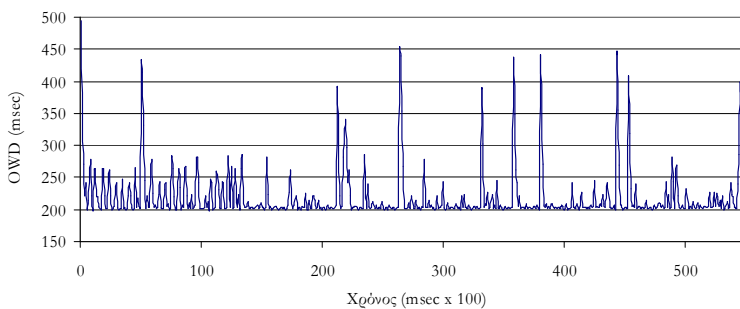
4.2.3 Μονόδρομη Καθυστέρηση (One Way Delay)

Η μονόδρομη καθυστέρηση (*OWD*) αποτελεί μια πολύ σημαντική μετρική, ιδιαίτερα για ασύμμετρες υπηρεσίες που υλοποιούνται μέσω του πρωτοκόλλου UDP. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την λήψη των μετρήσεων περιγράφηκε αναλυτικά στην παράγραφο 4.2.6, του κεφαλαίου 4. Πιο συγκεκριμένα, ο TG διοχέτευε ροές Δοκιμαστικής Κίνησης χαμηλού ρυθμού (*Low Rate Test Traffic*) στα υπό μέτρηση μέρη του ΠΑΕΔ. Το προφίλ κίνησης που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία των ροών αυτών περιγράφεται από την ύπαρξη ίδιου μεγέθους πακέτων των 200bytes, παραγόμενα ανά 100 msecs (*inter-packet distance*). Η συνολική επιβάρυνση της

δοκιμαστικής ροής ήταν της τάξης των 15,625 Kbps, συμβατής και με τις δυνατότητες του δικτύου GPRS. Ακολουθούν οι παράγραφοι 4.2.3.1, 4.2.3.2 και 4.2.3.3 όπου παρουσιάζονται οι μετρήσεις του OWD για την downlink κατεύθυνση των δεδομένων, για τα δίκτυα GPRS, WLAN και DVB-T, αντίστοιχα. Τέλος η παράγραφος 4.2.3.4 περιέχει μετρήσεις της μεταβολής του OWD στην διάρκεια διασυστηματικών μεταπομπών, αλλά και ενδιαφέροντα συμπεράσματα σχετικά με την απόδοσή τους.

4.2.3.1 Μονόδρομη Καθυστερήση στο δίκτυο GPRS

Η διαδρομή που ακολουθούν τα πακέτα της δοκιμαστικής ροής χαμηλού ρυθμού είναι η ίδια με αυτήν που διανύουν τα δεδομένα των υπηρεσιών από τον Τοπικό Εξυπηρετητή Εφαρμογών προς το ευφρές τερματικό (βλέπε Σχήμα 4-5). Τα αποτελέσματα για ένα χρονικό διάστημα 60 δευτερολέπτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-13. Επιπλέον ο Πίνακας 4-5 περιέχει την μέση τιμή και τυπική απόκλιση της μετρικής OWD για το downlink μονοπάτι του δικτύου GPRS. Τέλος στον ίδιο πίνακα περιέχεται για λόγους σύγκρισης μια ενδεικτική τιμή της μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης του RTD για το ίδιο δίκτυο.



Σχήμα 4-13. GPRS downlink OWD

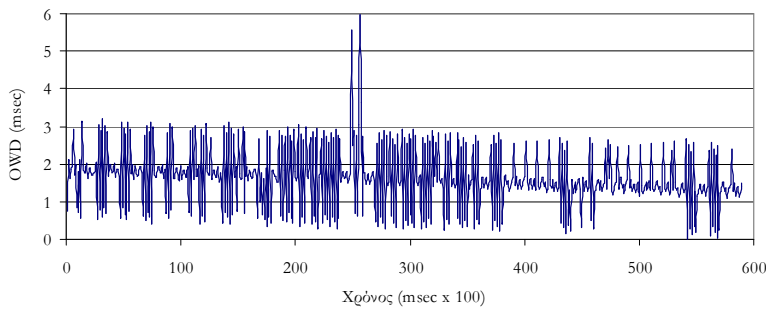
| Μέγεθος | OWD (downlink) | RTD |
|-----------------------------------|----------------|--------|
| <i>Mean (msecs)</i> | 219,7 | 882,74 |
| <i>Standard Deviation (msecs)</i> | 40,7 | 76,55 |

Πίνακας 4-5. GPRS Downlink OWD και RTD

Παρατηρούμε ότι η τιμή του OWD για το GPRS downlink μονοπάτι είναι φραγμένη άνω στα 200 msec, γεγονός που οφείλεται στην εσωτερική λειτουργία και οργάνωση του εμπορικού δικτύου της εταιρείας Vodafone.

4.2.3.2 Μονόδρομη Καθυστερήση στο δίκτυο WLAN

Η δοκιμαστική ροή χαμηλού ρυθμού για την περίπτωση του WLAN ακολουθεί την πορεία των δεδομένων του Τοπικού Εξυπηρετητή Εφαρμογών προς το ευφρές τερματικό, όπως αυτή αναπαριστάται στο Σχήμα 4-7. Όπως και για την περίπτωση του GPRS, τα αποτελέσματα για ένα χρονικό διάστημα 60 δευτερολέπτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-14 ενώ ο Πίνακας 4-6 περιέχει την μέση τιμή και τυπική απόκλιση της μετρικής OWD για την downlink κατεύθυνση του δικτύου WLAN. Επιπλέον, για λόγους σύγκρισης στον ίδιο πίνακα περιέχεται μια ενδεικτική τιμή της μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης του RTD για το ίδιο δίκτυο.



Σχήμα 4-14. WLAN downlink OWD

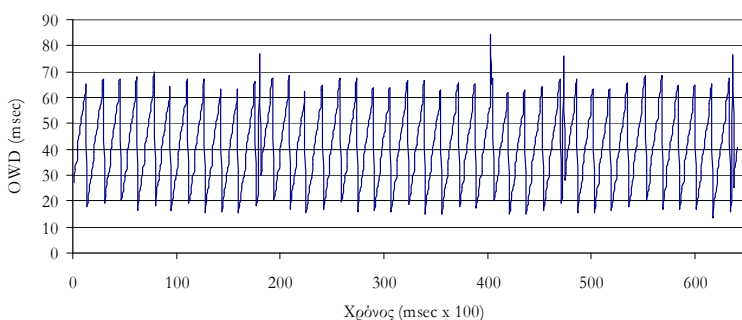
| Μέγεθος | OWD (downlink) | RTD |
|----------------------------|----------------|------|
| Mean (msecs) | 1,64 | 3,22 |
| Standard Deviation (msecs) | 0,81 | 0,27 |

Πίνακας 4-6. WLAN Downlink OWD και RTD

Τα αποτελέσματα σε σχέση με τις τιμές OWD που παρουσιάζονται για το δίκτυο WLAN δίκτυο, επιβεβαιώνουν την διαπίστωση ότι το υπό εξέταση δίκτυο είναι σε θέση να υποστηρίξει ικανοποιητικά, υπηρεσίες με αυστηρές απαιτήσεις, σε σχέση με την μονόδρομη καθυστέρηση (για παράδειγμα υπηρεσία βιντεοροής).

4.2.3.3 Μονόδρομη Καθυστέρηση στο δίκτυο DVB-T

Τελευταία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σχετικά με την μετρική OWD για το δίκτυο DVB-T. Η πορεία που ακολουθούν τα δοκιμαστικά πακέτα του TG απεικονίζεται στο Σχήμα 4-9 (ή στο Σχήμα 4-11). Το κανάλι διάδρασης, όπως ήταν αναμενόμενο δεν επηρεάζει καθόλου τις μετρήσεις. Όπως και για τις περιπτώσεις των προηγούμενων δυο δικτύων, τα αποτελέσματα για ένα χρονικό διάστημα 60 δευτερολέπτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-15 ενώ ο Πίνακας 4-7 περιέχει την μέση τιμή και τυπική απόκλιση της μετρικής OWD για το downlink μονοπάτι του δικτύου DVB-T. Επιπλέον στον ίδιο πίνακα περιέχεται για λόγους σύγκρισης μια ενδεικτική τιμή της μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης του RTD για το ίδιο δίκτυο και για τις δύο δυνατές επιλογές σε σχέση με το κανάλι επιστροφής.



Σχήμα 4-15. DVB-T downlink OWD

| Μέγεθος | OWD (downlink) | RTD (WLAN) | RTD (GPRS) |
|----------------------------|----------------|------------|------------|
| Mean (msecs) | 41,45 | 45,72 | 690,11 |
| Standard Deviation (msecs) | 15,17 | 2,06 | 231,04 |

Πίνακας 4-7. DVB-T Downlink OWD και RTD με RIP τα δίκτυα WLAN και GPRS

Η «πριονωτή» μορφή που εμφανίζεται στην γραφική παράσταση των τιμών OWD για την περίπτωση του δικτύου DVB-T οφείλεται στον τρόπο λειτουργίας του IP DVB-T gateway και multiplexer. Πιο συγκεκριμένα, επειδή η μόνη πηγή δεδομένων κατά της διάρκεια εκτέλεσης των μετρήσεων, είναι η πολύ χαμηλού ρυθμού δοκιμαστική κίνηση που παράγει ο TG, ο DVB-T multiplexer καθυστερεί την αποστολή των πακέτων μέχρι έως ότου συγκεντρωθεί ένα συγκεκριμένο μέγεθος δεδομένων προς μετάδοση (πλήρωση εσωτερικών buffer του DVB-T multiplexer).

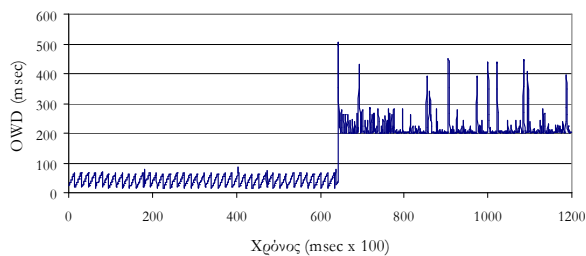
Η επόμενη παράγραφος μέσω από μια σειρά πειραμάτων και μετρήσεων επιχειρεί μια συνολική αξιολόγηση του μηχανισμού κινητικότητας που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια υλοποίησης του ΠΑΕΔ.

4.2.3.4 Αξιολόγηση Μηχανισμού Κινητικότητας ΠΑΕΔ

Με την χρήση της Δοκιμαστικής Κίνησης χαμηλού ρυθμού και της δυνατότητας χειροκίνητης αλλαγής του mode λειτουργίας του ευφυούς τερματικού, παρήχθησαν τα παρακάτω αποτελέσματα με βάση τα όποια αξιολογείται η απόδοση και η αποτελεσματικότητα των διασυστηματικών μεταπομπών. Στο Σχήμα 4-16 παρουσιάζεται η επίδραση των inter-system handovers στην τιμή του OWD, των πακέτων που παράγει ο TG. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι περιπτώσεις:

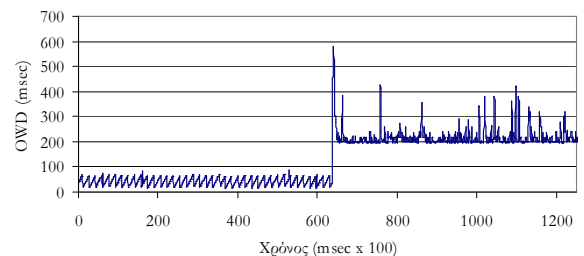
- Μεταπομπή από DVB-T/GPRS σε GPRS (Σχήμα 4-16/1).
- Μεταπομπή από DVB-T/WLAN σε GPRS (Σχήμα 4-16/2).
- Μεταπομπή από DVB-T/GPRS σε WLAN (Σχήμα 4-16/3).
- Μεταπομπή από DVB-T/WLAN σε WLAN (Σχήμα 4-16/4).
- Μεταπομπή από WLAN σε DVB-T/GPRS (Σχήμα 4-16/5).
- Μεταπομπή από WLAN σε DVB-T/WLAN (Σχήμα 4-16/6).
- Μεταπομπή από GPRS σε WLAN (Σχήμα 4-16/7).
- Μεταπομπή από WLAN σε GPRS (Σχήμα 4-16/8).

OWD κατά την διάρκεια μεταπομπής από DVB-T/GPRS σε GPRS



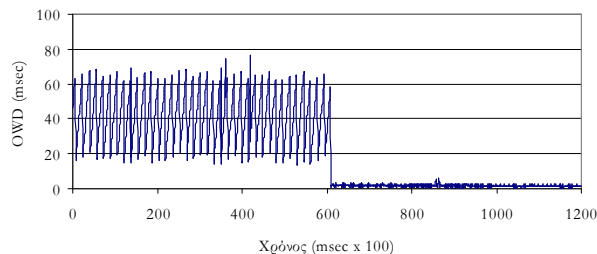
(1)

OWD κατά την διάρκεια μεταπομπής από DVB-T/WLAN σε GPRS



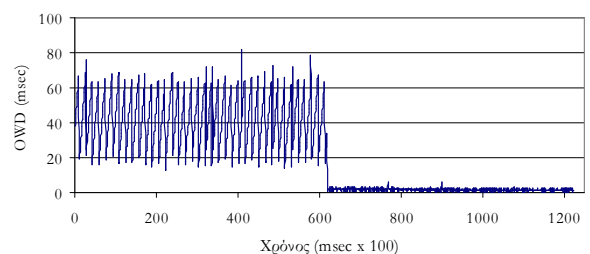
(2)

OWD κατά την διάρκεια μεταπομπής από DVB-T/GPRS σε WLAN

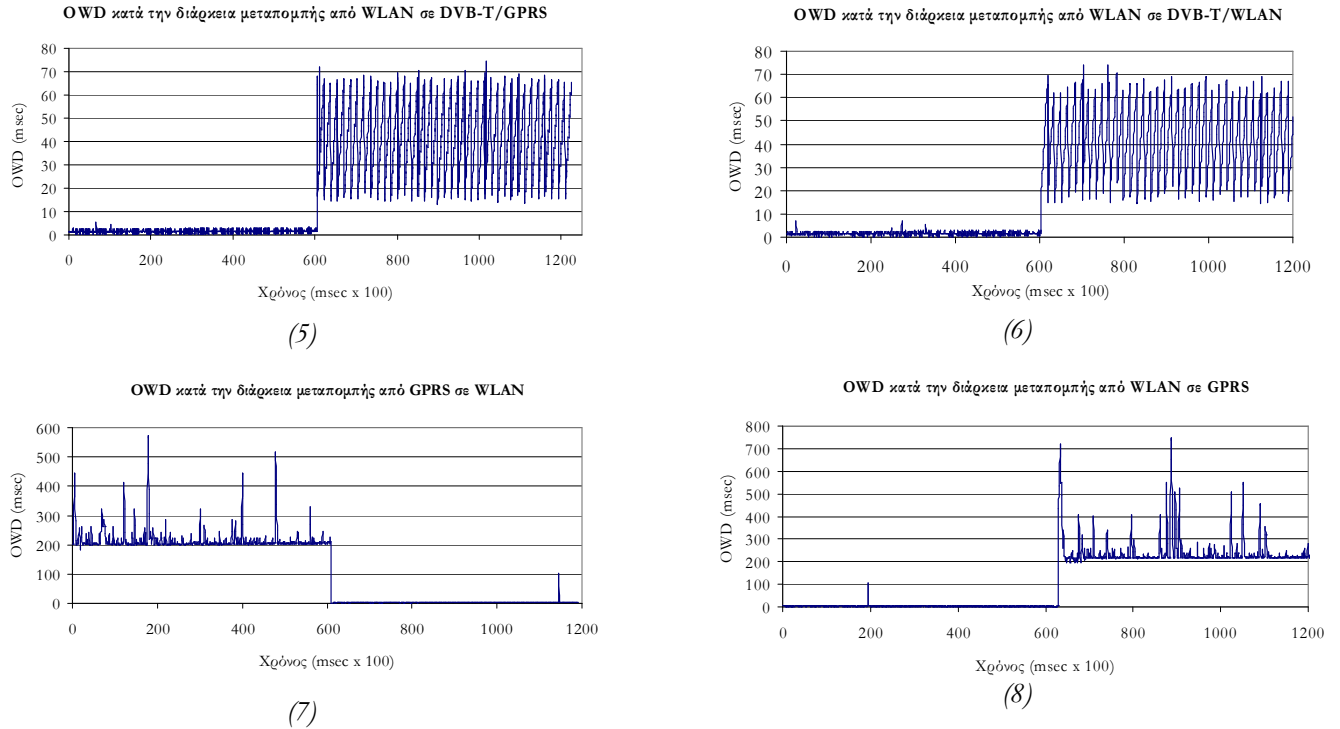


(3)

OWD κατά την διάρκεια μεταπομπής από DVB-T/WLAN σε WLAN



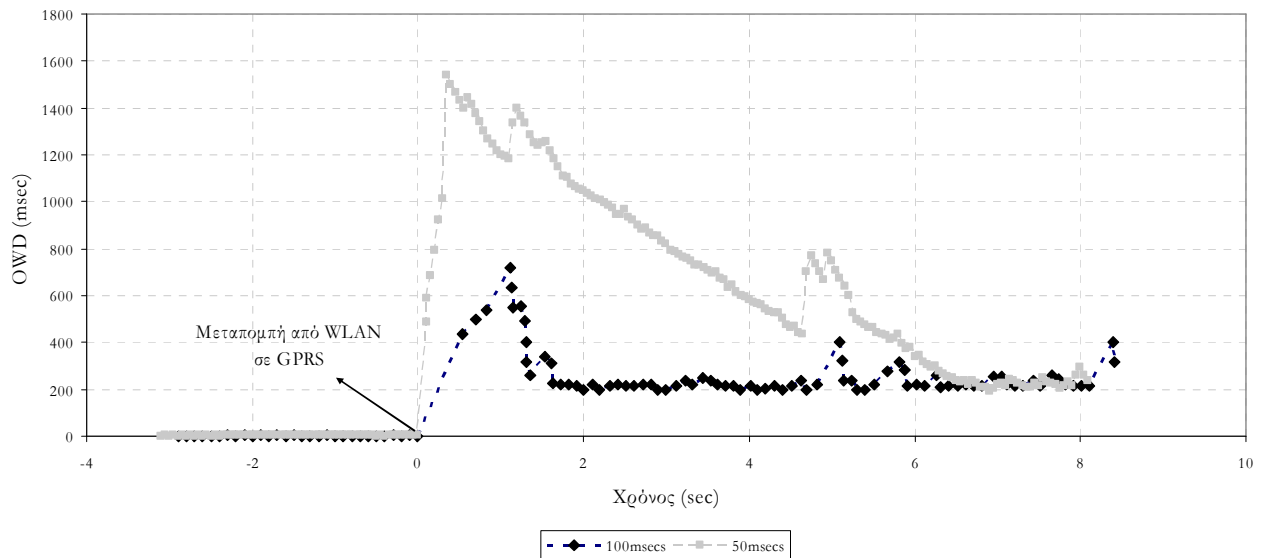
(4)



Σχήμα 4-16. Επίδραση διασυστηματικών μεταπομπών στην μετρική OWD

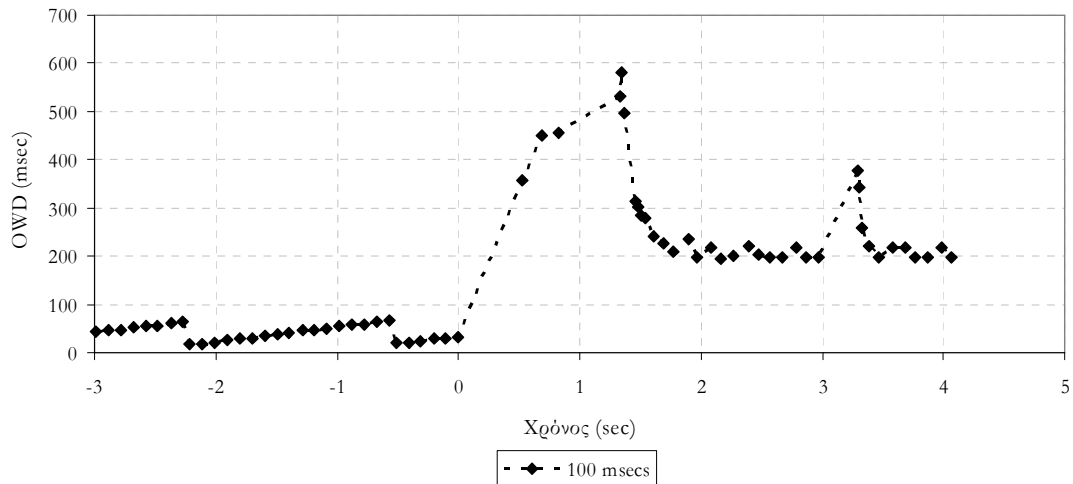
Τα παραπάνω αποτελέσματα συμφωνούν απόλυτα με τις τυπικές τιμές του OWD, των επιμέρους ασύρματων δικτύων, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στις παραγράφους 4.2.3.1, 4.2.3.2 και 4.2.3.3. Πιο συγκεκριμένα, κατά την διάρκεια της μεταπομπής από το δίκτυο DVB-T, με κανάλι επιστροφής είτε το GPRS (Σχήμα 4-16/1), είτε το WLAN (Σχήμα 4-16/2), στο δίκτυο GPRS, η μέση τιμή της καθυστέρησης OWD αυξάνεται από τα 40 msec στα 220 msec περίπου. Στην συνέχεια, κατά την διάρκεια της μεταπομπής πάλι από το δίκτυο DVB-T, με κανάλι επιστροφής είτε το GPRS (Σχήμα 4-16/3), είτε το WLAN (Σχήμα 4-16/4), προς το δίκτυο WLAN, η μέση τιμή της καθυστέρησης OWD μειώνεται από τα 40 msec στα 1-2 msec περίπου. Αντίστοιχα είναι και τα αποτελέσματα κατά την μετάβαση από το δίκτυο WLAN, προς το DVB-T για όλες τις περιπτώσεις καναλιού διάδρασης. Κατά την διάρκεια των παραπάνω μεταβάσεων δεν παρατηρήθηκε καμία απώλεια πακέτων. Περισσότερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι περιπτώσεις μεταπομπής από GPRS σε WLAN και αντίστροφα, οι οποίες απεικονίζονται στο Σχήμα 4-16/7 και Σχήμα 4-16/8, αντίστοιχα. Στην πρώτη περίπτωση αντιμετωπίζουμε το φαινόμενο μετάβασης από ένα σχετικά «γρήγορο» δίκτυο (WLAN) προς ένα σύστημα (GPRS), με χαμηλότερες επιδόσεις σε σχέση με τα μεγέθη της καθυστέρησης, του delay variation και φυσικά του μέγιστου ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων. Είναι εμφανές το σύντομο σε χρονική διάρκεια αλλά σημαντικό άλμα (πάνω από την μέση τιμή για το συγκεκριμένο δίκτυο) που παρατηρείται στην τιμή του OWD των πακέτων της δοκιμαστικής κίνησης αμέσως μετά την μεταπομπή, (βλέπε Σχήμα 4-16/8). Για την περαιτέρω μελέτη και αξιολόγηση του προαναφερθέντος φαινομένου, η συγκεκριμένη μεταγωγή πραγματοποιήθηκε και με την χρήση δοκιμαστικής κίνησης, με το χρονικό διάστημα μεταξύ της παραγωγή των πακέτων του TG, να τίθεται ίσο με 50 msec. Το συνολικό κυκλοφοριακό φορτίο που δημιουργούσε η

συγκεκριμένη δοκιμαστική ροή ανερχόταν στα 31Kbps περίπου, συμβατό αλλά κοντά στις μέγιστες δυνατότητες του συγκεκριμένου δικτύου GPRS και τετρατικού (κατηγορίας 4+1 timeslots για downlink και uplink, αντίστοιχα). Στο Σχήμα 4-17 παρουσιάζονται οι μετρήσεις σε σχέση με το OWD και για τις δύο περιπτώσεις δοκιμαστικής κίνησης. Για λόγους σύγκρισης και καλλίτερης κατανόησης των αποτελεσμάτων, ως χρονικό σημείο μηδέν θεωρείται η στιγμή της μεταπομπής από το ένα δίκτυο στο άλλο.

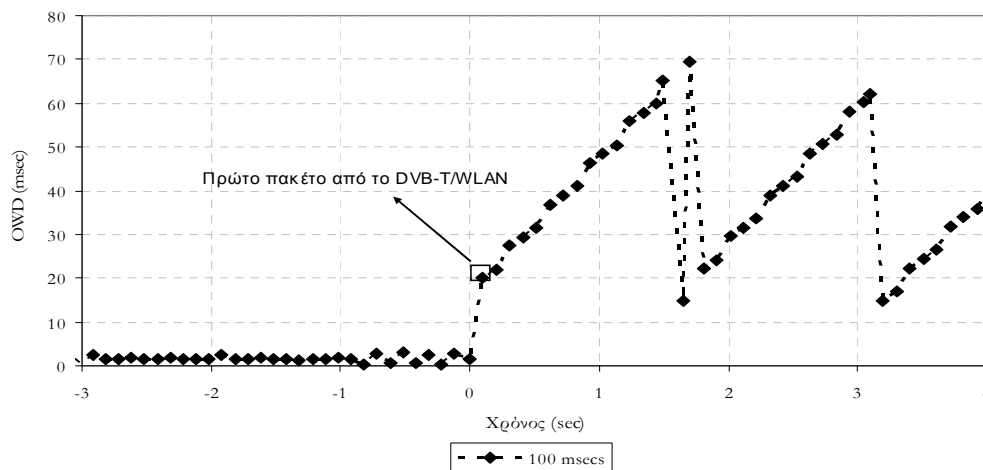


Σχήμα 4-17. OWD κατά την μεταπομπή από WLAN σε GPRS, για test traffic 100 και 50 msec

Είναι φανερό ότι το άλμα στην τιμή της μετρικής OWD, που παρατηρείτε για την περίπτωση της δοκιμαστική κίνησης των 50 msec, είναι εντονότερο. Επιπλέον για την ίδια περίπτωση το χρονικό διάστημα που χρειάζεται το σύστημα GPRS για να επανέλθει σε μια κατάσταση ισορροπίας, με τιμές OWD κοντά στο φυσιολογικό επίπεδο των 220 msec περίπου, είναι αρκετά μεγαλύτερο, σε σχέση με την δοκιμαστική κίνηση των 100 msec. Οι αιτίες του φαινομένου έχουν να κάνουν με την δομή και τον τρόπο λειτουργίας του δικτύου GPRS, κατά την φάση αρχικοποίησης μιας καινούργιας ροής δεδομένων προς κάποιον χρήστη του συγκεκριμένου συστήματος. Παρόμοια είναι η κατάσταση και για την περίπτωση μεταπομπής από DVB-T/WLAN σε GPRS ή WLAN, όπως απεικονίζονται στα Σχήμα 4-18 και Σχήμα 4-19.



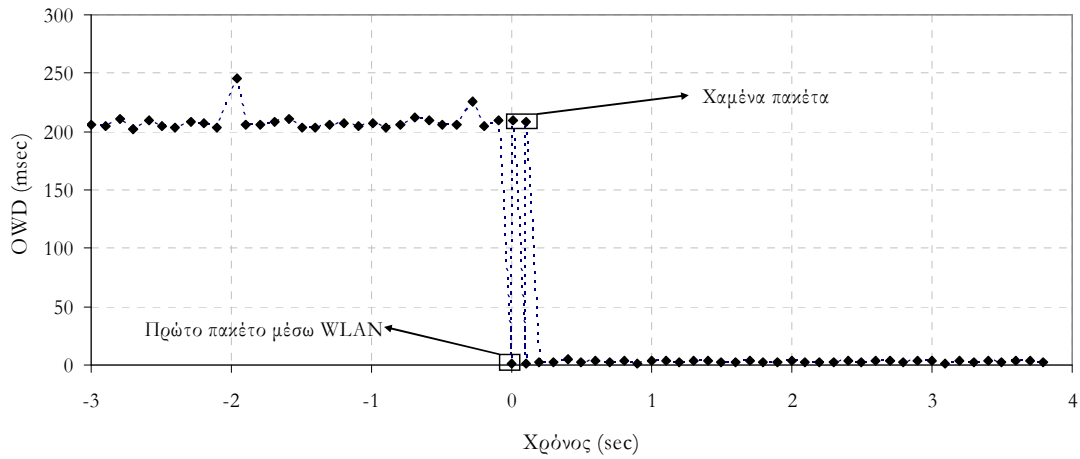
Σχήμα 4-18. OWD κατά την μεταπομπή από DVB-T/WLAN σε GPRS, για test traffic 100



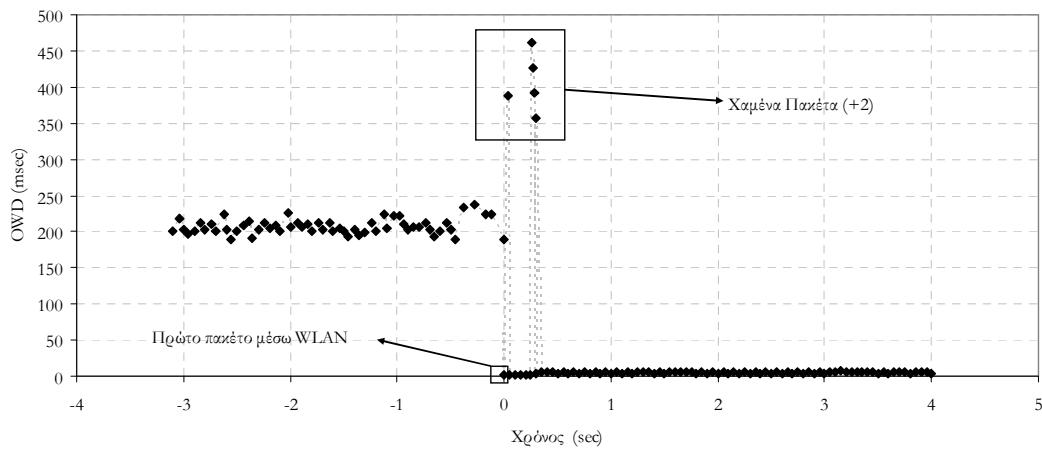
Σχήμα 4-19. OWD κατά την μεταπομπή από DVB-T/WLAN σε WLAN, για test traffic 100

Συμπερασματικά, το έντονο άλμα στο μέγεθος του OWD, για τις παραπάνω μεταβάσεις θα επηρεάσει αρνητικά σε μεγαλύτερο βαθμό τις λεγόμενες υπηρεσίες delay-sensitive (ευαίσθητες σε καθυστέρηση), όπως είναι η βιντεοροή ή φωνής μέσω IP (*voice over IP*). Μια προτεινόμενη λύση, όπως έμμεσα υπονοείται και από το Σχήμα 4-17, είναι η προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων (*content rate adaptation*), πριν την πραγματοποίηση της μεταπομπής, σε επίπεδα πιο συμβατά με τις δυνατότητες του δικτύου προορισμού.

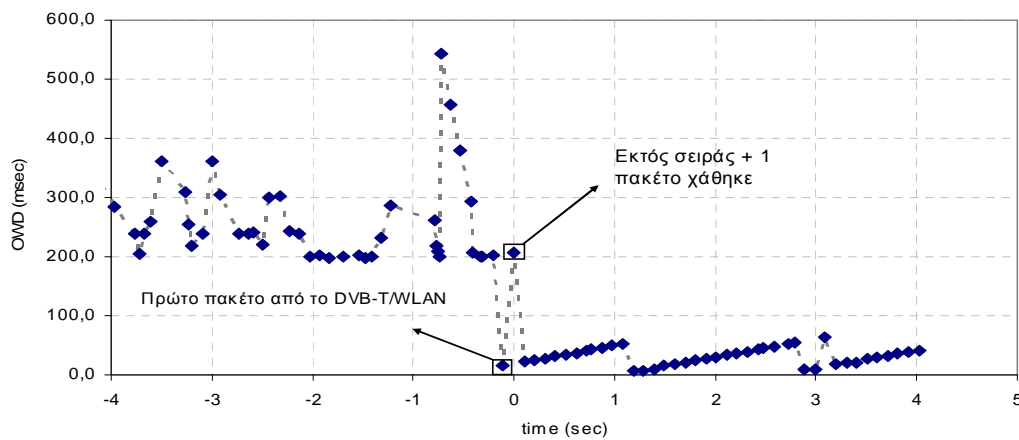
Στην αντίστροφη περίπτωση, η μετάβαση από ένα σχετικά αργό δίκτυο (GPRS) σε ένα δίκτυο με καλύτερη συμπεριφορά ως προς την καθυστέρηση και το delay variation (WLAN), συνοδεύτηκε από απώλειες πακέτων της δοκιμαστικής κίνησης. Τα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 4-20, Σχήμα 4-21, Σχήμα 4-22), όπως και για τις προηγούμενες περιπτώσεις, επικεντρώνει ακριβώς στο χρονικό σημείο της μεταπομπής (χρόνος μηδέν στο γράφημα).



Σχήμα 4-20. Μεταπομπή από GPRS σε WLAN – Απώλειες πακέτων δοκιμαστικής κίνησης των 100 msecs



Σχήμα 4-21. Μεταπομπή από GPRS σε WLAN – Απώλειες πακέτων δοκιμαστικής κίνησης των 50 msecs



Σχήμα 4-22. Μεταπομπή από GPRS σε DVB-T/WLAN – Απώλειες πακέτων δοκιμαστικής κίνησης των 100 msecs

Στα συγκεκριμένα στιγμιότυπα των πειραμάτων, ο αριθμός των πακέτων που χάθηκαν στο επίπεδο εφαρμογής, ήταν δυο, επτά και ένα, αντίστοιχα. Το φαινόμενο όπως ήταν αναμενόμενο, είναι πιο έντονο στην περίπτωση της δοκιμαστικής κίνησης με ρυθμό 31Kbps (χρονικό διάστημα μεταξύ της παραγωγή των πακέτων του TG, ίσο με 50 msec). Στα διαγράμματα των παραπάνω σχημάτων, παρατηρούμε ότι περιλαμβάνεται και η τιμή OWD για τα «χαμένα» πακέτα, μια και φροντίσαμε να κρατήσουμε ενεργή την διεπαφή του δικτύου GPRS και μετά την μεταπομπή. Ειδικότερα, για την δεύτερη περίπτωση δυο πακέτα χάθηκαν εντελώς. Η αιτία απώλειας, έγκριεται στο γεγονός ότι τα συγκεκριμένα πακέτα είχαν ήδη αποσταλεί από τον TG προς το τερματικό και την στιγμή διενέργειας της μεταπομπής βρισκόντουσαν μέσα στις εσωτερικές δομές του συστήματος GPRS, έτοιμα για μετάδοση. Δυστυχώς, ο μηχανισμός κινητικότητας που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια υλοποίησης του πειραματικού ΠΑΕΔ, δεν προβλέπει κάποια διαδικασία επαναποστολής ή αλλαγής δρομολόγησης για τα συγκεκριμένα πακέτα, με αποτέλεσμα την απώλεια τους. Φυσικά σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η αρχιτεκτονική που ακολουθήθηκε για την ενσωμάτωση του δικτύου GPRS στις δομές του ΠΑΕΔ. Στην περίπτωση αυτή, οι υπηρεσίες οι οποίες θα επηρεαστούν περισσότερο κατά την διάρκεια μεταβάσεων από ένα σχετικά «αργό» δίκτυο σε ένα άλλο, είναι αυτές που έχουν χαμηλό βαθμό ανοχής σε απώλειες πακέτων (*loss-intolerant*), οι οποίες συνήθως υλοποιούνται μέσω του πρωτόκολλο TCP. Οι ενδεχόμενες λύσεις, ειδικότερα για το θέμα των απωλειών πακέτων θα αφορούν την βελτίωση του μηχανισμού κινητικότητας (π.χ. MIPv6 [MN02], Cellular IP [CG+00] κτλ.) αλλά και την προσαρμογή της λειτουργίας του πρωτοκόλλου TCP [SJ03], [BP+97] σε σχέση με το περιβάλλον των ασύρματων δικτύων.

Τέλος, διαπιστώθηκαν με το πιο ασφαλές τρόπο, οι ικανοποιητικές επιδόσεις κατά την διάρκεια διασυστηματικών μεταπομπών από και προς τα συστήματα DVB-T, ιδιαίτερα για υπηρεσίες με ανοχή στις απώλειες πακέτων, καθιστώντας τα ως προς αυτή την παράμετρο κατάλληλα για την ενσωμάτωση σε Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς.

4.2.3.5 Καθυστερήσεις Εσωτερικών Στοιχείων ΠΑΕΔ

Οι παραπάνω μετρήσεις αξιολόγησης της λειτουργίας των ασυρμάτων δικτύων, πάντα στα πλαίσια του υλοποιημένου πειραματικού ΠΑΕΔ, επηρεάζονται από την ύπαρξη των υποστηρικτικών στοιχείων της MIPv4 πλατφόρμα αλλά και από τυχόν καθυστερήσεις που υπεισέρχονται, όταν τα δεδομένα διασχίζουν το ενσύρματο κομμάτι του συστήματος. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν μια σειρά μετρήσεων με σκοπό την εκτίμηση της τάξης μεγέθους αυτών των χρονικών καθυστερήσεων. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για το ενσύρματο μέρος του δικτύου είναι αυτή της δοκιμαστικής κίνησης χαμηλού ρυθμού που παρήγαγε ο TG, ενώ για τον υπολογισμό της καθυστέρησης εξαιτίας της ύπαρξης του MIPv4 λογισμικού έγινε χρήση του tcpdumb, στον κόμβο φιλοξενίας των αντίστοιχων πρακτόρων (HA και WLAN και DVB-T FA agents). Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει ενδεικτικές τιμές, προερχόμενες από μια σειρά μετρήσεων, πραγματοποιημένες υπό διαφορετικές συνθήκες.

| Μέση Καθυστέρηση ανά hop στο ενσύρματο δίκτυο | HA/FA process και encapsulation καθυστέρηση | HA/FA process και de- capsulation καθυστέρηση |
|--|--|--|
| < 0,3 msec) | < 24 μsec | < 32 μsec |

Πίνακας 4-8. Καθυστερήσεις οφειλόμενες σε εσωτερικά στοιχεία του πειραματικού ΠΑΕΔ. Τονίζεται ότι οι παραπάνω τιμές είναι ενδεικτικές της τάξης μεγέθους της καθυστέρησης που προκαλούν τα διάφορα δικτυακά στοιχεία της πειραματικής πλατφόρμας. Η τιμή τους επηρεάζεται από παράγοντες όπως η κυκλοφοριακή επιβάρυνση του δικτύου κορμού και η υπολογιστική ισχύς των κόμβων που φιλοξενούν την απαραίτητη υποδομή για την υποστήριξη της λειτουργίας του MIP.

4.3 Ρεαλιστικά Σενάρια Λειτουργίας - Αξιολόγηση Επιδόσεων σε Επίπεδο Χρήστη μετά την ενσωμάτωση των συστημάτων DVB-T

Μετά τα πειράματα αξιολόγησης του ΠΑΕΔ σε επίπεδο συστήματος, όπου αποδείχτηκε η συμβατότητα και αποτελεσματικότητα του, τόσο σε σχέση με τις απαιτήσεις των πολυμεσιών υπηρεσιών, όπως προδιαγράφηκαν στο Κεφάλαιο 3, όσο και κατά την διάρκεια των διασυστηματικών μεταπομπών, ακολουθεί η αξιολόγηση της πλατφόρμας μέσω ρεαλιστικών σεναρίων λειτουργίας.

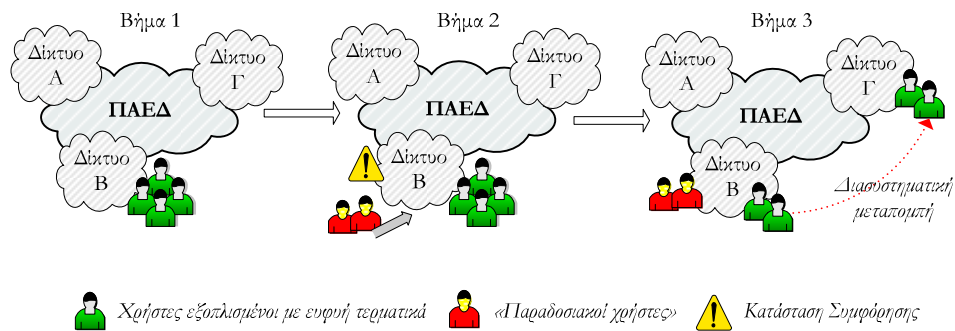
Τα παρουσιαζόμενα σενάρια ρεαλιστικής λειτουργίας στοχεύουν στην επίδειξη της βελτίωσης του επιπέδου ποιότητας στην παροχή υπηρεσιών IP που επιφέρει η ιδέα του ΠΑΕΔ, σε σχέση με την ξεχωριστή αυτόνομη λειτουργία των ασυρμάτων δικτύων και ιδιαίτερα μετά την ενσωμάτωση των συστημάτων DVB-T. Ο διαχωρισμός των σεναρίων λειτουργίας έγκειται στην αντιμετώπιση των πιθανών καταστάσεων που είναι δυνατόν να οδηγήσουν στην υποβάθμιση του επιπέδου ποιότητας σε ήδη ενεργά τερματικά. Οι κύριες κατηγορίες σεναρίων, όπως παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους, είναι οι εξής :

- Αντιμετώπιση καταστάσεων συμφόρησης (δημιουργία hot-spot περιοχών).
- Αντιμετώπιση καταστάσεων απώλειας ραδιοαάλυψης κατά την διάρκεια κίνησης τερματικού εκτός της εμβέλειας του δικτύου εξυπηρέτησης.

Ακολουθεί η περιγραφή των σεναρίων και των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εκτέλεση τους.

4.3.1 Αντιμετώπιση Καταστάσεων Συμφόρησης

Στην κατηγορία των σεναρίων της παρούσας παραγράφου, εξετάζονται περιπτώσεις αντιμετώπισης καταστάσεων συμφόρησης. Στόχος των πειραμάτων αυτού του είδους είναι η επίδειξη των δυνατοτήτων του συστήματος στην προστασία των χρηστών, εξοπλισμένων με ευφυή τερματικά, απέναντι σε καταστάσεις κυκλοφοριακής συμφόρησης, μέσω της αναδιανομής τους σε εναλλακτικά ασύρματα δίκτυα. Ως εναλλακτικό δίκτυο στην περίπτωση μας θεωρείται το σύστημα DVB-T. Το Σχήμα 4-23 απεικονίζει τα βήματα ενός τυπικού σεναρίου της κατηγορίας αυτής, των οποίων η περιγραφή ακολουθεί αμέσως μετά.



Σχήμα 4-23. Γενικό σενάριο αντιμετώπισης καταστάσεων συμφόρησης

Βήμα 1^ο : Αρχικά, ομάδα χρηστών εξοπλισμένων με ευφυή τερματικά εξυπηρετείται μέσω συγκεκριμένης περιοχής του Δικτύου Β. Οι διαθέσιμοι δικτυακοί πόροι είναι αρκετοί για την παροχή ικανοποιητικού επιπέδου ποιότητας σε σχέση με τις ενεργές υπηρεσίες, στην συγκεκριμένη περιοχή.

Βήμα 2^ο : Στην συνέχεια του σεναρίου, ο Διαχειριστής ΠΑΕΔ μέσω των διεπαφών που διατηρεί με τα υποκείμενα δίκτυα, ανιχνεύει την δημιουργία κατάστασης συμφόρησης στο συγκεκριμένο τομέα του Δικτύου Β. Οι λόγοι δημιουργίας του προαναφερθέντος φαινομένου είναι είτε η είσοδος και εξυπηρέτηση «παραδοσιακών» χρηστών του Δικτύου Β στην συγκεκριμένη περιοχή, είτε γενικότερα αύξηση του συνολικού κυκλοφοριακού φορτίου λόγω αλλαγής των ενεργών υπηρεσιών των ευφών τερματικών. Ανεξαρτήτως της αιτίας που οδηγεί στην δημιουργία περιοχής συμφόρησης (ή αλλιώς *hot-spot area*), το αποτέλεσμα είναι η πτώση του παρεχόμενου επιπέδου ποιότητας σε όλους τους χρήστες, συμπεριλαμβανομένων και αυτών του συστήματος ΠΑΕΔ.

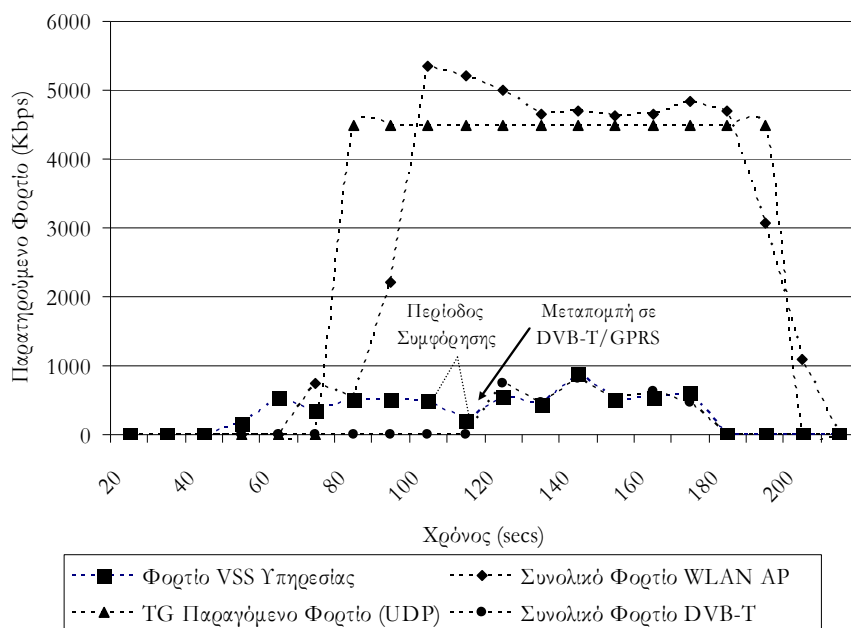
Βήμα 3^ο : Η αντίδραση του Διαχειριστή ΠΑΕΔ, στην κατεύθυνση αντιμετώπισης της προαναφερθείσας κατάστασης και της προστασίας των χρηστών του συστήματος, είναι η ανακατανομή τους στα εναλλακτικά διαθέσιμα δίκτυα, μέσω διασυστηματικών μεταπομπών (*network-assisted handovers*). Η διαδικασία ενημέρωσης των τερματικών για το νέο καταλληλότερο δίκτυο, γίνεται με την βοήθεια του μηνύματος Ειδοποίησης Απαιτούμενης Μεταπομπής (βλέπε Κεφάλαιο 3). Η αναδιανομή των χρηστών, απαραίτητη για την αντιμετώπιση της νέας κατάστασης αυξημένου κυκλοφοριακού φόρτου στο Δίκτυο Β, όχι μόνο επαναφέρει το επιθυμητό επίπεδο ποιότητας στους χρήστες που αλλάζουν τύπο δικτύου (δηλαδή αυτούς που πραγματοποιούν διασυστηματική μεταπομπή στο Δίκτυο Γ) αλλά ωφελεί και τους χρήστες που παραμένουν στην *hot-spot* περιοχή του Δικτύου Β, αφού επέρχεται κυκλοφοριακή αποσυμφόρηση.

Στην συνέχεια της παραγράφου παρουσιάζονται δυο παραδείγματα λειτουργίας του συστήματος, σε περιπτώσεις δημιουργίας *hot-spot* περιοχών.

- **Πρόπτωση 1 – Χρήση TG για την προσαρμοσμένης παρακολούθησης. Μιαδύο ευφών τερματικό.**

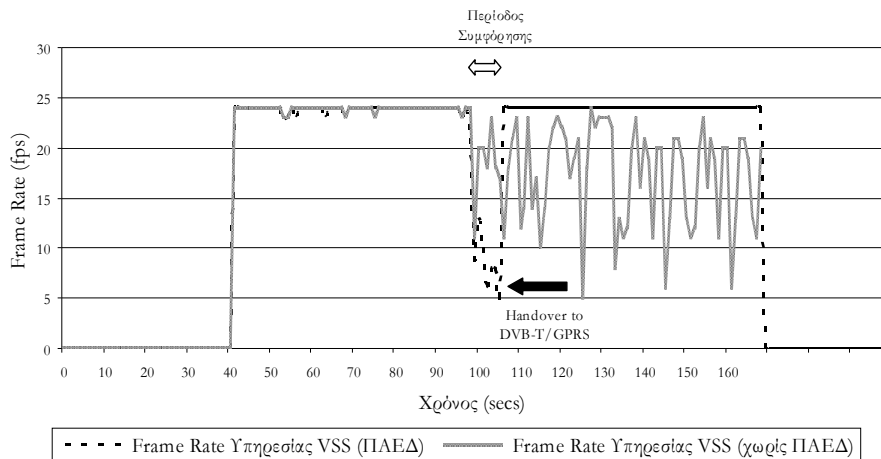
Στο παρόν σενάριο παρακολουθούμε αρχικά την εξυπηρέτηση μιας εφαρμογής VSS (με μέσο ρυθμό ροής ίσο με 500Kbps), ενός ευφώνου τερματικού μέσω του δικτύου WLAN (στο ρόλο του Δικτύου Β). Στην συνέχεια και με την χρήση του TG διοχετεύεται προς διαφορετικό τερματικό, το οποίο

συνδέεται στο δίκτυο WLAN μέσω του ίδιου AP, ροή *Κίνησης Παρασκηνίου* (*UDP background traffic*) της τάξης των 4,5 Mbps. Φυσικό επακόλουθο της υπερφόρτωσης, που παρατηρείτε στο δίκτυο WLAN (downlink κατεύθυνση), είναι η σταδιακή υποβάθμιση του επιπέδου ποιότητας (*quality degradation*) της ενεργής υπηρεσίας VSS. Η αντίδραση του Διαχειριστή ΠΑΕΔ, μπροστά σε αυτή την κατάσταση είναι η μετακίνηση του χρήστη προς εναλλακτικό ασύρματο μέσο. Οι απαιτήσεις της υπηρεσίας VSS σε χωρητικότητα και delay αλλά και η κατάσταση του δικτύου WLAN, οδηγούν στην επιλογή του DVB-T με κανάλι επιστροφής το GPRS (καταλληλότερη εναλλακτική λύση). Στο Σχήμα 4-24 παρατηρούμε τους ρυθμούς κίνησης όλων των εμπλεκόμενων ροών στο σενάριο.



Σχήμα 4-24. Περίπτωση 1 - Παρατηρούμενοι ρυθμοί κίνησης εμπλεκόμενων ροών.

Πιο συγκεκριμένα, από την στιγμή που η κίνηση background φτάσει στην μέγιστη τιμή της (δηλαδή τα 4,5Mbps), η συνολική παρατηρούμενη κίνηση στο AP ξεπερνά τα 5 Mbps, σηματοδοτώντας την έναρξη της περιόδου συμφόρησης (βλέπε συνθήκη ανίχνευσης συμφόρησης, $IP_{Throughput} \leq 4,6Mbps$). Οι επιπτώσεις στο επίπεδο ποιότητας της υπηρεσίας VSS είναι άμεσες και αφορούν την μείωση του ρυθμού ροής video και κατά συνέπεια την ραγδαία πτώση του ρυθμού βιντεοπλαισίων (*video frame rate*). Όπως απεικονίζεται και στο πιο πάνω διάγραμμα ο ρυθμός ροής video επανέρχεται στα φυσιολογικά επίπεδα από την στιγμή που συντελείται η διασυστηματική μεταπομπή στο DVB-T/GPRS. Η διακύμανση του video frame rate απεικονίζεται στο Σχήμα 4-25, μέσω των στατιστικών στοιχείων που συλλέγει ο Enhanced Application Client υπηρεσιών VSS, στη πλευρά του τερματικού.



Σχήμα 4-25. Περίπτωση 1 – Video Frame Rate

Στο ίδιο σχήμα απεικονίζεται ο ρυθμός βιντεοπλαισίων και στην περίπτωση μη παρέμβασης του Διαχειριστή ΠΑΕΔ. Όπως ήταν αναμενόμενο, η υποβάθμιση στο επίπεδο ποιότητας της υπηρεσίας VSS θα συνεχιζόταν καθ' όλη την διάρκεια της περιόδου συμφόρησης.

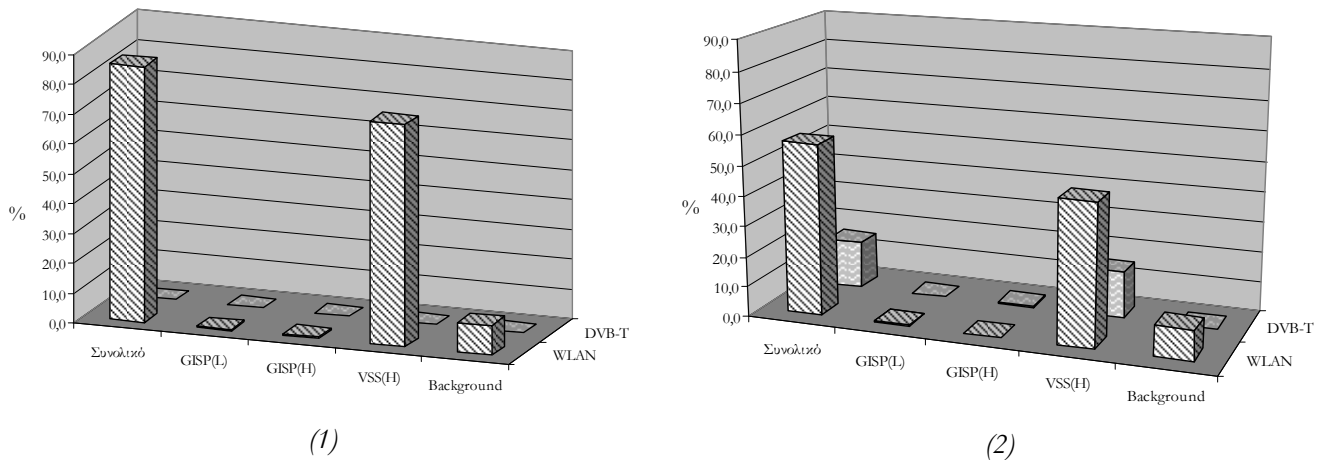
▪ **Περίπτωση 2 – «Παραδοσιακός» χρήστης, Γενικά/επιχειρηματικά.**

Στο δεύτερο σενάριο αντιμετώπισης κατάστασης συμφόρησης παρακολουθούμε αρχικά την εξυπηρέτηση ενός συνόλου χρηστών με μια ποικιλία ενεργών εφαρμογών (3 στιγμιότυπα GISP και 8 στιγμιότυπα VSS, όπως τα περιγράφει ο Πίνακας 4-9) μέσω του δικτύου WLAN. Στην συνέχεια, «παραδοσιακός» χρήστης του δικτύου WLAN, ξεκινά την εξυπηρέτηση των δικών του εφαρμογών μέσω του ίδιου AP, προκαλώντας έτσι συνολική background κίνηση που ανέρχεται στο 10% της διαθέσιμης χωρητικότητας (βλέπε Σχήμα 4-26/1). Ο Διαχειριστής ΠΑΕΔ, παρατηρώντας ότι το συνολικό φορτίο στο συγκεκριμένο κομμάτι του δικτύου ξεπερνά το 80% (βλέπε Σχήμα 4-26/1), διενεργεί αναδιανομή των χρηστών με ευφυή τεραματικά, μετακινώντας μέρος τους στο δίκτυο DVB-T/GPRS, επαναφέροντας με τον τρόπο αυτό, το επιθυμητό επίπεδο ποιότητας. Η κατανομή χρηστών και υπηρεσιών σε δίκτυα και επίπεδα ποιότητας μετά την μεσολάβηση του Διαχειριστή ΠΑΕΔ αναγράφονται στην τελευταία γραμμή του Πίνακας 4-9.

| Υπηρεσία | GISP | | VSS | |
|---|------------------------|--------------|-----|------------------------|
| Στιγμιότυπα υπηρεσιών ανά ομάδα χρηστών | 3 | | 8 | |
| Περιγραφή Επιπέδου Ποιότητας ανά υπηρεσία | Low | High | Low | High |
| Ανάθεση χρηστών και υπηρεσιών ανά δίκτυο και ανά επίπεδο ποιότητας | 2-WLAN | 1-WLAN | - | 8-WLAN |
| Ανάθεση χρηστών και υπηρεσιών ανά δίκτυο και ανά επίπεδο ποιότητας μετά την μεσολάβηση του Διαχειριστή ΠΑΕΔ | 1-WLAN 1-DVB-T/GPRS | 1-DVB-T/GPRS | - | 5-WLAN 3-DVB-T/GPRS |

Πίνακας 4-9. Ανάθεση χρηστών και υπηρεσιών σε δίκτυα και επίπεδα ποιότητας πριν και μετά την μεσολάβηση του Διαχειριστή ΠΑΕΔ.

Στο Σχήμα 4-26 απεικονίζεται με γραφικό τρόπο το ποσοστό χρησιμοποίησης των εμπλεκόμενων δικτύων στο υπό εξέταση σενάριο πριν και μετά την αντιμετώπιση της κατάσταση συμφόρησης, όπως αυτό καταγραφόταν από τις διεπαφές $G_{\Delta-DVB}$ και $G_{\Delta-WLAN}$.

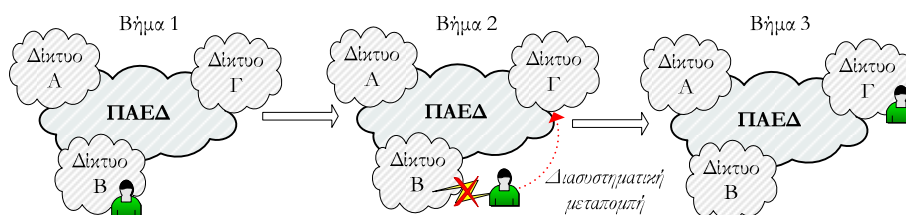


Σχήμα 4-26. Ποσοστό χρησιμοποίησης δικτύων WLAN και DVB-T πριν (1) και μετά (2) την μεσολάβηση του Διαχειριστή ΠΑΕΔ

Τέλος, οι αρνητικές επιπτώσεις της κατάστασης συμφόρησης στο παρεχόμενο επίπεδο ποιότητας των υπηρεσιών VSS, αλλά και η άρση τους, μετά την παρέμβαση του Διαχειριστή ΠΑΕΔ, ακολουθούν το ίδιο μοτίβο, όπως για την Περίπτωση 1 (βλέπε Σχήμα 4-25).

4.3.2 Αντιμετώπιση Καταστάσεων Απώλειας Ραδιοκάλυψης

Στην δεύτερη κατηγορία σεναρίων, παρουσιάζεται η αποτελεσματικότητα του συστήματος για τις περιπτώσεις όπου ο χρήστης μετακινείται εκτός της ραδιοκάλυψης του επιλεγμένου δικτύου στο τερματικό. Οι συνέπειες σε χρήστες μη εξοπλισμένους με ευφυή τερματικά και γενικότερα χωρίς πρόσβαση στις υποδομές του ΠΑΕΔ, είναι η διακοπή όλων των ενεργών υπηρεσιών. Αντίθετα, οι χρήστες του ΠΑΕΔ θα συνεχίσουν την λήψη των υπηρεσιών μέσω ενός από τα εναλλακτικά δίκτυα. Το σύστημα DVB-T, μέσω τη εκτεταμένης ραδιοκάλυψης που προσφέρει, σε συνδυασμό με τις αυξημένες δυνατότητες σε χωρητικότητα, αποτελεί ιδανική εναλλακτική λύση στην περίπτωση απομάκρυνσης του χρήστη εκτός της περιοχής κάλυψης του ευρυζωνικού WLAN. στην Στο Σχήμα 4-27 απεικονίζονται τα βήματα ενός τυπικού σεναρίου της κατηγορίας αυτής, των οποίων η περιγραφή ακολουθεί αμέσως μετά.



Σχήμα 4-27. Γενικό σενάριο αντιμετώπισης απώλειας ραδιοκάλυψης

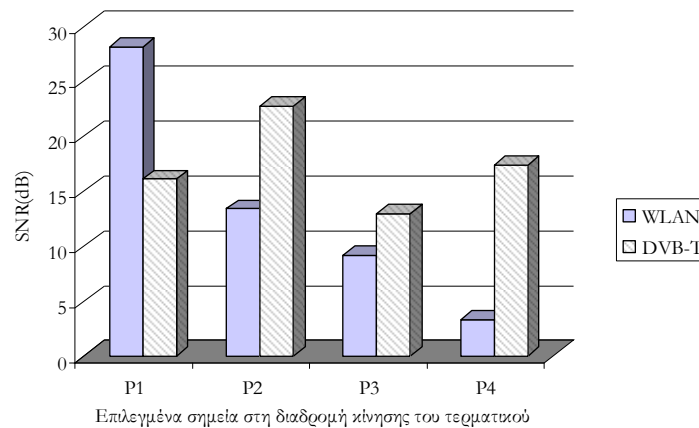
Βήμα 1^ο : Αρχικά ο χρήστης απολαμβάνει εξυπηρέτηση όλων των υπηρεσιών του μέσω του Δικτύου Β. Οι συνθήκες ραδιοκάλυψης σε συνδυασμό με το ύψος των διαθέσιμων δικτυακών πόρων, στην περιοχή του Δικτύου Β, όπου εντοπίζεται ο χρήστης, παρέχουν ένα ικανοποιητικό επίπεδο ποιότητας, σε σχέση με τις ενεργές υπηρεσίες στην πλευρά του τερματικού.

Βήμα 2^ο : Στην συνέχεια του σεναρίου, ο χρήστης αρχίζει να κινείται εκτός των ορίων ραδιοκάλυψης του Δικτύου Β. Η βαθμιαία μείωση της ισχύος του σήματος οδηγεί σε σταδιακή πτώση του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων, άρα και υποβάθμιση στο επίπεδο ποιότητας των λαμβανόμενων υπηρεσιών. Η κατάληξη της κίνησης του χρήστη θα είναι είτε η ολική απώλεια της επαφής με το Δίκτυο Β ή η παραμονή σε περιοχή με κακές συνθήκες ραδιοκάλυψης, άρα και χαμηλό επίπεδο ποιότητας, ως προς την εξυπηρέτηση των ενεργών εφαρμογών.

Βήμα 3^ο : Η επαναφορά στα φυσιολογικά επίπεδα ποιότητας και η άρση των αρνητικών συνεπειών για τις περιπτώσεις απώλειας ραδιοκάλυψης επιτυγχάνεται μέσω διασυστηματικής μεταπομπής σε ένα εναλλακτικό ασύρματο δίκτυο, παρόν στην περιοχή κίνησης του τερματικού.

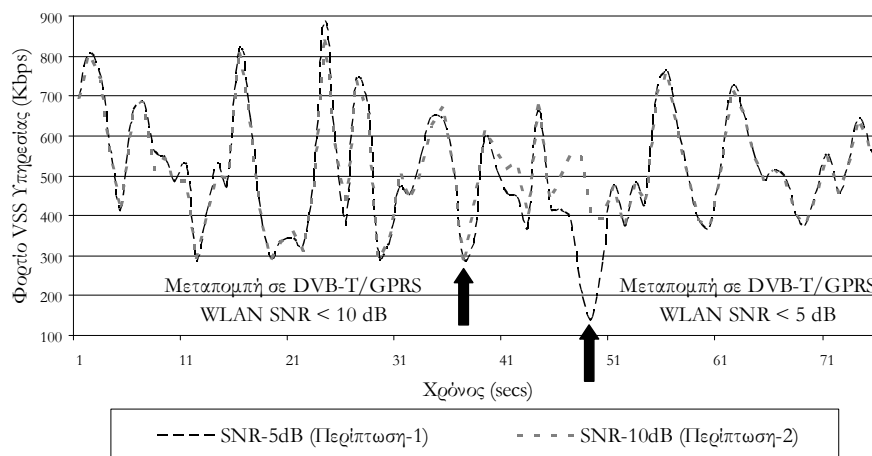
Το σύστημα προσφέρει δυο επιλογές όσο αφορά την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων. Η πρώτη επιλογή αφορά την αντίδραση του Διαχειριστή ΠΑΕΔ. Ο τελευταίος παρατηρεί την βαθμιαία πτώση στην τιμή ισχύος σήματος του ενεργού δικτύου του τερματικού, μέσω της περιοδικής αποστολής των μηνυμάτων Service Request/Service Request Reply και των πληροφοριών που περιέχονται σε αυτά (βλέπε παράγραφο 4.3.2.1) και καθοδηγεί το τερματικό στην αλλαγή του ασύρματου μέσου. Εναλλακτικά, το τερματικό μέσω του Quality Monitor module, αντιλαμβάνεται την προβληματική κατάσταση και ξεκινά διασυστηματική μεταπομπή, στηριζόμενο στις υπόλοιπες επιλογές που περιέχονται στο τελευταίο Service Request Reply μήνυμα, που ελήφθη από τον Διαχειριστή ΠΑΕΔ. Με βάση την δεύτερη δυνατότητα ακολουθεί η περιγραφή ενός ρεαλιστικού ενδεικτικού σεναρίου της κατηγορίας αυτής.

Στο Σχήμα 4-28 απεικονίζεται η τιμή του SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) για τα δίκτυα WLAN και DVB-T, στο μονοπάτι κίνησης του τερματικού (από το σημείο P1 προς το P4) κατά την διάρκεια εκτέλεση του πειράματος. Παρατηρούμε ότι καθώς κινούμαστε από το σημείο P1 προς το σημείο P4, η ισχύς του σήματος του WLAN μειώνεται σταδιακά, γεγονός που σηματοδοτεί την απώλεια ραδιοκάλυψης για το συγκεκριμένο δίκτυο. Παρατηρούμε ότι στο διάστημα μεταξύ των σημείων P2 και P3, η τιμή SNR για το δίκτυο WLAN πέφτει κάτω από την τιμή των 10dB, ενώ μεταξύ των σημείων P3 και P4 πέφτει κάτω από το όριο των 5dB. Τέλος, σε όλη την διαδρομή κίνησης του τερματικού, η κάλυψη των δικτύων DVB-T και GPRS (>-85dBm) παραμένει ικανοποιητική.

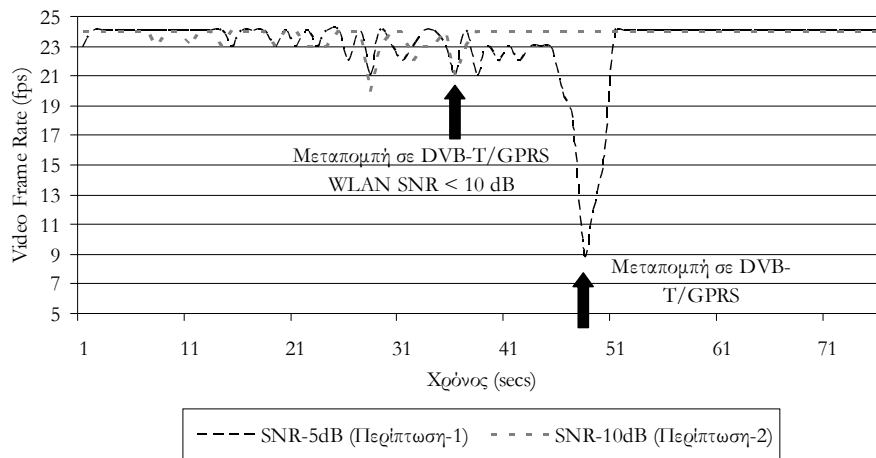


Σχήμα 4-28 Τιμή SNR σε επιλεγμένα σημεία κίνησης του τερματικού για τα δίκτυα WLAN και DVB-T

Το πείραμα διεξάγεται δύο φορές και αφορά την κίνηση του τερματικού κατά μήκος της διαδρομής P1-P4 με ενεργή μια υπηρεσία του τύπου VSS. Η διαφοροποίηση μεταξύ των δυο επαναλήψεων του πειράματος έγκειται στην αλλαγή του κατωφλίου (*threshold*) στην πλευρά του τερματικού, σε σχέση με την τιμή του SNR για την οποία το δίκτυο WLAN θεωρείται μη διαθέσιμο, με στόχο την δημιουργία triggering event και συνεπώς την πραγματοποίηση διασυστηματικής μεταπομπής (*terminal-assisted handover*). Στην πρώτη περίπτωση η τιμή κατωφλίου ορίζεται στα 5dB, με αποτέλεσμα η διασυστηματική μεταπομπή να πραγματοποιείται την χρονική στιγμή που το τερματικό βρίσκεται μεταξύ των σημείων P3 και P4. Αντίστοιχα στη δεύτερη περίπτωση, με κατώφλι τα 10dB η δημιουργία του triggering event άρα και του handover, συμβαίνει κατά την διάρκεια της κίνησης του τερματικού μεταξύ των σημείων P2 και P3. Στα σχήματα που ακολουθούν (δηλαδή Σχήμα 4-29 και Σχήμα 4-30) απεικονίζονται οι διακυμάνσεις στον ρυθμό της ροής video (*video bit rate*) αλλά και στον ρυθμό των πλαισίων video (*video frame rate*), κατά την διάρκεια της κίνησης του τερματικού εκτός της περιοχής κάλυψης του δικτύου WLAN και για τις δύο τιμές του κατωφλίου διαθεσιμότητας του.



Σχήμα 4-29. Ρυθμός ροής video υπηρεσίας VSS κατά την διάρκεια μεταπομπής λόγω απώλειας ραδιοκάλυψης



Σχήμα 4-30. Ρυθμός βιντεοπλαισίων υπηρεσίας VSS κατά την διάρκεια μεταπομπής λόγω απώλειας ραδιοκάλυψης

Όπως ήταν αναμενόμενο το λιγότερο αυστηρό κατώφλι (5dB) σε συνδυασμό με το είδος της ενεργής υπηρεσίας στην πλευρά του τερματικού επιφέρει εντονότερη μείωση του επιπέδου ποιότητας (ο ρυθμός video frame rate ελαττώνεται ως και τα 9 fps) για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Αντίθετα η επιλογή πιο αυστηρού κατωφλίου (10dB) προλαμβάνει την εμφάνιση έντονων φαινομένων quality degradation, παρέχοντας ομαλότερη μετάβαση στο νέο δίκτυο (DVB-T/GPRS). Η κατάλληλη επιλογή του κατωφλίου σχετίζεται με το τύπο του ασύρματου δικτύου αλλά και το είδος των υπηρεσιών που «τρέχουν» στο τερματικό κάθε στιγμή, ενώ αποτελεί ένα ενδιαφέρον θέμα για παραπέρα μελέτη.

4.4 Ανακεφαλαίωση

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκαν, μια σειρά από μετρήσεις με στόχο την αξιολόγηση του ΠΑΕΔ σε σχέση με τις δυνατότητες του στην προσφορά πολυμεσικών εφαρμογών IP, τόσο σε επίπεδο συστήματος όσο και σε αυτό του χρήστη (system and user plane evaluation). Βασικό σημείο αποτέλεσε η πιστοποίηση των ωφελειών που προκύπτουν από την ενσωμάτωση του συστήματος DVB-T. Πιο συγκεκριμένα, διερευνήθηκαν εκτενώς οι επιδόσεις των επιμέρους ασύρματων δικτύων σε σχέση με την μετρική του RTD (σημαντική για τις TCP-based υπηρεσίες) και την μετρική του OWD (σημαντική για τις UDP-based υπηρεσίες). Στο ίδιο κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκε μια ενδελεχής αξιολόγηση του μηχανισμού κινητικότητας που υιοθετήθηκε, στα πλαίσια υλοποίησης της πειρακτικής πλατφόρμας, με χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την συμβατότητα των υπηρεσιών και την αντοχή τους, στα μεταβατικά φαινόμενα που εμφανίζονται κατά την διάρκεια των διασυστηματικών μεταπομπών (απώλεια πακέτων ή υπερβολική αύξηση του delay). Τέλος, μέσω της διεξαγωγής μιας σειράς από ρεαλιστικά σενάρια λειτουργίας, επιβεβαιώθηκε η αποτελεσματικότητα των συστημάτων DVB-T, στην αντιμετώπιση καταστάσεων συμφόρησης σε ένα από τα συνιστώσα μέρη του ΠΑΕΔ και στην περίπτωση απώλειας της ραδιοκάλυψης στην πλευρά του τερματικού. Η εκτέλεση των πιο πάνω σεναρίων κατέδειξε με τον πιο κατηγορηματικό τρόπο τα οφέλη που θα προκύψουν από την δημιουργία συστημάτων 4^{ης} Γενιάς αλλά και της ενσωμάτωσης σε αυτά των συστημάτων DVB-T.

Η ενασχόληση με την υλοποίηση του πρωτότυπου (σε παγκόσμιο επίπεδο) πειραματικού περιβάλλοντος συνεργαζόμενων ασύρματων συστημάτων, είχε σαν αποτέλεσμα την εις βάθος μελέτη όλων των πτυχών και των προβλήματά που απορρέουν από την υιοθέτηση των δικτύων 4^{ης} Γενιάς. Μια από τις βασικές διαπιστώσεις ήταν ότι η επιτυχία αυτού του είδους των συστημάτων θα εξαρτηθεί κυρίως από την σύγκλιση και την υποστήριξη από την πλευρά των ασύρματων δικτύων του πρωτοκόλλου IP και των νέων μηχανισμών διαχείρισης της κινητικότητας. Επιπλέον σημαντικότατο ρόλο θα διαδραματίσουν τα συστήματα διαχείρισης πόρων και προσφερόμενων υπηρεσιών. Οι βασικοί στόχοι τους θα είναι η μεγιστοποίηση του αριθμού των χρηστών που θα είναι σε θέση να υποστηρίξει ένα δίκτυο, παράλληλα με την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας. Προς την κατεύθυνση αυτή λοιπόν, τα επόμενα δυο κεφάλαια αφιερώνονται στην Διαχείριση Ασύρματων Πόρων (Radio Resource Management) στα πλαίσια συστημάτων 4G, επικεντρώνοντας στα IP-enabled DVB-T δίκτυα.

5 Διαχείριση Πόρων Ασυρμάτων Συστημάτων DVB-T στα πλαίσια ενσωμάτωσης τους σε Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς.

5.1 Εισαγωγή

Οι εξελίξεις στο τομέα των ασυρμάτων δικτύων, με διαρκώς αυξανόμενο το πλήθος αλλά και τις απαιτήσεις των προσφερόμενων υπηρεσιών, καθιστούν την λειτουργία της Διαχείρισης Πόρων Ασυρμάτων Δικτύων (*Radio Resource Management – RRM*) όλο και πιο σημαντική. Ειδικότερα, στην περίπτωση της δημιουργίας και λειτουργίας συστημάτων 4^{ης} Γενιάς, η ανάγκη για υλοποίηση διαδικασιών RRM ανά συνεργαζόμενο δίκτυο κρίνεται απόλυτα απαραίτητη. Πιο συγκεκριμένα, στα Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς οι συνθήκες στην Περιοχή Εξυπηρέτησης (*Service Area - SA*) μεταβάλλονται πιο έντονα και με γρηγορότερους ρυθμούς, εξαιτίας των παρακάτω καταστάσεων:

- Υπαρξη διαρκώς μετακινούμενων χρηστών (*high mobility conditions*).
- Συνεχείς αλλαγές του συνολικού αριθμού και των απαιτήσεων των ενεργών υπηρεσιών (*dynamic traffic behavior*) στην Περιοχή Εξυπηρέτησης.
- Επιπλέον, η εμφάνιση περιοχών κυκλοφοριακής συμφόρησης (*hot-spot areas*), οι ανταλλαγές του επιπρόσθετου κυκλοφοριακού φορτίου (*traffic exchanges*) μεταξύ των Δικτυακών Παρόχων (*Network Providers - NPs*) και οι περιπτώσεις απώλειας ραδιοκάλυψης συμβάλλουν ακόμα περισσότερο στην δημιουργία μεταβαλλόμενων συνθηκών.

Η στατική διαχείριση των δικτυακών πόρων (χωρητικότητα, φάσμα, ενέργεια εκπομπής και θέματα μετάδοσης) στα πλαίσια συστημάτων 4^{ης} Γενιάς δεν κρίνεται ικανοποιητική. Αντίθετα, είναι απολύτως απαραίτητη η ανεύρεση και υλοποίηση αλγορίθμων με βάση τους οποίους θα επιτυγχάνεται, σε πραγματικό χρόνο, ο δυναμικός επανακαθορισμός (*dynamic reconfiguration*) των παραμέτρων λειτουργίας, των επιμέρους ασυρμάτων δικτύων. Οι κύριοι στόχοι των αλγορίθμων αυτών θα είναι η μεγιστοποίηση του αριθμού των χρηστών που απολαμβάνουν διαφορετικού είδους υπηρεσίες, σε ικανοποιητικό επίπεδο ποιότητας, παράλληλα με την ελαχιστοποίηση της χρήσης πολύτιμων δικτυακών πόρων και του λειτουργικού κόστους από την πλευρά του NP. Γενικότερα, οι βασικοί λόγοι που οδηγούν στην υιοθέτηση πολιτικών και στρατηγικών RRM στα διαχειριζόμενα δίκτυα, συνοψίζονται στους παρακάτω [PR01] :

- Μέσω των διαδικασιών RRM, τα ασύρματα δίκτυα αποκτούν την δυνατότητα να υποστηρίξουν διαφορετικά επίπεδα ποιότητας ανά υπηρεσία και ανά χρήστη.
- Εξασφαλίζουν το απαιτούμενο επίπεδο ραδιοκάλυψης σε όλη την έκταση της Περιοχής Εξυπηρέτησης, όπως αρχικά είχε σχεδιαστεί κατά την ανάπτυξη του δικτύου.
- Βελτιστοποιούν την χρήση της προσφερόμενης χωρητικότητας αλλά και ελαχιστοποιούν την σπατάλη πολύτιμων πόρων όπως για παράδειγμα φάσμα ή ενέργεια.

Σημειώνεται ότι η βελτιστοποίηση των παραμέτρων λειτουργίας ενός ασύρματου δικτύου μέσω της χρήσης έξυπνων αλγορίθμων (*Radio Resource Algorithms – RRA*) αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία,

εξαρτώμενη από πολλούς παράγοντες. Η αναγκαιότητα για εξοικονόμηση δικτυακών πόρων και μείωση του κόστους λειτουργίας έχει στρέψει την προσοχή, μεγάλου μέρους της ερευνητικής κοινότητας στην ανακάλυψη βέλτιστων αλγορίθμων, με στόχο την επίλυση του προβλήματος RRM, για όλα τα ασύρματα δίκτυα.

Το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνει στην έννοια της διαχείρισης πόρων ασυρμάτων δικτύων στα πλαίσια πάντα συστημάτων 4^{ης} Γενιάς, δίδοντας ιδιαίτερη προσοχή σε παράγοντες όπως το φάσμα συχνοτήτων, τα επίπεδα εκπεμπόμενης ενέργειας και η διαχείριση της χωρητικότητας.

Η διάθρωση του κεφαλαίου έχει ως εξής: στην παράγραφο 5.2 παρουσιάζεται μια γενική διατύπωση του προβλήματος RRM στα ασύρματα δίκτυα. Η ίδια παράγραφος παρουσιάζει τις επιπλέον απαιτήσεις για την περίπτωση των ετερογενών συνεργαζόμενων δικτύων. Εν συνέχεια, η παράγραφος 5.3 αφιερώνεται στην περιγραφή των βασικών προβλημάτων Διαχείρισης Πόρων στα συστήματα DVB-T. Στην παράγραφο 5.4 παρουσιάζονται αναλυτικά τα οφέλη και οι περιορισμοί που απορρέουν από την χρήση της αρχιτεκτονικής SFN στην υλοποίηση των δικτύων DVB-T. Ειδικότερα, μέσω της χρήση προσομοίωσης παρουσιάζονται και αξιολογούνται χαρακτηριστικές περιπτώσεις τοπολογιών SFN. Η κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση της αρχιτεκτονική SFN, έπαιξε πολύ σημαντικό ρόλο στην κατεύθυνση δημιουργίας των προτεινόμενων αλγορίθμων, ενώ επιπλέον, τα συμπεράσματα που προκύπτουν στην παράγραφο 5.4, μας βοηθούν στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του κεφαλαίου 6. Στην συνέχεια και στην παράγραφο 5.5 θα προσδιοριστούν οι παράμετροι, οι περιορισμοί και οι στόχοι του προβλήματος της Διαχείρισης Πόρων σε πολλαπλά συστήματα DVB-T, αποκλειστικής παροχής υπηρεσιών IP με SFN αρχιτεκτονική. Τέλος η παράγραφος 5.6 αφιερώνεται στην απόδειξη του ότι το υπό εξέταση πρόβλημα ανήκει στην κατηγορία των NP-complete, μέσω της αναγωγής του σε δύο άλλα γνωστά προβλήματα, του bin packing και του graph coloring.

Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παράγραφο 5.7 όπου παρουσιάζεται μια συνοπτική ανακεφαλαίωση και τα συμπεράσματα

5.2 Γενική διατύπωση του προβλήματος RRM.

Στον χώρο των ασυρμάτων δικτύων (*Wireless Mobile Communication Systems*), που υλοποιούνται με την χρήση σταθερών υποδομών (*fixed Radio Access Ports – RAP*), το κυρίαρχο φαινόμενο είναι η κινητικότητα των χρηστών και η διαρκής απαίτησή τους για προσπέλαση υπηρεσιών, μέσω της ασύρματης σύνδεσης μεταξύ τερματικού και RAP. Στην λειτουργία τέτοιων συστημάτων, οι δυο βασικοί πρωταγωνιστές (NPs και Χρήστες) έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις. Ειδικότερα, η πλευρά του NP επιθυμεί την μεγιστοποίηση του κέρδους μέσω της ελαχιστοποίησης των χρησιμοποιούμενων πόρων αλλά και την αύξηση των χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα. Η πλευρά του χρήστη επιθυμεί το υψηλότερο επίπεδο ποιότητας (QoS) για τις υπηρεσίες που τον ενδιαφέρουν με το χαμηλότερο κόστος. Ο σκοπός του Resource Management (RM) είναι να συμβιβάσει τις δυο διαφορετικές οπτικές γωνίες κατά την διάρκεια ανάπτυξης και λειτουργίας ενός ασύρματου δικτύου [ZS01]. Η έννοια του RM εμφανίζει δυο διακριτές πλευρές. Η πρώτη αφορά τον αρχικό σχεδιασμό του δικτύου, όπως για παράδειγμα τον αριθμό και την επιλογή των κατάλληλων θέσεων για την τοποθέτηση των RAPs, τον καθορισμό του διαθέσιμου φάσματος κτλ. Η πλευρά αυτή είναι γνωστή και ως Wireless Network Design Problem (WNDP). Από την άλλη, η διαδικασία του RRM, αποτελεί το δεύτερο μέρος του RM και αφορά κυρίως την κατανομή και ρύθμιση των υπαρχόντων ασύρματων πόρων, κατά την διάρκεια λειτουργίας του δικτύου, με στόχο την ικανοποίηση των απαιτήσεων του NP και των χρηστών.

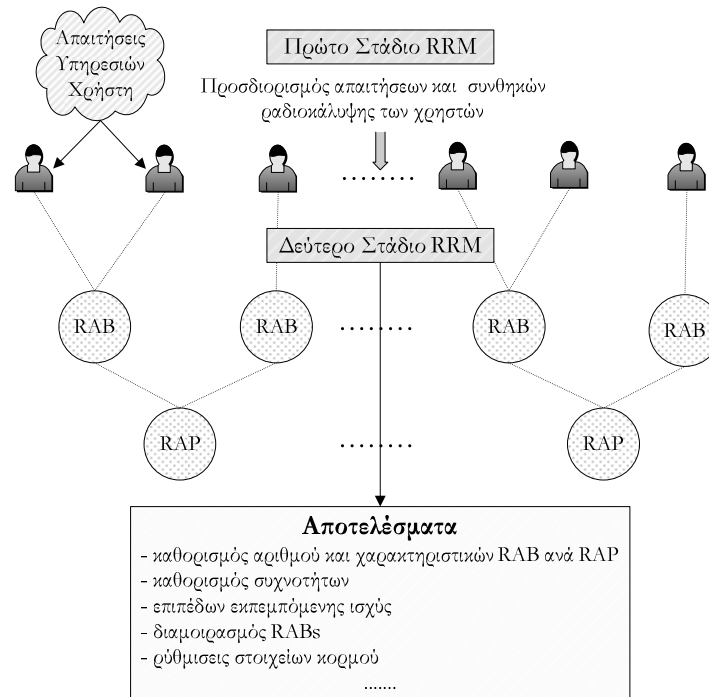
Κατά την διάρκεια παροχής υπηρεσιών στα ασύρματα δίκτυα, είτε στην περίπτωση μεταφοράς δεδομένων είτε φωνής, σπουδαίο ρόλο διαδραματίζει η κατάσταση του ασύρματου φορέα πρόσβασης (*Radio Access Bearer - RAB*) στο μέσο. Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του RAB συνοψίζονται στον ρυθμό μεταφοράς των δεδομένων, εάν θα διαμοιράζεται ταυτόχρονα μεταξύ πολλών χρηστών ή όχι και στα θέματα ραδιομετάδοσης, όπως είναι ο ελάχιστος επιτρεπτός λόγος σήματος προς παρεμβολή (*Signal-to-Interference Ratio – SIR*), η κωδικοποίηση κτλ. Σημειώνεται ότι κάθε RAP μπορεί να διαθέτει έναν ή περισσότερους RABs. Επιπλέον, οι απαιτήσεις των υπηρεσιών προσδιορίζονται συνήθως από το μέσο ρυθμό μεταφοράς των δεδομένων, το ρυθμό σφαλμάτων bit (ή *bit error rate - BER*) και τις μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές delay και delay variation. Η σχέση μεταξύ των απαιτήσεων των υπηρεσιών και των χαρακτηριστικών του RAB (*mapping QoS – RAB characteristics*) είναι άμεση και προσδιορίζεται από τους παρακάτω κανόνες [PR01] :

1. Ο συνολικός απαιτούμενος ρυθμός μεταφοράς των δεδομένων ανά RAB, αλλά και ο απαιτούμενος αριθμός τους ανά RAP, καθορίζεται από τις απαιτήσεις των υπηρεσιών των χρηστών σε χωρητικότητα.
2. Η επιλογή του αν ο RAB θα διαμοιράζεται ταυτόχρονα μεταξύ περισσοτέρων του ενός χρήστη (και κατ' επέκταση των χαρακτηριστικών του αλγορίθμου διαμοιρασμού)

καθορίζεται από τους περιορισμούς που θέτουν οι υπηρεσίες για τις μέγιστες τιμές delay και delay variation.

3. Τα θέματα που αφορούν τον τρόπο μετάδοσης που χρησιμοποιείται στην υλοποίηση του RAB (όπως ελάχιστη τιμή SIR, κωδικοποίηση κ.α.) καθορίζονται τόσο από τις απαιτήσεις των υπηρεσιών για τον παράγοντα BER (*Bit Error Rate*), τις συνθήκες ραδιοκάλυψης αλλά και την τιμή της απαιτούμενης χωρητικότητας.

Η συλλογή των πληροφοριών σχετικά με τις απαιτήσεις των χρηστών αλλά και των συνθηκών ραδιοκάλυψης αποτελεί το πρώτο στάδιο της διαδικασίας RRM. Έπειτα, ακολουθεί η εφαρμογή των παραπάνω κανόνων καθώς και ο σχεδιασμός (*engineering*) όλων των παραμέτρων λειτουργίας και διαθέσιμων πόρων του δικτύου, με στόχο την ικανοποίηση των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών. Οι διαθέσιμοι πόροι και λειτουργίες αναφέρονται στον καθορισμό του απαιτούμενου αριθμού RABs ανά RAP, στην ανάθεση των χρηστών στο καταλληλότερο RAB, στην επιλογή των συχνοτήτων λειτουργίας τους, τον καθορισμό των επιπέδων εκπεμπόμενης ισχύς και των θεμάτων μετάδοσης, τόσο στους σταθμούς πρόσβασης όσο και στα τερματικά. Επιπλέον καθορίζονται τα θέματα των προτεραιοτήτων στον διαμοιρασμό του RAB ανάμεσα στους χρήστες και στην ρύθμιση της λειτουργίας των στοιχείων κορμού του ασύρματου δικτύου. Στο Σχήμα 5-1 απεικονίζονται τα επίπεδα (στάδια), που ακολουθούνται κατά την διάρκεια υλοποίησης των διαδικασιών RRM σε οποιοδήποτε ασύρματο δίκτυο. Φυσικά, ανάλογα με τις δυνατότητες και τις ιδιομορφίες της ασύρματης τεχνολογίας αλλά και τις τεχνικές υλοποίησης που ακολουθούνται κατά την διάρκεια του σχεδιασμού των διαδικασιών RRM, τα στάδια που μόλις προδιαγράφηκαν μπορεί να διαφοροποιηθούν. Έχοντας ήδη από την παράγραφο της εισαγωγής παρουσιάσει επιχειρήματα που αποδεικνύουν την χρησιμότητα της λειτουργίας RRM, στην συνέχεια αναλύονται οι αιτίες που καθιστούν τέτοιου είδους προβλήματα τόσο πολύπλοκα.



Σχήμα 5-1. Στάδια διαδικασίας RRM

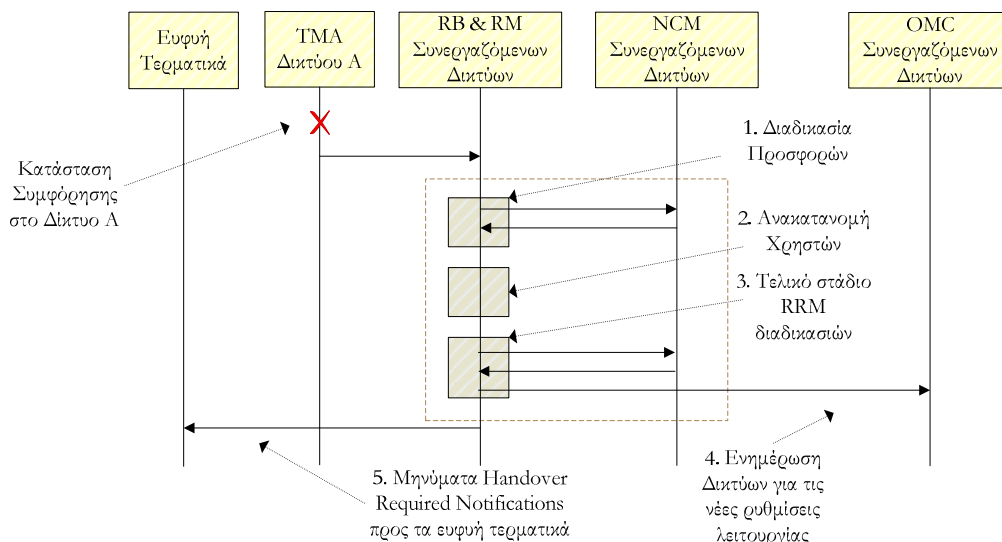
Η σειρά των προβλημάτων που καλούνται να επιλύσουν οι διαδικασίες RRM ανήκουν συνήθως στην κατηγορία των *NP-complete* προβλημάτων. Ακόμη και η αναγωγή τους σε κάποιο γνωστό *NP-complete* πρόβλημα είναι μια πολύ επίπονη διαδικασία, η οποία δεν στέφεται πάντα από επιτυχία. Η πολυπλοκότητα τους οφείλεται στην ύπαρξη πολλών παραγόντων που πρέπει ταυτόχρονα να ρυθμιστούν, με στόχο τον προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης. Για παράδειγμα το επίπεδο εκπεμπόμενης ενέργειας εξαρτάται από τις δυνατότητες και τους περιορισμούς που υπαγορεύονται από την πολιτική εξοικονόμησης ισχύος που ακολουθείται στην πλευρά του τερματικού, αλλά και από θέματα που έχουν να κάνουν με τα ανώτατα επιτρεπτά επίπεδα ακτινοβολίας. Επιπλέον, το χαμηλό επίπεδο εκπεμπόμενης ενέργειας οδηγεί σε μικρότερη ακτίνα κάλυψης, άρα στην ανάγκη για πυκνότερη δομή δικτύου (περισσότερα *RAPs*). Αντίθετα η χρήση υψηλότερων επιπέδων ενέργειας οδηγεί σε μείωση του κόστους ανάπτυξης του δικτύου (*network deployment*), αλλά επιτείνει το φαινόμενο των παρεμβολών, με αποτέλεσμα την αύξηση του χρησιμοποιημένου φάσματος.

Ο στόχος των διαδικασιών RRM για ταυτόχρονη ρύθμιση όλων των αντικρουόμενων παραγόντων που τις συνθέτουν, κατά τρόπο βέλτιστο (συνήθως η βελτιστοποίηση ανάγεται στη επίτευξη του μικρότερου δυνατού κόστους), με τελικό σκοπό την ικανοποίηση όσο πιο πολλών χρηστών είναι δυνατόν, αναδεικνύουν την πολυπλοκότητα της φύσης των προβλημάτων αυτών, με τρόπο ξεκάθαρο. Ακολουθούν στην επόμενη παράγραφο, οι επιπλέον απαιτήσεις των διαδικασιών RRM για την περίπτωση των συστημάτων 4^η Γενιάς.

5.2.1 Απαιτήσεις διαδικασιών RRM στα πλαίσια λειτουργίας των Δικτύων 4^{ης} Γενιάς

Η συνεργασία μεταξύ περισσότερων του ενός ασύρματου δικτύου, στα πλαίσια υλοποίησης συστημάτων 4^{ης} Γενιάς, προσθέτει ένα ακόμα επίπεδο απαιτήσεων στην λειτουργία των διαδικασιών RRM. Πιο συγκεκριμένα, σε τέτοιου είδους συστήματα οι διαδικασίες RRM θα πρέπει να είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν την παρακάτω κατάσταση:

Προσφορές/Ανταλλαγές κυκλοφοριακού φορτίου μεταξύ των συνεργαζόμενων δικτύων. Στην περίπτωση αντιμετώπισης συνθηκών κυκλοφοριακής συμφόρησης σε ένα από τα μέλη του περιβάλλοντος 4^{ης} Γενιάς, η διαχειριστική οντότητα αρχίζει την αποστολή προς τα υπόλοιπα δίκτυα, αιτήσεων για προσφορές χωρητικότητας με στόχο την εξυπηρέτηση του επιπλέον φορτίου. Τα συνεργαζόμενα δίκτυα με την σειρά τους, θα πρέπει να ανταποκριθούν με τον προσδιορισμό του ύψους του μέγιστου φορτίου που μπορούν να δεχτούν στην υποπεριοχή που παρατηρείται το φαινόμενο της συμφόρησης. Η απάντηση θα προέρθει μέσω της ξεχωριστής εφαρμογής των διαδικασιών RRM ανά συνεργαζόμενο δίκτυο. Επιπλέον, αφού η διαχειριστική οντότητα καταλήξει στο τρόπο της αποδοτικότερης κατανομής των χρηστών ανάμεσα στα συνεργαζόμενα δίκτυα, πάλι μέσω των διαδικασιών RRM θα πρέπει να επαναπροσδιοριστούν οι ρυθμίσεις λειτουργίας τους, με συγκεκριμένα πια τα δεδομένα εισόδου (δηλαδή τον ακριβή αριθμό των χρηστών, των απαιτήσεων τους και των συνθηκών ραδιοκάλυψής τους). Έτσι επιτυγχάνεται η επιτυχής υποδοχή των νέων χρηστών και η βελτιστοποιημένη χρήση των δικτυακών πόρων ανά συνεργαζόμενο δίκτυο. Ακολουθώντας της δομή και την ορολογία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3, για την διαχειριστική οντότητα του πειραματικού Δικτύου 4^{ης} Γενιάς, το επόμενο σχήμα απεικονίζει τα βήματα που ακολουθούνται κατά την διάρκεια του πιο πάνω σεναρίου. Υπενθυμίζεται ότι το δομοστοιχείο NCM (*Network Configuration Manager*), στην συγκεκριμένη πλατφόρμα, είναι υπεύθυνο για την υλοποίηση των διαδικασιών RRM.



Σχήμα 5-2. Διαδικασία Προσφορών-Ανταλλαγών κυκλοφοριακού φορτίου μεταξύ των συνεργαζόμενων δικτύων.

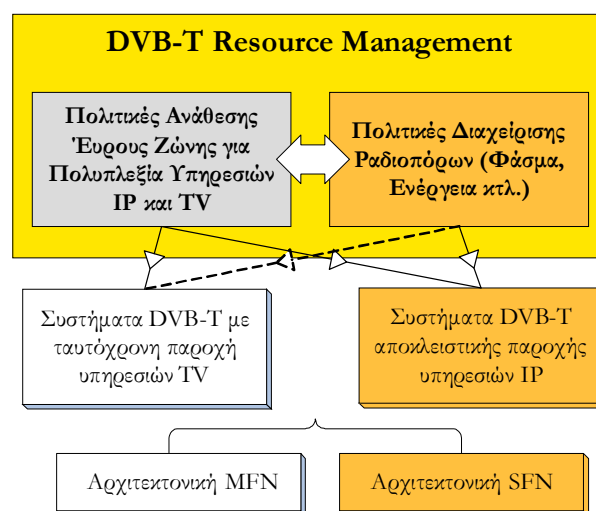
Στην συνέχεια του κεφαλαίου ακολουθεί η περιγραφή του RRM προβλήματος για την περίπτωση των δικτύων DVB-T.

5.3 Προβλήματα Διαχείρισης Πόρων σε συστήματα DVB-T.

Τα προβλήματα Διαχείρισης Πόρων στα συστήματα DVB-T διαχωρίζονται στις εξής δυο μεγάλες κατηγορίες (βλέπε Σχήμα 5-3) :

- Πολιτικές Ανάθεσης του διαθέσιμου εύρους ζώνης ανά σύστημα DVB-T (εννοώντας ανά φορέα/συχνότητα).
- Πολιτικές Διαχείρισης Ραδιοπόρων, όπως φάσμα, ενέργεια και διάθρωση των SFN.

Για την πρώτη κατηγορία προβλημάτων έχουν ήδη προταθεί μια σειρά από λύσεις όπως αυτή των [GA+03], στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος MAMBO. Όμως για την δεύτερη κατηγορία η ερευνητική δραστηριότητα είναι σχεδόν ανύπαρκτη. Βασικός λόγος αποτελεί η συνύπαρξη των τηλεοπτικών προγραμμάτων με τις υπηρεσίες δεδομένων. Οι πολιτικές επαναρύθμισης των παραμέτρων λειτουργίας ενός συστήματος DVB-T κατά την διάρκεια παροχής και τηλεοπτικών υπηρεσιών δεν είναι επιθυμητή από τους Broadcast παροχείς, μια και είναι δυνατόν να έχει απρόβλεπτες συνέπειες στους τηλεοπτικούς χρήστες.



Σχήμα 5-3. Προβλήματα Διαχείρισης Πόρων σε συστήματα DVB-T.

Ήδη όμως τα σημαντικά οφέλη που απορρέουν από την ενσωμάτωση των συστημάτων DVB-T σε Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς, όπως έγινε φανερό και στα προηγούμενα κεφάλαια, ανοίγει το δρόμο για την χρήση τους ως συστήματα αποκλειστικής παροχής υπηρεσιών IP. Σημειώνεται ότι η επέκταση του πρότυπου DVB-T, γνωστό ως DVB-H, προορίζεται αποκλειστικά για την παροχή υπηρεσιών IP. Στην περίπτωση αυτή, οι Πολιτικές Διαχείρισης Ραδιοπόρων (RRM), κρίνονται απαραίτητες για την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων των συστημάτων αυτών. Επιπλέον, στα συστήματα DVB-T (όπου γίνεται χρήση της διαμόρφωσης OFDM) πολύ σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η αρχιτεκτονική SFN, της οποίας οι βασικές αρχές παρουσιάστηκαν στον Κεφάλαιο 2. Μέσω της εν

λόγω μεθοδολογίας για την οργάνωση των συστημάτων DVB-T, επιτυγχάνεται η εκτεταμένη ραδιοκάλυψη αλλά και η εξοικονόμηση πόρων σε σχέση με τα απαιτούμενα δικτυακά στοιχεία για την κάλυψη των αναγκών των χρηστών σε χωρητικότητα. Στην παράγραφο που ακολουθεί παρουσιάζονται αναλυτικά τα βασικά πλεονεκτήματα της αρχιτεκτονικής SFN σε σχέση με την αρχιτεκτονική MFN.

Με βάση την ως τώρα ανάλυση στην συνέχεια του κεφαλαίου θα προσδιοριστούν οι παράμετροι, οι περιορισμοί και οι στόχοι του προβλήματος της Διαχείριση Πόρων σε πολλαπλά συστήματα DVB-T, αποκλειστικής παροχής υπηρεσιών IP με αρχιτεκτονική SFN.

5.4 Αξιολόγηση Αρχιτεκτονικής SFN μέσω Προσομοίωσης.

Ας υποθέσουμε ότι η πυκνότητα χρηστών στην Περιοχή Εξυπηρέτησης ενός συστήματος DVB-T που υλοποιείται με την χρήση ενός μόνο δικτύου SFN είναι ω (χρήστες ανά μονάδα έκτασης της Περιοχής Εξυπηρέτησης – Service Area). Ο συνολικός αριθμός χρηστών δίνεται από την σχέση $\omega \cdot SA$, όπου SA η έκταση της Περιοχής Εξυπηρέτησης. Επίσης, τα αίτια αποτυχίας εξυπηρέτησης του χρήστη οφείλονται είτε στην ανεπάρκεια του δικτύου σε χωρητικότητα, είτε εξαιτίας του φαινομένου της μη επαρκούς ραδιοκάλυψης του. Το ποσοστό αποτυχίας περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση :

$$fr = \frac{c_f + i_f}{\omega \cdot SA} = fr_c + fr_i \quad (1)$$

όπου c_f και $fr_c = \frac{c_f}{\omega \cdot SA}$ είναι ο ακριβής αριθμός και το ποσοστό χρηστών που απέτυχαν εξαιτίας

ανεπάρκειας του δικτύου λόγω χωρητικότητας, ενώ i_f και $fr_i = \frac{i_f}{\omega \cdot SA}$, ο αριθμός και το ποσοστό χρηστών με ανεπαρκή ραδιοκάλυψη.

Ο c_f (άρα και ο fr_c) παράγοντας εξαρτάται από την τιμή του ω , δεδομένου ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών που επιθυμούν εξυπηρέτηση μέσω του δικτύου DVB-T, τόσο θα αυξάνει και ο αριθμός αυτών που αποτυγχάνουν λόγω εξάντλησης της διαθέσιμης χωρητικότητας. Στα δίκτυα DVB-T ο παράγοντας αξιολόγησης του επιπέδου ραδιοκάλυψης, ο οποίος μάλιστα συνδέεται άμεσα με το επίπεδο ποιότητας του καναλιού, άρα και γενικότερα των προσφερόμενων υπηρεσιών (*Carrier/Interference to QoS mapping*) είναι η τιμή του $\Gamma_{sfni,g}$ (Σηματοθορυβικός Λόγος), όπως θα παρουσιαστεί και θα αναλύθηκε στην παράγραφο 5.5.2. Συνεπώς η συνθήκη αποτυχίας λόγω ανεπαρκούς ραδιοκάλυψης είναι η $\Gamma_{sfni,g} \geq \gamma_o$, όπου γ_o η ελάχιστη τιμή, όπως αυτή προκύπτει από τις παραμέτρους μετάδοσης του σήματος DVB-T.

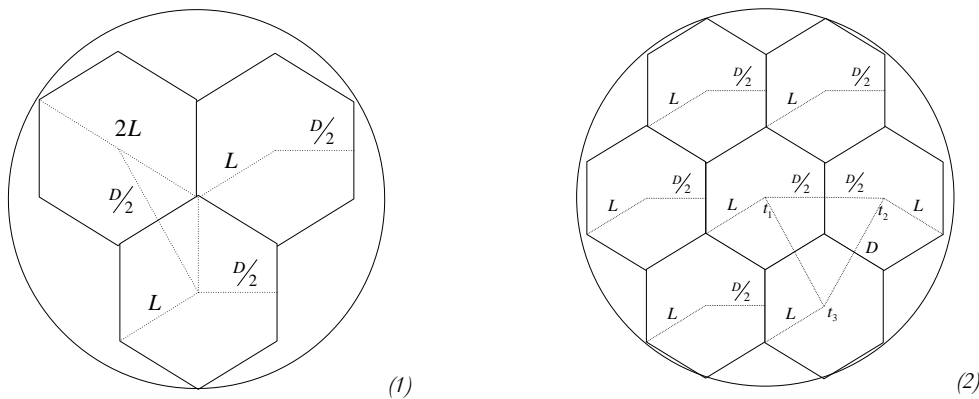
Η γενική συνθήκη που περιγράφει τη πιθανότητα αποτυχίας εξυπηρέτησης ενός χρήστη σε ένα δίκτυο DVB-T, που ακολουθεί την αρχιτεκτονική SFN, δίδεται από την παρακάτω σχέση :

$$P_{outage} = \Pr \left\{ \Gamma_{sfni,g} < \gamma_o \right\} + \Pr \left\{ sn_{cap} = sn_{cap}^{max} \right\} \quad (2)$$

Αν η τιμή του παράγοντα ω κινείται σε επίπεδα συμβατά με την χωρητικότητα του δικτύου, τότε ο δεύτερος παράγοντας της σχέσης 2 μηδενίζεται, οδηγώντας στην παρακάτω εξίσωση:

$$P_{outage} = \Pr\{\Gamma_{sfni, g} < \gamma_o\} \quad (3)$$

Στην συνέχεια μέσω προσομοίωσης υπολογίζεται η πιο πάνω πιθανότητα για τις περιπτώσεις δικτύων SFN, τα οποία αποτελούνται από έναν, τρεις, επτά και δεκαεννιά πομπές, αντίστοιχα (στο Σχήμα 5-4 απεικονίζονται ενδεικτικά οι τοπολογίες για την περίπτωση των επτά και εννέα πομπών). Για τις ανάγκες της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο διάδοσης σήματος, όπως περιγράφεται από τις εξισώσεις των Walfisch-Ikegami (*line-of-sight – LOS*) [COST231].



Σχήμα 5-4. Χαρακτηριστικές τοπολογίες SFN δικτύων με τρεις (1) και επτά (2) πομπές

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αφορούσαν την τιμή της P_{outage} για όλες τις πιθανές τιμές του guard interval T_g , για ενέργεια εκπομπής ανά πομπό ίση με 100Watt και τιμή γ_o 10dB. Η ακτίνα κάλυψης που εμφανίζεται στον οριζόντιο άξονα ταυτίζεται με την ακτίνα του κύκλου που απεικονίζεται στο Σχήμα 5-4 και για τις δύο περιπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα, αν L η ακτίνα της κάθε νοητής κυψέλης που δημιουργείται από ένα πομπό και D η απόσταση μεταξύ δυο πομπών, με $D = \sqrt{3}L$, η τιμή της ακτίνας (*Area Radius*) της Περιοχής Εξυπηρέτησης ανά τοπολογία SFN δίδεται από τις παρακάτω σχέσεις:

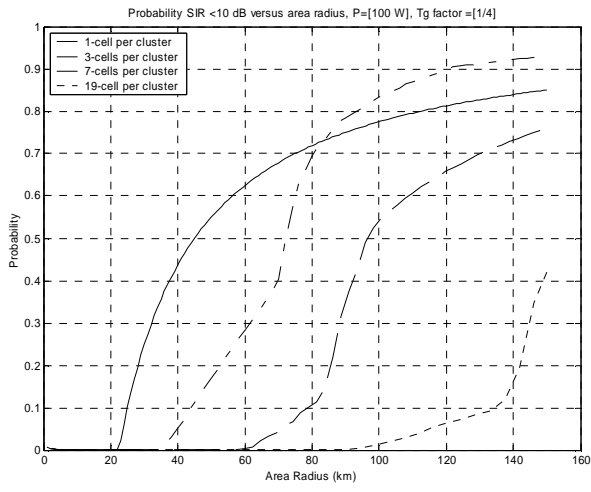
- **SFN με ένα πομπό**: *Area Radius* = L .
- **SFN με τρεις πομπές**: *Area Radius* = $2L$.
- **SFN με επτά πομπές**: από τον νόμο των συνημίτονων προκύπτει ότι:

$$(\text{Area Radius})^2 = L^2 + D^2 + LD = 4L^2 + \sqrt{3}L^2 = (4 + \sqrt{3})L^2 \Rightarrow \text{Area Radius} = \sqrt{(4 + \sqrt{3})}L$$

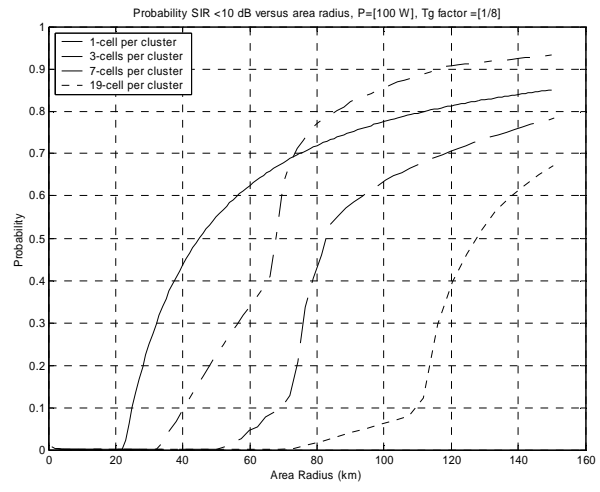
- **SFN με δεκαεννέα πομπές**: με τον ίδιο τρόπο προκύπτει ότι

$$(\text{Area Radius})^2 = L^2 + 4D^2 + 2LD = 15L^2 + 2\sqrt{3}L^2 = (15 + 2\sqrt{3})L^2 \Rightarrow \text{Area Radius} = \sqrt{(15 + 2\sqrt{3})}L$$

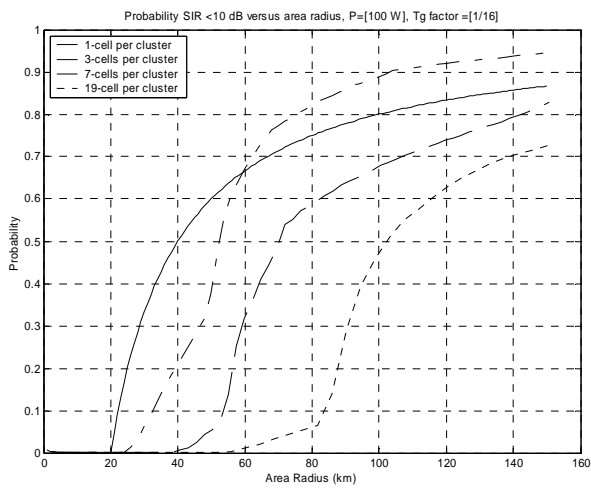
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδωσαν τα παρακάτω αποτελέσματα.



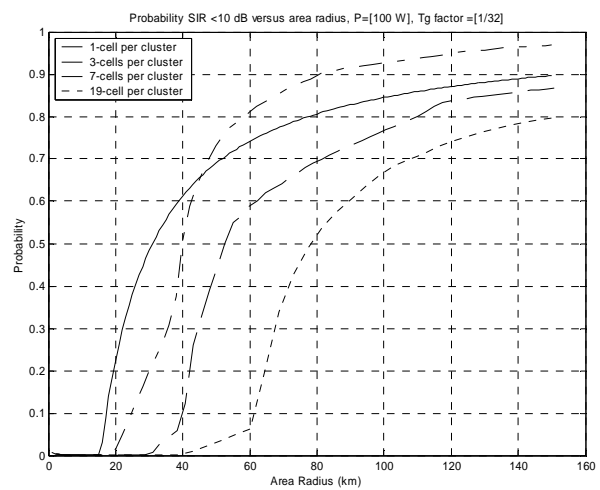
(1)



(2)



(3)

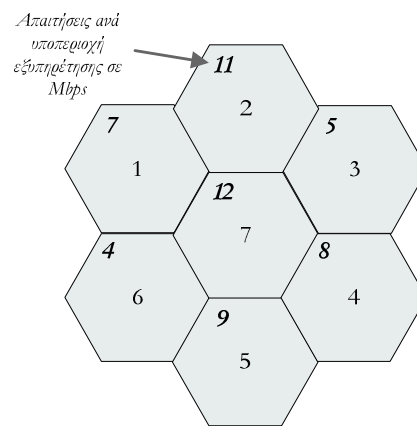


(4)

Σχήμα 5-5. P_{outage} πιθανότητα για περιπτώσεις SFN με ένα, τρεις, επτά και δεκαεννιά πομπούς, για όλες τις δυνατές τιμές της μεταβλητής T_g , $1/4 T_U$ – (1), $1/8 T_U$ – (2), $1/16 T_U$ – (3), $1/32 T_U$ – (4).

Είναι φανερό ότι η χρήση της αρχιτεκτονικής SFN επιτρέπει την ικανοποιητική κάλυψη μεγάλων περιοχών με πιθανότητα αποτυχίας κοντά στο μηδέν. Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείτε ότι καθώς μειώνεται η τιμή της μεταβλητής T_g , μειώνεται και η συνολική ακτίνα της Περιοχής Εξυπηρέτησης, όπου ο λόγος SIR παραμένει πάνω από 10dB. Οι μικρές τιμές του παράγοντα T_g , κατά την διάρκεια της διαμόρφωσης OFDM του σήματος DVB-T, οδηγούν σε αύξηση της συνολικής χωρητικότητας ανά συχνότητα, αλλά και σε μεγαλύτερη ευαισθησία στην περίπτωση εκτεταμένης καθυστέρησης στον χρόνο διάδοσης του σήματος. Όσο αυξάνει η απόσταση (L) των πομπών (άρα και η συνολική έκταση της Περιοχής Εξυπηρέτησης), αυξάνει και ο χρόνος διάδοσης του σήματος από τον κάθε πομπό προς τον τελικό χρήστη. Με την σειρά της η αύξηση της καθυστέρησης διάδοσης των σημάτων που λαμβάνει ο δέκτης, οδηγεί στην παραβίαση του χρονικού ορίου ασφάλειας T_g , με αποτέλεσμα να επιτείνονται τα φαινόμενα παρεμβολών. Μια πάρα πολύ σημαντική διαπίστωση που προέκυψε μέσω των παραπάνω προσομοιώσεων, είναι ότι οι χρήστες που

επηρεάζονται περισσότερο από τα φαινόμενα παρεμβολών, είναι αυτοί που βρίσκονται στην συνοριακή γραμμή της κάθε νοητής κυψέλης που δημιουργείται γύρω από τον κάθε πομπό. Αντίθετα οι χρήστες που βρίσκονται εγγύτερα σε κάποιον αναμεταδότη (εσωτερική περιοχή), επηρεάζονται λιγότερο, αφού κατά την διάρκεια υπολογισμού του λόγου SIR, κυριαρχεί το σήμα που καταφθάνει από τον κοντινό τους πομπό. Η παραπάνω παρατήρηση συνέβαλλε ουσιαστικά στην υλοποίηση του αλγορίθμου που θα παρουσιαστεί αμέσως μετά, αφού βοήθησε στην μείωση της πολυπλοκότητας και του αριθμού των πράξεων που απαιτούνται για την επίλυση του προβλήματος RRM, στα δίκτυα αυτά. Τέλος, ακολουθεί ένα απλό παράδειγμα, το οποίο αποδεικνύει τα οφέλη της χρήσης της αρχιτεκτονικής SFN σε σχέση με την αρχιτεκτονική MFN. Έστω η περιοχή εξυπηρέτησης, όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5-6). Στο αριστερό άνω μέρος κάθε υποπεριοχής εξυπηρέτησης αναγράφεται η συνολική ζήτηση σε χωρητικότητα.



Σχήμα 5-6. Περιοχή Εξυπηρέτησης – Σύγκριση SFN-MFN

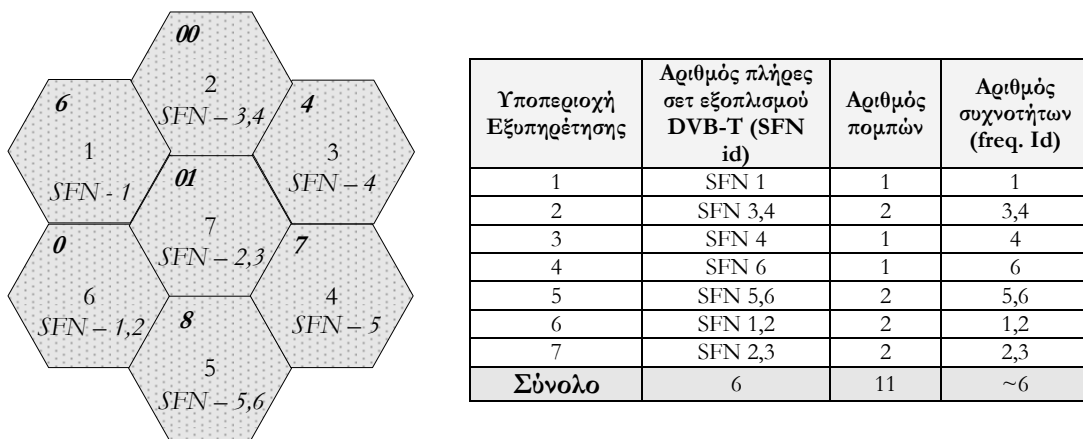
Η σύνθεση των δικτύων DVB-T, στην περίπτωση της αρχιτεκτονικής MFN, θα συνοψιζόταν ως εξής: ένα πλήρες σετ εξοπλισμού DVB-T (πολυπλέκτης, διαμορφωτής, κτλ.) ανά πομπό ανά συχνότητα λειτουργίας, με χωρητικότητα η οποία θα προσδιοριζόταν από τις παραμέτρους λειτουργίας (έστω για του σκοπούς του παραδείγματος οι παράμετροι διαμόρφωση: 16-QAM, code rate: $1/2$, γ_s : 9,6dB, $T_g = 1/4 T_u$, ρυθμός 9,95 Mbps). Συνεπώς για την αποτελεσματική κάλυψη της παραπάνω τοπολογίας θα χρειαζόντουσαν 9 διαφορετικά δίκτυα MFN DVB-T, με δομή η οποία παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα. Ο αριθμός των συχνοτήτων ενδέχεται να μειωθεί σε περίπτωση όπου το επίπεδο το παρεμβολών επέτρεπε την επαναχρησιμοποίηση τους.

| Υποπεριοχή Εξυπηρέτησης | Αριθμός πλήρες σετ εξοπλισμού DVB-T (MFN id) | Αριθμός πομπών | Αριθμός συχνοτήτων |
|-------------------------|--|----------------|--------------------|
| 1 | MFN 1 | 1 | 1 |
| 2 | MFN 2,3 | 2 | 2 |
| 3 | MFN 4 | 1 | 1 |
| 4 | MFN 5 | 1 | 1 |
| 5 | MFN 6 | 1 | 1 |
| 6 | MFN 7 | 1 | 1 |
| 7 | MFN 8,9 | 2 | 2 |
| Σύνολο | 9 | 1 | ~9 |

Πίνακας 5-1. Δομή δικτύων DVB-T με χρήση της αρχιτεκτονικής MFN

Είναι προφανές ότι η αρχιτεκτονική MFN, οδηγεί σε σπατάλη των διαθέσιμων πόρων, αφού από τα 90 Mbps διαθέσιμης χωρητικότητας, που η συγκεκριμένη διάθροση δικτύου προσφέρει, χρησιμοποιούνται μόνο τα 56. Σημειώνεται εδώ ότι ο θεωρητικός ελάχιστος αριθμός διαφορετικών δικτύων DVB-T (τύπου SFN ή MFN), όταν χρησιμοποιείται το ίδιο σετ παραμέτρων για την διαμόρφωση του σήματος DVB-T που εκπέμπουν, δίνεται από την σχέση $\lceil Total\ Traffic / cap_{sfm} \rceil$ και για την περίπτωση του παραδείγματος είναι ίσος με 6.

Στην συνέχεια, η σύνθεση των δικτύων DVB-T, στην περίπτωση της αρχιτεκτονικής SFN, θα επέτρεπε εκτός των άλλων την επέκτασή τους σε γειτονικές υποπεριοχές (μέσω της τοποθέτησης ενός επιπλέον πομπού), στην περίπτωση διαθέσιμης χωρητικότητας. Με βάση αυτή την παρατήρηση και την χρήση του αλγορίθμου που θα παρουσιαστεί στην συνέχεια, στο σχήμα (Σχήμα 5-7) που ακολουθεί, απεικονίζεται η δομή των δικτύων DVB-T και τα αντίστοιχα στατιστικά μεγέθη, όπως για την περίπτωση της αρχιτεκτονικής MFN.



Σχήμα 5-7. Δομή δικτύων DVB-T με χρήση της αρχιτεκτονικής SFNs

Η βελτίωση που επιτυγχάνεται, μέσω της χρήσης της αρχιτεκτονικής SFN, τόσο με την μείωση του κόστους για την απόκτηση του απαραίτητου εξοπλισμού DVB-T, αλλά και σε σχέση με τον αριθμό των συχνοτήτων που απαιτούνται, για την κάλυψη των αναγκών της περιοχής εξυπηρέτησης είναι προφανής. Στην συνέχεια του κεφαλαίου θα παρουσιαστούν οι παράμετροι, οι περιορισμοί και οι στόχοι του προβλήματος της Διαχείριση Πόρων σε πολλαπλά συστήματα DVB-T, αποκλειστικής παροχής υπηρεσιών IP με SFN αρχιτεκτονική.

5.5 Διαχείριση Πόρων σε πολλαπλά συστήματα DVB-T, αποκλειστικής παροχής υπηρεσιών IP, με αρχιτεκτονική SFN

Το σετ των προβλημάτων που συνθέτουν τις διαδικασίες RRM στα συστήματα IP-enabled DVB-T, τα οποία οργανώνονται μέσω της SFN αρχιτεκτονικής συνοψίζονται στις εξής κατηγορίες :

- Προσδιορισμός του αριθμού και των σημείων ανάπτυξης (*RAPs* ή *sites*) των απαιτούμενων πομπών (*transmitters*) των δικτύων SFN (στον ρόλο του *RAB*), με σκοπό την κάλυψη των αναγκών της Περιοχής Εξυπηρέτησης σε χωρητικότητα και επίπεδο λαμβανόμενου σήματος.
- Καθορισμός της συχνότητας λειτουργίας ανά SFN, με στόχο την μεγιστοποίηση του παράγοντα επαναχρησιμοποίησης και ελαχιστοποίηση του επιπέδου παρεμβολών.
- Προσδιορισμός των επιπέδων εκπεμπόμενης ενέργειας σε κάθε πομπό ανά δίκτυο SFN.
- Ανάθεση των χρηστών στο κατάλληλο SFN με στόχο την εξυπηρέτηση των αιτούμενων υπηρεσιών τους.

5.5.1 Δεδομένα Εισόδου – Συμβολισμός Παραμέτρων

Πριν προχωρήσουμε στην μαθηματική διατύπωση του σετ των προβλημάτων που μόλις παρουσιάστηκαν, αλλά και των περιορισμών και στόχων που συνθέτουν συνολικά την λειτουργία RRM, στα δίκτυα IP-enabled DVB-T, ακολουθεί ο ορισμός και ο συμβολισμός των παραμέτρων εισόδου. Πιο συγκεκριμένα ορίζονται τα εξής:

- Το σύνολο των διαθέσιμων θέσεων (*S-sites*), στο γεωγραφικό χώρο της Περιοχής Εξυπηρέτησης του δικτύου DVB-T, όπου υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης και λειτουργίας πομπών SFN. Το σύνολο αυτό ορίζεται ως εξής: $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, όπου $s_i = \{x_i, y_i, n_i\}$ μια διαθέσιμη θέση με x_i, y_i τις γεωγραφικές συντεταγμένες της και n_i τον μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό πομπών στη θέση αυτή. Ο καθορισμό των θέσεων (*RAPs*), καθώς και των διαθέσιμων συχνοτήτων, αλλά και του μέγιστου αριθμού πομπών, αποτελούν το αντικείμενο του WNDP.
- Το σύνολο των διαθέσιμων συχνοτήτων $F = \{f_1, f_2, \dots, f_k\}$, στην περιοχή του φάσματος λειτουργίας των δικτύων DVB-T.
- Το σύνολο των διαθέσιμων πομπών (*T-Transmitters*), οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην διάρκεια του δυναμικού deployment των δικτύων SFN. Το σύνολο αυτό ορίζεται ως εξής: $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ όπου $t_j = \{x_j, y_j, p_j\}$ ένας πομπός, τοποθετημένος σε μια από τις διαθέσιμες θέσεις (δηλαδή $t_j \in s_i \Leftrightarrow x_j = x_i$ και $y_j = y_i$) και με επίπεδο εκπεμπόμενης ενέργειας ίσο με p_j . Σημειώνεται ότι κάθε πομπός μπορεί να ανήκει σε ένα και μόνο δίκτυο SFN και η μέγιστη τιμή εκπεμπόμενης ενεργείας δίδεται από την σχέση $p_j \leq P_{\max}$.
- Το σύνολο των ομάδων χρηστών *GU* (*groups of users*). Κάθε ομάδα χρηστών αποτελείται από έναν αριθμό διακριτών τερματικών, συγκεντρωμένα σε μια υποπεριοχή της Service Area, στα οποία «τρέχουν» υπηρεσίες IP, με συγκεκριμένες απαιτήσεις σε χωρητικότητα. Το σύνολο αυτό ορίζεται ως εξής: $GU = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$, όπου $g_k = \{x_k, y_k, cap_{g_k}\}$ μια

ομάδα χρηστών, x_k, y_k οι γεωγραφικές συντεταγμένες της θέσης τους στην Service Area και $cap_{g,k}$ οι απαιτήσεις τους σε χωρητικότητα. Οι πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση των χρηστών, αλλά και για την ακριβή θέση τους, μπορεί να προέρχονται από την διεπαφή $G_{\Delta-TSMS}$.

Επιπλέον ορίζονται τα παρακάτω:

- Κέρδος σύνδεσης $G_{g,t}$ (*link gain*) μεταξύ μιας ομάδας χρηστών g και ενός πομπού t . Η τιμή της μεταβλητής αυτής εξαρτάται από την μεταξύ τους απόσταση και τις συνθήκες διάδοσης του σήματος που επικρατούν. Παρακάτω δίδεται ο πίνακας με τις τιμές link gain για κάθε ομάδα χρηστών, σε σχέση με όλους τους ενεργούς πομπούς στην Περιοχή εξυπηρέτησης:

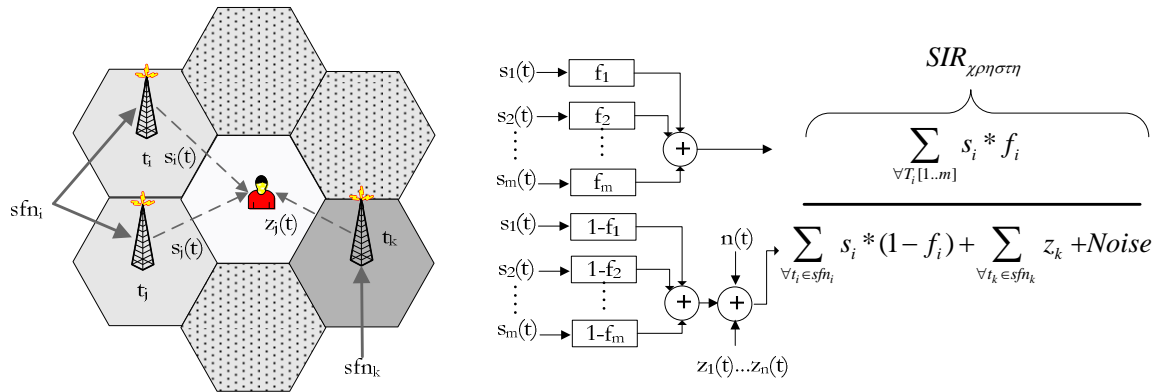
$$G = T_{n \times 1} \times GU_{1 \times m} = \begin{bmatrix} G_{t_1, g_1} & G_{t_1, g_2} & \cdots & G_{t_1, g_{m-1}} & G_{t_1, g_m} \\ G_{t_2, g_1} & G_{t_2, g_2} & \cdots & G_{t_2, g_{m-1}} & G_{t_2, g_m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{t_n, g_1} & G_{t_n, g_2} & \cdots & G_{t_n, g_{m-1}} & G_{t_n, g_m} \end{bmatrix}$$

- Ενέργεια Σήματος $P_{g,t}$ που αντιλαμβάνονται τα τερματικά μιας ομάδας χρηστών g , εξαιτίας της λειτουργίας του πομπού t . Η τιμή της μεταβλητής αυτής δίνεται από την σχέση $P_{g,t} = P_t \cdot G_{g,t}$, όπου P_t είναι το επίπεδο εκπεμπόμενης ενέργειας από τον πομπό t και $G_{g,t}$ το κέρδος σύνδεσης (*link gain*).
- Ο λόγος σήματος προς παρεμβολή (*Signal-to-Interference Ratio*) μιας ομάδας χρηστών g που ανατίθεται προς εξυπηρέτηση στο δίκτυο $sfni$ συμβολίζεται ως $\Gamma_{sfni,g}$. Η ελάχιστη τιμή η οποία εξασφαλίζει ένα κατώτατο όριο στον ρυθμό BER, συμβολίζεται ως γ_o . Ενδεικτικές τιμές της απαιτούμενης τιμής γ_o , σε σχέση με τις διαφορετικές περιπτώσεις των παραμέτρων που καθορίζουν τα θέματα μετάδοσης στα δίκτυα DVB-T, μπορούν να βρεθούν στον Κεφάλαιο 2.

Ο τελικός στόχος της λειτουργίας RRM στα δίκτυα DVB-T είναι ο πλήρης προσδιορισμός του αριθμού των απαραίτητων SFN και των λεπτομερειών λειτουργίας τους (δηλαδή θέσεις πομπών, επίπεδο ενέργειας ανά πομπό, συχνότητα λειτουργίας και χρήστες προς εξυπηρέτηση). Πριν προχωρήσουμε όμως στην διατύπωση των περιορισμών και των απαιτήσεων του προβλήματος είναι αναγκαία η περιγραφή του μοντέλου σημάτων (*Signal Model*) που εφαρμόζεται σε τέτοιου είδους δίκτυα και χρησιμοποιήθηκε στην διάρκεια των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν, με σκοπό την αξιολόγηση του αλγορίθμου που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 6.

5.5.2 Μοντέλο Σημάτων σε DVB-T δίκτυα

Όπως περιγράφηκε και στην παράγραφο 2.4.1, οι χρήστες που εξυπηρετούνται μέσω ενός δικτύου SFN λαμβάνουν ταυτόχρονα πολλά αντίγραφα του ίδιου σήματος, έστω $s_i(t)$, με κάποια απόκλιση στον χρόνο άφιξης τους, εξαιτίας της ύπαρξης πολλαπλών πομπών σε διαφορετικές θέσεις. Ανάλογα με το μέγεθος της χρονικής απόκλισης και της τιμής T_g , που έχει επιλεγεί κατά την διάρκεια διαμόρφωσης του σήματος DVB-T, τα προαναφερθέντα αντίγραφα είτε συνεισφέρουν θετικά στον λόγο SIR, είτε αρνητικά. Επιπλέον η τυχόν ύπαρξη διαφορετικών δικτύων SFN, στην Περιοχή Εξυπηρέτησης, με την ίδια συχνότητα λειτουργίας, επηρεάζει αρνητικά την τελική τιμή της SIR παραμέτρου, εξαιτίας των σημάτων ($z_i(t)$) που προέρχονται από αυτά. Στο Σχήμα 5-8 απεικονίζεται το βασικό μοντέλο σημάτων που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τιμής SIR ανά χρήστη, σε περιπτώσεις ύπαρξης πολλαπλών δικτύων DVB-T (SFNs).



Σχήμα 5-8. Μοντέλο Σημάτων δικτύων DVB-T με αρχιτεκτονική SFN

Ο παράγοντας f ([MM+97], [BEU95]) που υπεισέρχεται στους υπολογισμούς και δίδεται μέσω της παρακάτω σχέσης, αποτελεί μια καλή προσέγγιση του ποσοστού θετικής ή αρνητικής συμβολής στο λόγο SIR του λαμβανόμενου σήματος OFDM, από τους πομπούς του SFN, στο οποίο ανήκει η ομάδα χρηστών.

$$f(\Delta t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \Delta t \leq T_g \\ \left(\frac{T_u + T_g - \Delta t}{T_u} \right)^2, & T_g \leq \Delta t \leq T_g + T_u \\ 0, & \Delta t \geq T_g + T_u \end{cases} \quad (1)$$

Έχοντας ορίσει το γενικό μοντέλων σημάτων που ισχύει στα δίκτυα SFN DVB-T, ακολουθεί η προσαρμογή του και οι λεπτομέρειες προσδιορισμού του SIR σε σχέση με τον συμβολισμό που ορίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Πιο συγκεκριμένα για τον υπολογισμό του SIR μιας ομάδας χρηστών g που εξυπηρετείτε μέσω του sfn_i (δηλαδή του $\Gamma_{sfn_i, g}$) ακολουθούμε την εξής διαδικασία:

- Υπολογίζουμε το διάνυσμα συσχέτισης $\theta = \{\theta_{g,t}\}$ μεταξύ των ενεργών πομπών στην Περιοχή Εξυπηρέτησης και της ομάδας χρηστών. Η τιμή του θ για τα σήματα που προέρχονται από τους πομπούς που συνθέτουν το sfm_i υπολογίζεται με την βοήθεια της εξίσωσης 1 και συμβολίζεται ως $Q_{g,t}$. Επιπλέον για σήματα που καταφθάνουν στους χρήστες από πομπούς που ανήκουν σε διαφορετικά δίκτυα SFN με διαφορετική συχνότητα λειτουργίας από αυτή του sfm_i , η τιμή του θ είναι μηδέν, ενώ στην περίπτωση χρήσης της ίδιας συχνότητας η τιμή είναι ίση με την μονάδα. Η εξίσωση 2 παρέχει την τιμή του θ για όλες τις περιπτώσεις.

$$\theta_{g,t} = \begin{cases} Q_{g,t}, & \text{αν } t \in sfm_i \\ 0, & \text{αν } t \in sfm_j \text{ με } i \neq j \text{ και } f_{sfm_i} \neq f_{sfm_j} \\ 1, & \text{αν } t \in sfm_j \text{ με } i \neq j \text{ και } f_{sfm_i} = f_{sfm_j} \end{cases} \quad (2)$$

- Στην συνέχεια εφαρμόζουμε την σχέση υπολογισμού που υποδεικνύεται από την εξίσωση 3. Ο τύπος αυτός προκύπτει από το μοντέλο σημάτων όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 5-8 σε συνδυασμό με τον συμβολισμό που ορίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

$$\Gamma_{sfm_i, g_k} = \frac{\sum_{\forall t \in sfm_i} P_{g,t} \cdot \theta_{g,t}}{\sum_{\forall t \in sfm_i} P_{g,t} \cdot (1 - \theta_{g,t}) + \sum_{\forall t \notin sfm_i} P_{g,t} \cdot \theta_{g,t} + Noise} \Rightarrow$$

$$\Gamma_{sfm_i, g_k} = \frac{\sum_{\forall t \in sfm_i} P_t \cdot Q_{g,t} \cdot G_{g,t}}{\sum_{\forall t \in sfm_i} P_t \cdot (1 - Q_{g,t}) \cdot G_{g,t} + \sum_{\forall t \notin sfm_i} P_t \cdot \theta_{g,t} \cdot G_{g,t} + Noise} \quad (3)$$

Ακολουθεί ο προσδιορισμός των δεδομένων που θα πρέπει να παράγει η λύση του προβλήματος RRM και των συνθηκών που οφείλει να ικανοποιεί.

5.5.3 Δεδομένα εξόδου του DVB-T RRM προβλήματος – Συνθήκες Ικανοποίησης και Στόχοι

Τα δεδομένα εξόδου που συνθέτουν την λύση που προκύπτει από την εφαρμογή της λειτουργίας RRM στα πλαίσια των δικτύων IP-enabled DVB-T είναι τα παρακάτω:

- **Ο Δυναμικός Προσδιορισμός της δομής των SFNs** (*Dynamic SFNs Layout configuration – DSFNL*), περιέχει για κάθε sfm_i το υποσύνολο των πομπών που το συνθέτουν ($sfm_i^T = \{t_i\} \subseteq T : t_i \in sfm_i$), καθώς και το υποσύνολο των ομάδων χρηστών που εξυπηρετούνται μέσω αυτού ($sfm_i^G = \{g_i\} \subseteq GU : g_i \in sfm_i$).
- **Η Απόδοση Συχνοτήτων** (*Frequency Allocation*) καθορίζει την συχνότητα λειτουργίας για κάθε sfm_i ($f_i \leftrightarrow sfm_i, f_i \in F$).

- **Ο Καθορισμός των Επιπέδων Ενέργειας (Power Allocation)** για όλους τους χρησιμοποιούμενους πομπούς ($t_i \leftrightarrow P_i$), όπως προσδιορίστηκαν από τον Δυναμικό Προσδιορισμό της Δομής των SFNs

Οι παραπάνω λύσεις θα πρέπει να στοχεύουν στην ανάθεση όλων των ομάδων χρηστών σε ένα SFN ($g_i \leftrightarrow sfn_k, \forall g_i \in GU$) και να ικανοποιούν τους ακόλουθους περιορισμούς :

1. Για κάθε ομάδα χρηστών g_k , που εξυπηρετείται δια μέσου του sfn_i θα πρέπει να ισχύει $\Gamma_{sfn_i, g_k} \geq \gamma_0$.
2. Η διαδικασία ανάθεσης ομάδων χρηστών σε κάθε sfn_i δεν θα πρέπει να παραβιάσει την συνθήκη $\sum_{g \in sfn_i} cap_g \leq cap_{sfn_i}$, όπου cap_{sfn_i} η μέγιστη χωρητικότητα του sfn_i , όπως αυτή προσδιορίζεται από τις παραμέτρους μετάδοσης του σήματος DVB-T.
3. Τέλος, για κάθε ενεργό πομπό θα πρέπει $P_{t_i} \leq P_{max}$, ενώ για κάθε τοποθεσία s_i δεν πρέπει να τοποθετούνται περισσότεροι από n_i πομποί ($\sum_{t_j \in s_i} t_j \leq n_i$).

Οι στόχοι της διαδικασίας RRM είναι η βελτιστοποίηση των χρησιμοποιούμενων πόρων ταυτόχρονα με την ικανοποίηση των χρηστών. Πιο συγκεκριμένα, απαιτείται:

1. Η ελαχιστοποίηση του αριθμού των SFNs που χρησιμοποιούνται (*minimize #SFNs*). Σημειώνεται εδώ ότι ο θεωρητικός ελάχιστος αριθμός SFNs, όταν χρησιμοποιείται το ίδιο σετ παραμέτρων για την διαμόρφωση του σήματος DVB-T που εκπέμπουν, δίνεται από την σχέση $\lceil Total\ Traffic / cap_{sfn} \rceil$. Η μείωση του συνολικού αριθμού SFNs έχει αντίκτυπο στο κόστος λειτουργίας του δικτύου DVB-T, αφού συνεπάγεται λιγότερους multiplexers, modulators κτλ.
2. Η ελαχιστοποίηση του αριθμού των διαφορετικών συχνοτήτων που ανατίθενται στα SFNs (*minimize $\{f_i \leftrightarrow sfn_i, \forall i\} \subseteq F$*). Η μείωση επιτυγχάνεται μέσω της επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων, όπου αυτό είναι δυνατόν, χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί που παρουσιάστηκαν πιο πάνω.
3. Η ελαχιστοποίηση της εκπεμπόμενης ενέργειας αλλά και του συνολικού αριθμού των πομπών που χρησιμοποιούνται κατά την διάρκεια *deployment* των SFNs (*minimize*

$$\sum_{t_i \in sfn} P_{t_i} \text{ και } minimize \left\{ \sum_{t_i} sfn_i^T \right\} \subseteq T$$

Η βέλτιστη λύση θα προκύψει μέσω της ταυτόχρονης βελτιστοποίησης όλων των πιο πάνω παραγόντων, παράλληλα με την μεγιστοποίηση της χρησιμοποίησης (*utilization*) κάθε SFN και ικανοποίησης των απαιτήσεων όλων των χρηστών. Φυσικά η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση δεν είναι εφικτή λόγω της αντικρουόμενης φύσης των πιο πάνω μεταβλητών. Οι λύσεις που θα προκύπτουν θα πρέπει να αξιολογούνται μέσω της βαρύτητας που ο κάθε παράγοντας θα παρουσιάζει στην συνολική

συνάρτηση κόστους (*cost function*) του προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα αν $Cost_{SFN}$ είναι το επιπλέον κόστος ανά καινούργιο SFN που χρησιμοποιείται, $Cost_F$ και $Cost_T$ τα αντίστοιχα μεγέθη για τον παράγοντα των συχνοτήτων και του αριθμού των πομπών και $Cost_P$ το κόστος ανά watt επιπεμπόμενης ενέργειας, τότε η συνάρτηση κόστους διαμορφώνεται ως εξής:

$$\text{Ελαχιστοποίηση του Cost Function} = Cost_{SFN} * \#SFNs + Cost_F * \#f + Cost_T * \#T + Cost_P * \sum_{\forall i_i \in sfn} P_{i_i} \quad (4)$$

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένας «άπληστος» (*greedy*) ευριστικός αλγόριθμος επίλυσης του πιο πάνω προβλήματος, καθώς και αποτελέσματα αξιολόγησης του, μέσω προσομοίωσης για διάφορα ρεαλιστικά σενάρια.

5.6 Ανάλυση πολυπλοκότητας και βαθμού δυσκολίας του εξεταζόμενου προβλήματος.

Η παρούσα παράγραφος θα ασχοληθεί με την ανάλυση της πολυπλοκότητας και τον βαθμό δυσκολίας τον οποίο παρουσιάζει το υπό εξέταση πρόβλημα. Ο συνδυασμός των υποπροβλημάτων της ανάθεσης των χρηστών στα υπό εξάπλωση SFNs και η ταυτόχρονη εύρεση των κατάλληλων συχνοτήτων και γενικότερα των παραμέτρων λειτουργίας των συστημάτων DVB-T, οδηγούν στην δημιουργία ενός γενικότερου προβλήματος της κατηγορίας των NP-Complete προβλημάτων, όπως αυτό αναλύθηκε στις προηγούμενες παραγράφους. Η πιο πάνω διαπίστωση θα αποδειχτεί μέσω της αναγωγής του υπό εξέταση προβλήματος σε άλλα γνωστά NP-Complete [GS79] προβλήματα και πιο συγκεκριμένα στο συνδυασμό των προβλημάτων του bin packing (πρόβλημα συσκευασίας) και του graph coloring (χρωματισμός γράφου) αντίστοιχα. Η θεωρητική δουλειά που ακολουθεί και παρουσιάζεται, στηρίζεται στην αντίστοιχη ανάλυση για την περίπτωση των συστημάτων DAB (Digital Audio Broadcasting - [DAB]), όπως αυτή πραγματοποιήθηκε από τους [GRAF01] και μπορεί να εφαρμοστεί, όπως και οι ίδιοι οι συγγραφείς υποστηρίζουν, στα συστήματα DVB-T, με την χρήση πάντα της αρχιτεκτονική SFN.

5.6.1 Μαθηματικό υπόβαθρο - ορισμοί

Για λόγους καλλίτερης κατανόησης της αναγωγής του υπό εξέταση προβλήματος σε γνωστά NP-Complete προβλήματα, παραθέτουμε μια σύντομη περιγραφή των προβλημάτων graph coloring και bin packing.

Graph coloring – Πρόβλημα Χρωματισμού Γράφου

Έστω ο γράφος $G=(V,E)$, όπου V είναι οι κορυφές του και E οι ακμές του. Ο χρωματισμός ενός γράφου G καλείται η διαδικασία f κατά την οποία ανατίθενται σε όλες τις κορυφές του χρώματα με τέτοιο τρόπο ώστε $f(u) \neq f(w) \forall uw \in E$. Απλούστερα, αποτελεί την διαδικασία κατά την οποία όλες οι γειτονικές κορυφές του γράφου υποχρεούνται να έχουν διαφορετικό χρώμα. Ο ελάχιστος

αριθμός χρωμάτων, ο οποίος μπορεί να οδηγήσει στον χρωματισμό ενός γράφου G , σύμφωνα με τους παραπάνω περιορισμούς καλείται χρωματικός αριθμός (chromatic number) και συμβολίζεται ως $\chi(G)$. Επιπλέον αν $|f(V)| \leq k$ τότε η διαδικασία f , καλείται k -colouring. Η εύρεση ενός χρωματισμού με την χρήση $|V|^{1/7-\epsilon} \chi(G)$ χρωμάτων το μέγιστο, είναι ένα NP-Hard πρόβλημα για κάθε $\epsilon > 0$ [CK99].

Η αναγωγή του προβλήματος ανάθεσης των συχνοτήτων σε ένα ασύρματο δίκτυο στο πρόβλημα του χρωματισμού ενός γράφου έχει μελετηθεί και αντιμετωπισθεί από τον Hale [HALE80].

Bin Packing – Πρόβλημα συσκευασίας

Ένα ακόμα πρόβλημα το οποίο ανήκει στην κατηγορία των NP-complete προβλημάτων είναι το πρόβλημα του bin packing ή όπως είναι γνωστό το πρόβλημα συσκευασίας. Πιο συγκεκριμένα η διατύπωση του προβλήματος έχει ως εξής :

Έστω X ένα σύνολο από στοιχεία με μέγεθος $\mu_x > 0$, $x \in X$ και M θετικός αριθμός. Η διαδικασία M -packing για το σύνολο X , αφορά την δημιουργία ενός συνόλου B , από ξένα υποσύνολα του X τέτοια ώστε $X = \bigcup_{\beta \in B} \beta$ και με συνολικό μέγεθος, $\mu_\beta = \sum_{x \in \beta} \mu_x$ για κάθε bin (κάδο) $\beta \in B$ το πολύ

M . Το πρόβλημα μπορεί να ξαναδιατυπωθεί και ως εξής : Με δεδομένα τα X , μ και M και έναν μη αρνητικό αριθμό k , να απαντηθεί αν το σύνολο X έχει ένα M -packing σύνολο B , με αριθμό υποσυνόλων το πολύ k . Το ελάχιστο μέγεθος M -packing του συνόλου X , ονομάζεται M -packing αριθμός του X και συμβολίζεται ως $\rho_M(x)$.

5.6.2 Αναγωγή του προβλήματος Διαχείρισης Πόρων σε συστήματα DVB-T σε γνωστά NP-Complete προβλήματα.

Είναι γνωστό ότι το «κλασσικό» πρόβλημα της ανάθεσης συχνοτήτων στα αναλογικά συστήματα βιντεοεπιπομπής μπορεί να αναχθεί στο γενικευμένο πρόβλημα χρωματισμού γράφου. Πιο συγκεκριμένα, το δίκτυο μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένας γράφος $G=(V,E)$, όπου η κάθε κορυφή $u \in V$ αναπαριστά έναν πομπό, ενώ η κάθε ακμή μεταξύ δυο κορυφών u και w , $uw \in E$, μοντελοποιεί το γεγονός ότι οι δυο αυτοί πομποί αλληλοεπηρεάζονται (interference). Στην πιο απλή περίπτωση η ανάθεση των συχνοτήτων ανάγεται στο πρόβλημα του χρωματισμού του γράφου, όπου το κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε μια συχνότητα [HALE80].

Από την ως τώρα ανάλυση έχει ήδη γίνει προφανές ότι η οργάνωση των συστημάτων DVB-T μέσω της αρχιτεκτονικής SFN, όπου η διάθεση των υπηρεσιών IP δεν πραγματοποιείται μέσω ενός μόνο πομπού, αλλά ενός πλέγματος αναμεταδοτών. Χωρίς να αλλοιωθεί η φύση του προβλήματος μπορούμε να θεωρήσουμε το σύνολο των πομπών ως ένα μια μοναδική οντότητα, η οποία αναμεταδίδει το ίδιο σετ υπηρεσιών IP, προς τους χρήστες της περιοχής που καλύπτει.

Η εφαρμογή των μαθηματικών ορισμών που παρατέθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο για την περίπτωση του υπολογισμού του αριθμού των απαραίτητων SFNs και τον προσδιορισμό των συχνοτήτων τους, για την κάλυψη μια περιοχής έχει ως εξής :

- Έστω S το σύνολο των υπηρεσιών, όπου κάθε $s \in S$, έχει μια συγκεκριμένη θετική απαίτηση σε χωρητικότητα μ_s (κατά πλήρη αναλογία με το σύνολο GU, παράγραφος 5.5.1).
- Έστω ο γράφος $G=(V,E)$, ο οποίος μοντελοποιεί με τις κορυφές του τις περιοχές εξυπηρέτησης και με τις ακμές του τις τυχόν αλληλοεπιδράσεις. Επιπλέον ως R_u , $u \in V$, απεικονίζονται οι συνολικές απαιτήσεις σε χωρητικότητα, όπως αυτές προκύπτουν από τις απαιτήσεις σε υπηρεσίες για κάθε περιοχή (κατά πλήρη αναλογία με το σύνολο S-sites, παράγραφος 5.5.1).
- Τέλος, έστω M το μέγεθος του κάθε bin (κάδου), κατά την διάρκεια του bin packing προβλήματος, το οποίο αντιστοιχεί στην χωρητικότητα που μπορεί να υποστηρίξει το κάθε SFN και εξαρτάται από τις επιλεγμένες παραμέτρους λειτουργίας.

Η απλοποιημένη διατύπωση του προβλήματος της Διαχείρισης Πόρων σε συστήματα DVB-T , αποκλειστικής παροχής υπηρεσιών IP, με την χρήση SFN αρχιτεκτονικής, σε σχέση με αυτή που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 5.5.2, έχει ως εξής :

Φάση 1^η – Ανάθεση υπηρεσιών σε πομπούς (χρηστών σε SFNs - bin packing πρόβλημα)

Οι αιτούμενες υπηρεσίες (ανά χρήστη) s μπορεί να εξυπηρετούνται μέσω ενός πομπού v ή όχι. Άρα η διαδικασία R συμβολίζει την αντιστοίχιση υπηρεσιών ανά χρησιμοποιούμενο πομπό (κορυφή του γράφου) $R:V \rightarrow 2^S$. Η ανάθεση των υπηρεσιών σε κάθε SFN (bin - β) συμβολίζεται ως $\beta \subseteq V \times 2^S$, όπου σε κάθε κορυφή $u \in V$ ανατίθεται σε ένα σετ $\beta_u = \{B: (u, B) \in \beta\}$ από υπηρεσίες IP, οι οποίες θα είναι διαθέσιμες στην συγκεκριμένη περιοχή. Επιπλέον, θα πρέπει για κάθε σύνολο υπηρεσιών β (SFN) , το οποίο θα προκύπτει από την διαδικασία bin packing, να ισχύει: $\mu_\beta \leq M$ (βλέπε περιορισμό 2 παραγράφου 5.5.3), ώστε να είναι αποδεικτό το αποτέλεσμα της ανάθεσης.

Φάση 2^η – Ανάθεση συχνοτήτων σε κάθε bin ή SFN (frequency assignment – graph coloring πρόβλημα)

Κατά την δεύτερη φάση στα σετ β , τα οποία θα έχουν προκύψει από την 1^η φάση θα πρέπει να ανατεθεί μια συχνότητα (διαδικασία χρωματισμού), ώστε να μην δημιουργούνται παρεμβολές. Πιο συγκεκριμένα θα πρέπει να ισχύει : $f(u, \beta) \neq f(w, c) \rightarrow \forall (v, \beta), (w, c) \in B: \beta \neq c$.

Από την ως τώρα ανάλυση, προκύπτει ότι η κατανομή των υπηρεσιών των χρηστών σε SFN και η επιλογή των κατάλληλων πομπών για την δημιουργία των SFNs, αλλά και η μετέπειτα ανάθεση των συχνοτήτων με στόχο την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών, μπορεί να αναχθεί σε δυο αλληλένδετα NP-complete προβλήματα. Το γεγονός αυτό, μαζί με την απαίτηση της ικανοποίησης συγκεκριμένων απαιτήσεων για το επίπεδο σήματος στην πλευρά των χρηστών καταδεικνύουν την μεγάλη πολυπλοκότητα που εμφανίζει το πρόβλημα Διαχείρισης Πόρων σε συστήματα DVB-T ,

αποκλειστικής παροχής υπηρεσιών IP, με την χρήση SFN αρχιτεκτονικής και δικαιολογούν πλήρως την υιοθέτηση ενός «άπληστου» (*greedy*) ευριστικού αλγόριθμου για την επίλυση του, ο οποίος θα παρουσιαστεί και θα αναλυθεί ως προς τις επιδόσεις του στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

5.7 Συμπεράσματα - Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι βασικές αρχές της Διαχείρισης Πόρων σε ασύρματα δίκτυα, καθώς και οι επιπλέον απαιτήσεις στα πλαίσια υλοποίησης συστημάτων 4^{ης} Γενιάς. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στις αντίστοιχες παραγράφους, απέδειξε την σπουδαιότητα της λειτουργίας RRM, αλλά και του μεγάλου βαθμού πολυπλοκότητας που παρουσιάζει στην κατεύθυνση της υλοποίησης της, για τις διάφορες ασύρματες τεχνολογίες. Στο ίδιο κεφάλαιο ορίστηκαν πλήρως τα δεδομένα εισόδου και εξόδου, καθώς και οι στόχοι και οι περιορισμοί του προβλήματος RRM για τα δίκτυα IP-enabled DVB-T. Σημαντικό ρόλο στην λειτουργία των δικτύων IP-enabled DVB-T, διαδραματίζει η αρχιτεκτονική SFN. Πιο συγκεκριμένα, η δομή των πομπών που συνθέτουν ένα SFN και το επίπεδο εκπεμπόμενης ενέργειας, η συχνότητα λειτουργίας αλλά και η ύπαρξη άλλων δικτύων SFN στην Περιοχή Εξυπηρέτησης, επηρεάζει σημαντικά την απόδοσή τους. Επιπλέον, υπενθυμίζεται ότι οι βασικοί λόγοι που έστρεψαν το ενδιαφέρον μας για τον τύπο των δικτύων αυτών, είναι ο υψηλός ρυθμός μεταφοράς των δεδομένων προς τον χρήστη (ως και 31 Mbps ανά συχνότητα) αλλά και διευρυμένη ακτίνα κάλυψης που προσφέρουν. Όμως η ενσωμάτωση τους στα συστήματα 4^{ης} Γενιάς, θα εξαρτηθεί από τις ικανότητες τους για γρήγορη και αποτελεσματική διαχείριση των δικτυακών πόρων, με στόχο την καλλίτερη απόδοσή τους και προσαρμογή στις μεταβαλλόμενες κυκλοφοριακές συνθήκες. Το κεφάλαιο που ακολουθεί, επιχειρεί να δώσει μια πρώτη απάντηση στο θέμα αυτό με την παρουσίαση και αξιολόγηση ενός πρωτότυπου αλγόριθμου.

6 Αλγόριθμος Διαχείριση Πόρων σε πολλαπλά συστήματα DVB-T, αποκλειστικής παροχής υπηρεσιών IP, με αρχιτεκτονική SFN

6.1 Εισαγωγή

Ακολουθώντας την περιγραφή, τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς του προβλήματος RRM για τα δίκτυα DVB-T, όπως παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5, προχωρήσαμε στην υλοποίηση ενός αλγορίθμου για την συνολική αντιμετώπιση του. Ο αλγόριθμος που προτείνεται ανήκει στην κατηγορία των «greedy» (άπληστων), ευριστικών αλγορίθμων με χαρακτηριστικά όπως η ταχεία παραγωγή αποτελεσμάτων, κοντά στην βέλτιστη λύση, για οποιοδήποτε στιγμιότυπο δεδομένων εισόδου. Η δομή του κεφαλαίου έχει ως εξής:

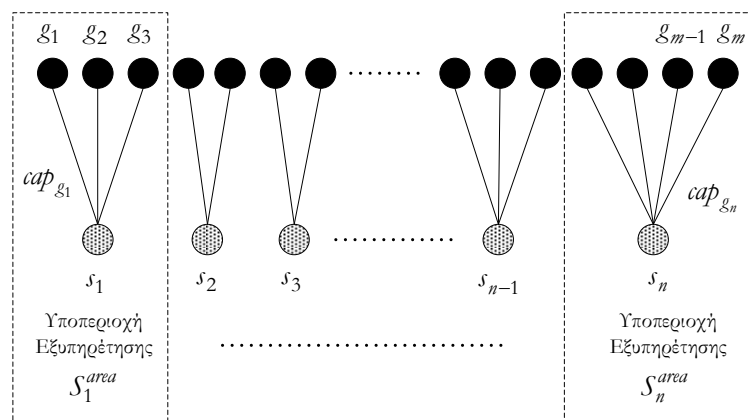
Η παράγραφος 6.2 παραθέτει την γενική ιδέα του αλγορίθμου, ενώ παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα που ακολουθούνται κατά την διάρκεια εφαρμογής του.

Εν συνεχεία, η παράγραφος 6.3, μετά από μια σύντομη περιγραφή του περιβάλλοντος υλοποίησης και των παραδοχών που πραγματοποιήθηκαν κατά την φάση προσομοίωσης, παρουσιάζει αποτελέσματα για μια σειρά αντιπροσωπευτικών σεναρίων, μέσω των οποίων αξιολογείται η αποτελεσματικότητά του.

Τέλος στην παράγραφο 6.4 παρουσιάζεται μια σύνοψη του κεφαλαίου και τα συμπεράσματα.

6.2 Περιγραφή Αλγορίθμου

Η βασική ιδέα στην οποία στηρίζεται ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι ο τεμαχισμός της Περιοχής Εξυπηρέτησης στις λεγόμενες Υποπεριοχές Εξυπηρέτησης (*sub-service areas*). Ο καθορισμός τους πραγματοποιείται αν αναθέσουμε κάθε ομάδα χρηστών στην κοντινότερη διαθέσιμη θέση s_i (site). Έτσι σε κάθε διαθέσιμη θέση s_i αντιστοιχίζεται τελικά ένα υποσύνολο των ομάδων χρηστών $\{g_1, g_2, \dots, g_m\} \subseteq GU$, δημιουργώντας την Υποπεριοχή Εξυπηρέτησης S_i^{area} , (σχέση ένα προς ένα με τα sites, δηλαδή $S_i^{area} \leftrightarrow s_i$). Στο Σχήμα 6-1 απεικονίζεται ο γράφος προσδιορισμού των Υποπεριοχών Εξυπηρέτησης.



Σχήμα 6-1. Γράφος προσδιορισμού Υποπεριοχών (Sub-Service Areas)

Η ακμή μεταξύ της ομάδας χρηστών g_k και του site s_i αντιπροσωπεύει τις απαιτήσεις της πρώτης σε χωρητικότητα (cap_{g_k}). Επιπλέον, αν $d(g_k, s_i)$ η απόσταση μεταξύ της ομάδας χρηστών g_k και του site s_i , στο οποίο έχει ανατεθεί, τότε ισχύει ότι $d(g_k, s_i) < d(g_k, s_j) \forall j \neq i$. Αθροίζοντας τις απαιτήσεις των ομάδων χρηστών που έχουν ανατεθεί σε ένα site, σε χωρητικότητα, προκύπτει το συνολικό κυκλοφοριακό φορτίο ανά Υποπεριοχή Εξυπηρέτησης, δηλαδή: $cap_{S_i^{area}} = \sum_{\forall g_k \in S_i^{area}} cap_{g_k}$.

Στο επόμενο στάδιο του αλγορίθμου επιχειρείται η ικανοποίηση των αναγκών των χρηστών μέσω της ανάπτυξης πολλαπλών δικτύων SFN. Η ανάπτυξη των δικτύων SFN προϋποθέτει την εύρεση των κατάλληλων sites για την τοποθέτηση των πομπών ειδοποίησης του σήματος DVB-T, με κύριο στόχο την επίτευξη ποσοστού χρησιμοποίησης (*utilization*), κοντά στο 100%. Με τον τρόπο αυτό μειώνουμε το κόστος λειτουργίας του δικτύου, αφού περιορίζουμε στο ελάχιστο τις απαιτήσεις σε εξοπλισμό, όπως multiplexers, modulators κτλ. Τα κριτήρια με βάση τα οποία επιλέγονται τα sites για την ανάπτυξη των πομπών των SFNs είναι το συνολικό απαιτούμενο κυκλοφοριακό φορτίο των Υποπεριοχών Εξυπηρέτησης και οι περιορισμοί στο λόγο SIR, στην πλευρά των χρηστών. Ακολουθεί η παρουσίαση ενός παραδείγματος για την καλλίτερη κατανόηση της διαδικασίας εξάπλωσης/επέκτασης των SFNs, στις Υποπεριοχές Εξυπηρέτησης.

Έστω η περίπτωση της Υποπεριοχής S_i^{area} και sfn_j το νέο υπό εξάπλωση SFN. Εξετάζεται η σχέση μεταξύ των $cap_{S_i^{area}}$ και cap_{sfn_j} :

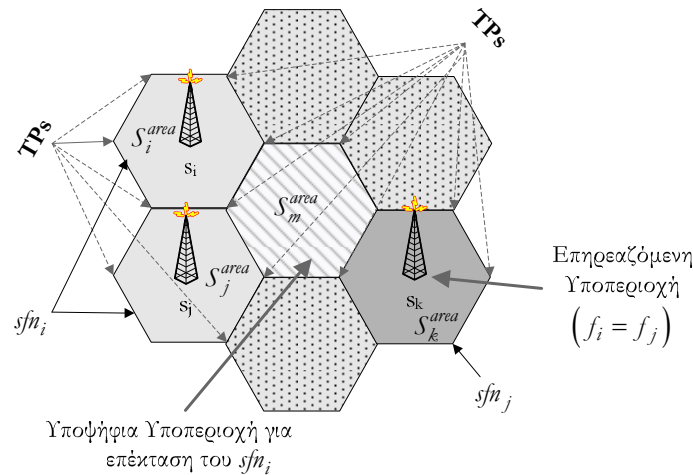
Αν $cap_{S_i^{area}} \geq cap_{sfn_j}$, τότε τοποθετείται ένας πομπός στο site s_i και ανατίθενται ομάδες χρηστών που ανήκουν στην S_i^{area} , με απαιτήσεις σε χωρητικότητα ίση με cap_{sfn_j} . Το sfn_j θεωρείται «συμπληρωμένο» και το εναπομένον νέο κυκλοφοριακό φορτίο για την S_i^{area} είναι ίσο με $cap'_{S_i^{area}} = cap_{S_i^{area}} - cap_{sfn_j}$. Αν $cap'_{S_i^{area}} = 0$, δηλαδή $cap_{S_i^{area}} = cap_{sfn_j}$, τότε χαρακτηρίζεται και η S_i^{area} ως «συμπληρωμένη».

Αν $cap_{S_i^{area}} < cap_{sfn_j}$, τότε τοποθετείται ένας πομπός στο site s_i και ανατίθενται όλες οι ομάδες χρηστών που ανήκουν στην S_i^{area} . Η υποπεριοχή S_i^{area} θεωρείται συμπληρωμένη, ενώ αρχίζει η αναζήτηση για την επόμενη καταλληλότερη υποπεριοχή, με στόχο την εξάπλωση του sfn_j , άρα και την εκμετάλλευση της εναπομένουσας διαθέσιμης χωρητικότητας του ($cap'_{sfn_j} = cap_{sfn_j} - cap_{S_i^{area}}$), μέσω της τοποθέτησης ενός νέου πομπού. Η έννοια της καταλληλότερης Υποπεριοχής αναλύεται αμέσως μετά.

Η εξάπλωση του sfn_j μέσω της τοποθέτησης ενός νέου πομπού σε μια νέα Υποπεριοχή Εξυπηρέτησης, έστω S_k^{area} , με $cap_{S_k^{area}} > 0$, επηρεάζει τον λόγο SIR (αρνητικά ή θετικά), όλων των ομάδων χρηστών που βρίσκονται στις υπόλοιπες Υποπεριοχές που εξυπηρετούνται διαμέσου του ίδιου SFN. Συγκεκριμένες αποδείξεις σε σχέση με την πιο πάνω παρατήρηση δόθηκαν ήδη στην παράγραφο 5.4. Επιπλέον, στην περίπτωση διαφορετικών SFNs, με την ίδια συχνότητα λειτουργίας με το sfn_j , η τοποθέτηση του νέου πομπού θα επιδράσει μόνο αρνητικά στον λόγο SIR, για όλες τις ομάδες χρηστών που εξυπηρετούνται μέσω των πρώτων. Άρα πριν προχωρήσουμε στην εξάπλωση του sfn_j , θα πρέπει να ελεγχθεί τυχόν παραβίαση της συνθήκης που αφορά τον περιορισμό για τον λόγο SIR σε όλες τις Υποπεριοχές, που επηρεάζονται και για όλες τις ομάδες χρηστών που ανήκουν στις τελευταίες. Από εδώ και στο εξής ο παραπάνω έλεγχος θα αναφέρεται ως Έλεγχος Επηρεαζόμενων Υποπεριοχών - EΕΥ. Επιπλέον σημειώνεται ότι ο EΕΥ εφαρμόζεται και στην περίπτωση που επιθυμούμε την επαναχρησιμοποίηση μιας ήδη ανατεθειμένης συχνότητας κατά την αρχικοποίηση ενός νέου SFN.

Η αύξηση των υπολογισμών εξαιτίας του μεγάλου αριθμού των ελέγχων που πρέπει να πραγματοποιηθούν σε κάθε επέκταση ενός SFN, ιδιαίτερα όταν ο αριθμός των ομάδων χρηστών ανταποκρίνεται σε ρεαλιστικά σενάρια λειτουργίας, μας οδήγησε στην ιδέα των Δοκιμαστικών Σημείων Ελέγχου (Test Points-TP). Έτσι αντί να πραγματοποιείται ο έλεγχος του αν παραβιάζεται η συνθήκη περιορισμού 1 (παράγραφος 5.5.3) για τον λόγο SIR ($\Gamma_{sfn, g_k} \geq \gamma_o$) σε κάθε ομάδα χρηστών ανά επηρεαζόμενη Υποπεριοχή, ο έλεγχος που τελικά πραγματοποιείται αφορά μόνο τα

TPs. Η επιλογή των TPs γίνεται με βάση την χειρότερη περίπτωση (*worst case*). Πιο συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί (βλέπε συμπεράσματα της παραγράφου 5.4) ότι οι ομάδες χρηστών, για τις οποίες είναι πιθανότερο να παραβιαστεί η συνθήκη περιορισμού 1, είναι αυτές που βρίσκονται στα όρια όλων των επηρεαζόμενων Υποπεριοχών. Έτσι το σετ των TPs δημιουργείται με την επιλογή σημείων που ανήκουν στην συνοριακή γραμμή των Υποπεριοχών, προς όλες τις κατευθύνσεις. Η ιδέα των TPs αναπαριστάται γραφικά στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 6-2. Παράδειγμα οριοθέτησης των TPs

Επισημαίνουμε ότι για λόγους περαιτέρω μείωσης της πολυπλοκότητας της όλης διαδικασίας, η εισαγωγή κάθε νέου πομπού συνοδεύεται με την θεώρηση ότι εκπέμπει σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο ισχύος, αποκαλούμενο Reference Power - P_{ref} , με $P_{ref} \leq P_{max}$. Η επιλογή του P_{ref} σχετίζεται με την τοπολογία των sites και τις συνθήκες διάδοσης του σήματος στην Περιοχή Εξυπηρέτησης. Στο τέλος του αλγορίθμου υπάρχει ένα στάδιο, όπου επαναπροσδιορίζονται τα τελικά επίπεδα εκπεμπόμενης ισχύος στους πομπούς.

Μετά την ανάλυση όλων των απαραίτητων εννοιών και ιδεών πάνω στις οποίες στηρίζεται ο προτεινόμενος αλγόριθμος, ακολουθεί η περιγραφή των βημάτων του. Τονίζεται ότι κατά την διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου δεν πρέπει να παραβιαστεί κανένας από τους περιορισμούς που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 5, παράγραφο 5.5.3 (1 ως 3).

Βήμα 1. Εντόπισε μια Υποπεριοχή Εξυπηρέτησης, έστω S_i^{area} , όπου υπάρχουν ομάδες χρηστών μη εξυπηρετούμενες μέσω κάποιου SFN. Αν $S_i^{area} = \emptyset$, τότε ο αλγόριθμος τερματίζεται, αλλιώς προχωράμε στο Βήμα 2.

Βήμα 2. Αρχικοποιούμε ένα καινούργιο SFN, έστω sfn_j , τοποθετώντας τον πομπό t_k στο site s_j , με $P_{t_k} = P_{ref}$. Πραγματοποιείται ο Έλεγχος Επηρεαζόμενων Υποπεριοχών, με σκοπό την διαπίστωση αν το νέο SFN (sfn_j), μπορεί να επαναχρησιμοποιήσει μια από τις ήδη χρησιμοποιούμενες συχνότητες. Αν ο έλεγχος είναι αρνητικός τότε στο sfn_j ανατίθεται μια νέα συχνότητα από το

σύνολο F . Μετά και την επιλογή της συχνότητας λειτουργίας του sf_n_j , συνεχίζουμε με το Βήμα 3.

Βήμα 3. Αρχίζουμε την ανάθεση ομάδων χρηστών που ανήκουν στην S_i^{area} στο sf_n_j , ελέγχοντας κάθε φορά την συνθήκη περιορισμού 2. Αν παραβιαστεί, για την περίπτωση που $cap_{S_i^{area}} > cap_{sf_n_j}$, επιστρέφουμε στο Βήμα 1, αρχικοποιώντας το πάλι με την S_i^{area} με $cap'_{S_i^{area}} = cap_{S_i^{area}} - cap_{sf_n_j}$, θεωρώντας το sf_n_j ως συμπληρωμένο, αλλιώς αν $cap_{S_i^{area}} = cap_{sf_n_j}$ επιστρέφουμε πάλι στο Βήμα 1, χωρίς κάποιον περιορισμό και θεωρώντας το sf_n_j και την S_i^{area} ως συμπληρωμένες. Αν εξαντληθούν όλες οι ομάδες χρηστών της S_i^{area} (περίπτωση $cap_{S_i^{area}} < cap_{sf_n_j}$) συνεχίζουμε με το Βήμα 4 και $cap'_{sf_n_j} = cap_{sf_n_j} - cap_{S_i^{area}}$.

Βήμα 4. Αναζητούμε την καταλληλότερη υποψήφια Υποπεριοχή (έστω S_k^{area}), με $cap_{S_k^{area}} > 0$ για την επέκταση του sf_n_j , εφαρμόζοντας τον Έλεγχο Επηρεαζόμενων Υποπεριοχών για κάθε S_m^{area} με $cap_{S_m^{area}} > 0$. Η Υποπεριοχή που δημιουργεί το μικρότερο επίπεδο παρεμβολών, έστω S_k^{area} και δεν οδηγεί σε παραβίαση των συνθηκών περιορισμού, μαζί με το sf_n_j (προσοχή στην νέα μειωμένη τιμή της διαθέσιμης χωρητικότητας του sf_n_j , $cap'_{sf_n_j}$) χρησιμοποιούνται για την αρχικοποίηση του Βήματος 3, με το οποίο συνεχίζουμε. Αν δεν βρεθεί κατάλληλη Υποπεριοχή, τότε το sf_n_j θεωρείται συμπληρωμένο και συνεχίζουμε με το Βήμα 1.

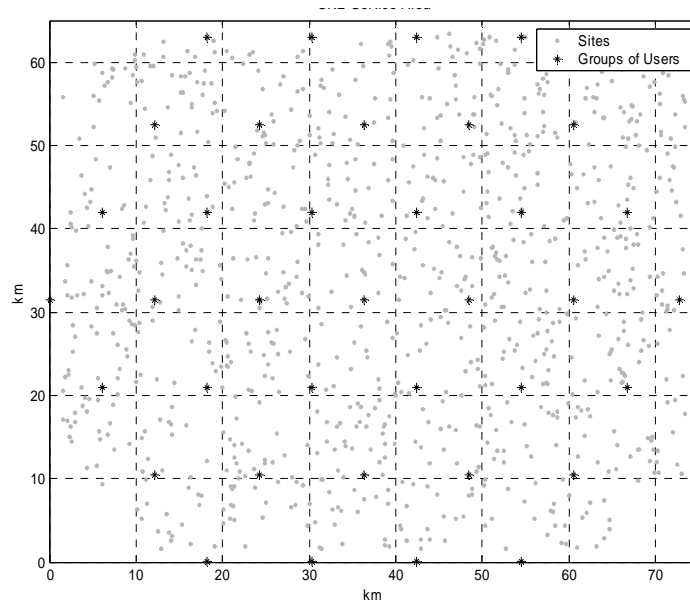
Μετά το πέρας του αλγορίθμου ακολουθεί το στάδιο όπου επαναπροσδιορίζονται τα τελικά επίπεδα εκπεμπόμενης ισχύος στους πομπούς. Μετά και από αυτό το στάδιο έχουν οριστεί πλήρως τα δεδομένα εξόδου του προβλήματος DVB-T RRM, όπως αυτά περιγράφηκαν στην αρχή της παραγράφου 5.5.3. Ειδικότερα θα έχει πραγματοποιηθεί ο Δυναμικός Προσδιορισμός της δομής των SFNs (*Dynamic SFNs Layout configuration – DSFNL*), η Απόδοση Συχνοτήτων (*Frequency Allocation*), και ο Καθορισμός των Επιπέδων Ενέργειας (*Power Allocation*). Η επόμενη παράγραφος αξιολογεί την απόδοση του αλγορίθμου που μόλις περιγράφηκε μέσω προσομοίωσης.

6.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης – Αξιολόγηση Αλγορίθμου

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό σενάριο λειτουργίας, όπου ομάδες χρηστών αναμένουν να εξυπηρετηθούν μέσω του δικτύου DVB-T. Η ανάθεση των χρηστών στα SFNs και γενικότερα η ρύθμιση όλων των παραμέτρων λειτουργίας επιτυγχάνεται μέσω της διαδικασίας RRM που περιγράφει ο προτεινόμενος αλγόριθμος. Η Matlab αποτέλεσε το προγραμματιστικό περιβάλλον στο οποίο υλοποιήθηκε ο αλγόριθμος και εκτελέστηκαν τα σενάρια προσομοίωσης. Μέσω των αποτελεσμάτων που προκύπτουν, μελετάται η συμπεριφορά του αλγορίθμου για διαφορετικές περιπτώσεις συνολικού κυκλοφοριακού φορτίου και παραμέτρων μετάδοσης. Ακολουθεί η παράγραφος στην οποία περιγράφονται οι λεπτομέρειες του σεναρίου και προσδιορίζονται τα δεδομένα εισόδου του αλγορίθμου.

6.3.1 Σενάριο αξιολόγησης RRM αλγορίθμου

Η Περιοχή Εξυπηρέτησης αποτελείται από 37 sites, τοποθετημένα κατάλληλα ώστε να καλύπτουν όλη την επιφάνεια, της οποίας η έκταση ανέρχεται στα 4875 km². Επίσης στην ίδια περιοχή είναι τυχαία κατανομημένες 1000 ομάδες χρηστών με διαφορετικές απαιτήσεις σε χωρητικότητα μεταξύ τους. Στο Σχήμα 6-3 απεικονίζονται με γραφικό τρόπο τόσο η θέση των sites όσο και των ομάδων χρηστών



Σχήμα 6-3. Περιοχή εξυπηρέτησης σεναρίου

Τρία διαφορετικά σεί παραμέτρων διαμόρφωσης και μετάδοσης του DVB-T σήματος επιλέχτηκαν από τον Πίνακα 3.6 του Κεφαλαίου 3, έτσι ώστε να αξιολογηθεί ο αλγόριθμος για περιπτώσεις μικρών αλλά και πιο «αυστηρών» τιμών του γ_0 . Συγκεκριμένα επιλέχτηκαν τα modes 6, 11 και 14, τα οποία εφαρμόστηκαν σε όλα τα SFNs, για κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου. Η τιμή γ_0 που

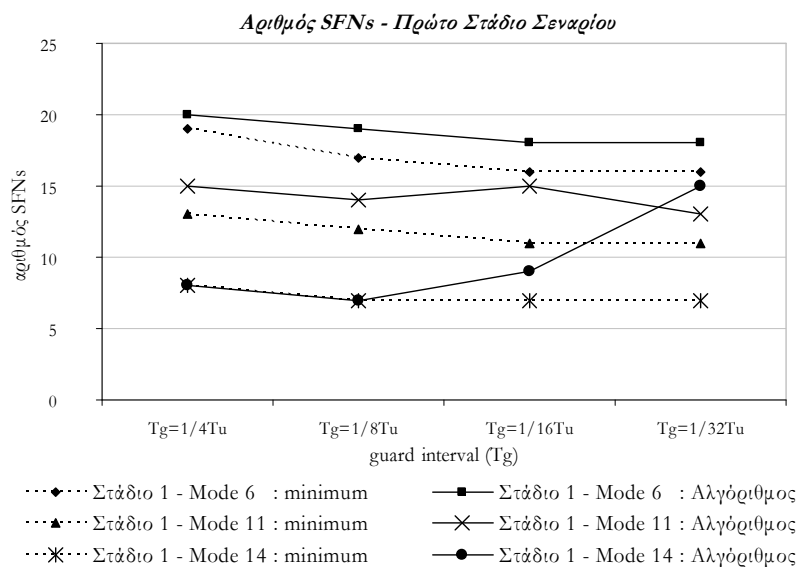
χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή που αντιστοιχεί για τύπο καναλιού Ricean και περιέχεται στο ίδιο πίνακα. Επίσης τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν αφορούν όλες τις δυνατές περιπτώσεις του T_g . Για τον υπολογισμό του link gain χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις των Walfisch-Ikegami (line-of-sight – LOS) [COST231], ενώ για την λειτουργία των πομπών οι τιμές των P_{ref} και P_{max} τέθηκαν ίσες με 48,75 dBm (75Watt) και 51,75dBm (150Watt) αντίστοιχα, συμβατές με την τοπολογία που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 6-3 και τα μοντέλα διάδοσης του σήματος DVB-T που χρησιμοποιήθηκαν. Τέλος κατά την διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου η απολαβή κεραιάς (*antenna gain*), στην πλευρά των τερματικών, θεωρήθηκε ίση με 7dB, ενώ η ισχύς του θορύβου τέθηκε ίση με -90dBm.

Η εκτέλεση του αλγορίθμου πραγματοποιήθηκε σε δυο στάδια. Στο πρώτο στάδιο το συνολικό κυκλοφοριακό φορτίο των ομάδων χρηστών ήταν ίσο με 185.2 Mbps. Στο δεύτερο στάδιο η συνολική ζήτηση αυξήθηκε κατά ένα παράγοντα της τάξης του 50%, έτσι ώστε να αξιολογηθεί η ικανότητα του αλγορίθμου να αντεπεξέρχεται σε ραγδαίες αλλαγές στην κατάσταση της Περιοχής Εξυπηρέτησης, φαινόμενο συχνό σε περιβάλλοντα με συνεραζόμενα δίκτυα. Επιπλέον δεν τέθηκε κάποιος περιορισμός στον επιτρεπόμενο αριθμό πομπών ανά site και στον αριθμό των διαθέσιμων συχνοτήτων.

Για όλα τα παραπάνω δεδομένα εισόδου ο προτεινόμενος αλγόριθμος παράγαγε τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο.

6.3.2 Αποτελέσματα RRM αλγορίθμου

Το πιο σημαντικό μέτρο αξιολόγησης του παραπάνω αλγορίθμου είναι ο αριθμός των SFNs που απαιτούνται για την κάλυψη των απαιτήσεων σε χωρητικότητα, στην Περιοχή Εξυπηρέτησης. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5, ο θεωρητικός ελάχιστος αριθμός SFNs (κάτω όριο), όταν χρησιμοποιείται το ίδιο σετ παραμέτρων για την διαμόρφωση του σήματος DVB-T, δίδεται από την σχέση $\lceil Total\ Traffic / cap_{sfn} \rceil$. Η τιμή αυτή θα χρησιμοποιηθεί σαν μέτρο σύγκρισης σε σχέση με τις λύσεις που παράγει ο αλγόριθμος. Τονίζεται ιδιαίτερα, ότι ο πιο πάνω τύπος δεν λαμβάνει καθόλου υπόψη του τα φαινόμενα παρεμβολών που εμφανίζονται κατά την διάρκεια της διαδικασίας επέκτασης των SFNs. Συνεπώς, οι τυχόν αποκλίσεις από την θεωρητική ελάχιστη τιμή είναι αναμενόμενες, ιδιαίτερα αν λάβουμε υπόψη μας τα έντονα φαινόμενα παρεμβολών που εμφανίζονται λόγω της επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων ή λόγω των μικρών τιμών του παράγοντα T_g . Στο Σχήμα 6-4 και στον Πίνακα 6-1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του αλγορίθμου σε σχέση με τον απαιτούμενο αριθμό SFNs, κατά την διάρκεια του πρώτου σταδίου του σεναρίου. Επίσης ταυτόχρονα απεικονίζεται και ο θεωρητικός ελάχιστος αριθμός για λόγους σύγκρισης.



Σχήμα 6-4. Αριθμός SFNs – Πρώτο Στάδιο Σεναρίου

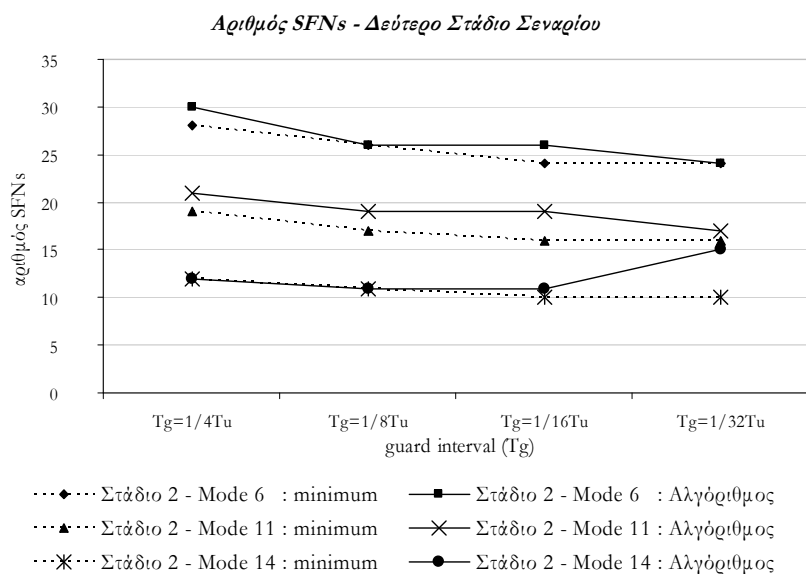
| Χαρακτηριστικά Μετάδοσης | Μεταβλητές | Αποτελέσματα | | | |
|---|--------------------------------------|--------------|-----------|------------|------------|
| Συνολικό κυκλοφοριακό φορτίο 185,23 Mbps | Τιμή T_g | $1/4 T_U$ | $1/8 T_U$ | $1/16 T_U$ | $1/32 T_U$ |
| Στάδιο 1 – Mode 6 (Διαμόρφωση: 16-QAM, code rate: $1/2$, γ_0 : 9,6dB) | Συνολικός ρυθμός μετάδοσης (Mbps) | 9,95 | 11,06 | 11,71 | 12,06 |
| | Θεωρητικός Ελάχιστος αριθμός SFNs | 19 | 17 | 16 | 16 |
| | Αριθμός SFNs με χρήση του αλγορίθμου | 20 | 19 | 18 | 18 |
| Στάδιο 1 – Mode 11 (Διαμόρφωση: 64-QAM, code rate: $1/2$, γ_0 : 14,7dB) | Συνολικός ρυθμός μετάδοσης (Mbps) | 14,93 | 16,59 | 17,56 | 18,1 |
| | Θεωρητικός Ελάχιστος αριθμός SFNs | 13 | 12 | 11 | 11 |
| | Αριθμός SFNs με χρήση του αλγορίθμου | 15 | 14 | 15 | 13 |
| Στάδιο 1 – Mode 14 (Διαμόρφωση: 64-QAM, code rate: $5/6$, γ_0 : 20dB) | Συνολικός ρυθμός μετάδοσης (Mbps) | 24,88 | 27,65 | 29,27 | 30,16 |
| | Θεωρητικός Ελάχιστος αριθμός SFNs | 8 | 7 | 7 | 7 |
| | Αριθμός SFNs με χρήση του αλγορίθμου | 8 | 7 | 9 | 15 |

Πίνακας 6-1. Αποτελέσματα αλγορίθμου σε σχέση με τον αριθμό SFNs – Στάδιο 1, modes 6,11 και

14

Παρατηρούμε ότι για τις περισσότερες περιπτώσεις ο αλγόριθμος έδωσε αποτελέσματα κοντά στην θεωρητική ελάχιστη τιμή. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάστηκαν όταν χρησιμοποιήθηκαν μικρές τιμές του παράγοντα T_g ($1/32 T_U$) και ο ελάχιστος απαιτούμενος λόγος SIR (γ_0) ήταν σχετικά μεγάλος. Σε αυτές τις περιπτώσεις η επέκταση των SFNs σε γειτονικές υποπεριοχές δεν ήταν δυνατή, εξαιτίας της παραβίασης της συνθήκη περιορισμού 1, με αποτέλεσμα την μικρή χρησιμοποίηση (*utilization*) των SFNs.

Στο Σχήμα 6-5 και στον Πίνακα 6-2, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του αλγορίθμου πάλι σε σχέση με τον απαιτούμενο αριθμό SFNs, για το δεύτερο στάδιο του σεναρίου. Υπενθυμίζεται ότι ο συνολικός κυκλοφοριακός φόρτος αυξήθηκε κατά 50%, αγγίζοντας τα 277,85 Mbps.



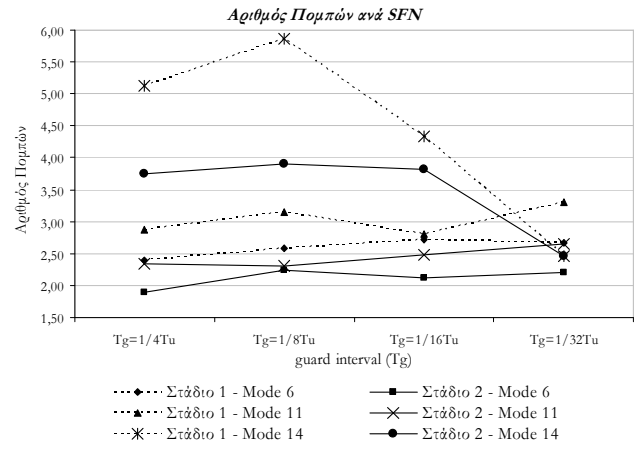
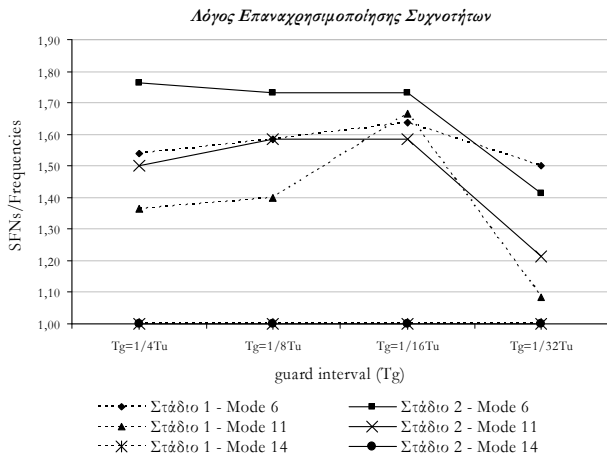
Σχήμα 6-5. Αριθμός SFNs – Πρώτο Στάδιο Σεναρίου

| Χαρακτηριστικά Μετάδοσης | Μεταβλητές | Αποτελέσματα | | | |
|---|--------------------------------------|--------------|-----------|------------|------------|
| | | $1/4 T_U$ | $1/8 T_U$ | $1/16 T_U$ | $1/32 T_U$ |
| Συνολικό κυκλοφοριακό φορτίο $277,85 \text{ Mbps}$ | Τιμή T_g | | | | |
| Στάδιο 2 – Mode 6 (Διαμόρφωση: 16-QAM, code rate: $1/2$, γ_o : 9,6dB) | Συνολικός ρυθμός μετάδοσης (Mbps) | 9,95 | 11,06 | 11,71 | 12,06 |
| | Θεωρητικός Ελάχιστος αριθμός SFNs | 28 | 26 | 24 | 24 |
| | Αριθμός SFNs με χρήση του αλγορίθμου | 30,00 | 26,00 | 26,00 | 24,00 |
| Στάδιο 2 – Mode 11 (Διαμόρφωση: 64-QAM, code rate: $1/2$, γ_o : 14,7dB) | Συνολικός ρυθμός μετάδοσης (Mbps) | 14,93 | 16,59 | 17,56 | 18,1 |
| | Θεωρητικός Ελάχιστος αριθμός SFNs | 19 | 17 | 16 | 16 |
| | Αριθμός SFNs με χρήση του αλγορίθμου | 21 | 19 | 19 | 17 |
| Στάδιο 2 – Mode 14 (Διαμόρφωση: 64-QAM, code rate: $5/6$, γ_o : 20dB) | Συνολικός ρυθμός μετάδοσης (Mbps) | 24,88 | 27,65 | 29,27 | 30,16 |
| | Θεωρητικός Ελάχιστος αριθμός SFNs | 12 | 11 | 10 | 10 |
| | Αριθμός SFNs με χρήση του αλγορίθμου | 12 | 11 | 11 | 15 |

Πίνακας 6-2. Αποτελέσματα αλγορίθμου σε σχέση με τον αριθμό SFNs – Στάδιο 2, modes 6,11 και

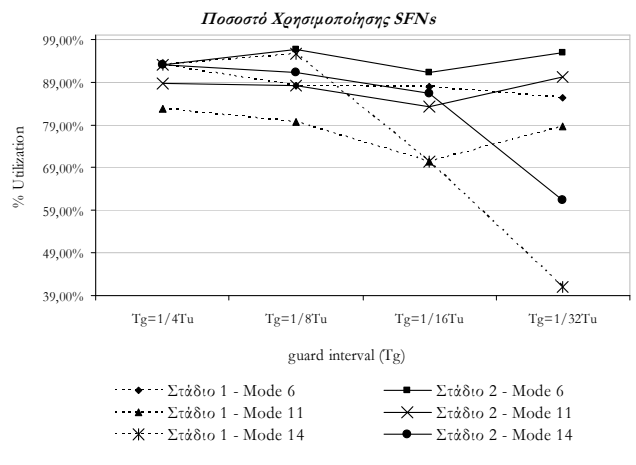
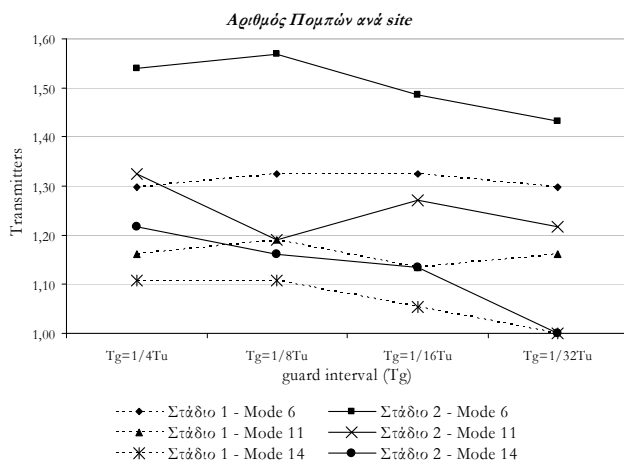
14

Τα αποτελέσματα και για το δεύτερο στάδιο του σεναρίου είναι άκρως ικανοποιητικά, με τις μεγαλύτερες αποκλίσεις να εμφανίζονται για μικρές τιμές του παράγοντα T_g ($1/32 T_U$) και για σχετικά μεγάλες τιμές του ελάχιστου απαιτούμενου λόγου SIR (γ_o). Στην συνέχεια εμφανίζονται μια σειρά από ενδιαφέροντα στατιστικά στοιχεία για κάθε περίπτωση εκτέλεσης του προτεινόμενου αλγορίθμου και για τα δυο στάδια. Πιο συγκεκριμένα, δίδονται στοιχεία σε σχέση με τον λόγο επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων (αριθμός SFNs προς αριθμό συχνοτήτων), τον αριθμό των πομπών ανά SFN αλλά και ανά site, και τέλος το ποσοστό χρησιμοποίησης (*% utilization*) σε κάθε SFN. Τα προαναφερθέντα στατιστικά στοιχεία αναπαριστώνται γραφικά στα διαγράμματα (1) ως (4), στο Σχήμα 6-6, ενώ αμέσως μετά ακολουθούν τα συμπεράσματα που προκύπτουν μέσω της προσεκτικής τους μελέτη.



(1)

(2)



(3)

(4)

Σχήμα 6-6. Στατιστικά στοιχεία ανά περίπτωση εκτέλεσης του αλγορίθμου

Εξετάζοντας τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα.

Διάγραμμα 1 – Λόγος Επαναχρησιμοποίησης Συχνοτήτων : Παρατηρούμε ότι όσο η τιμή του γ_0 μεγαλώνει, καθώς προχωρούμε από το mode 6 προς το 14, το ποσοστό των συχνοτήτων που ανατίθενται σε περισσότερα του ενός SFN, μειώνεται από το 80% (Στάδιο 2 – mode 6) στο 0% (Στάδια 1,2 – mode 14). Επιπλέον, παρατηρούμε ότι ο μικρότερος βαθμός επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων εμφανίζεται για χρονικό όριο ασφαλείας T_g , ίσο με $1/32T_u$.

Διάγραμμα 2 – Αριθμός πομπών ανά SFN : Μέσω του συγκεκριμένου διαγράμματος αναπαρίσταται γραφικά ο βαθμός «ευκολίας» με τον οποίο τα SFN εξαπλώνονται. Οι παράγοντες που μπορεί να περιορίσουν την ικανότητα εξαπλώσεως των SFNs είναι δυο. Ο πρώτος σχετίζεται με την συνολικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, τον οποίον μπορεί να υποστηρίξει το κάθε SFN (cap_{sfn}) και σχετίζεται με τις παραμέτρους διαμόρφωσης του σήματος DVB-T, αλλά και τις απαιτήσεις σε χωρητικότητα ανά Υποπεριοχή Εξυπηρέτησης ($cap_{S_i^{area}}$). Όσο μικρότερη είναι η cap_{sfn} τόσο γρηγορότερα εξαντλείται καθώς το SFN επεκτείνεται, ιδιαίτερα για μεγάλες τιμές των $cap_{S_i^{area}}$, οδηγώντας έτσι σε μικρό αριθμό πομπών ανά SFN. Ο δεύτερος παράγοντας σχετίζεται με το

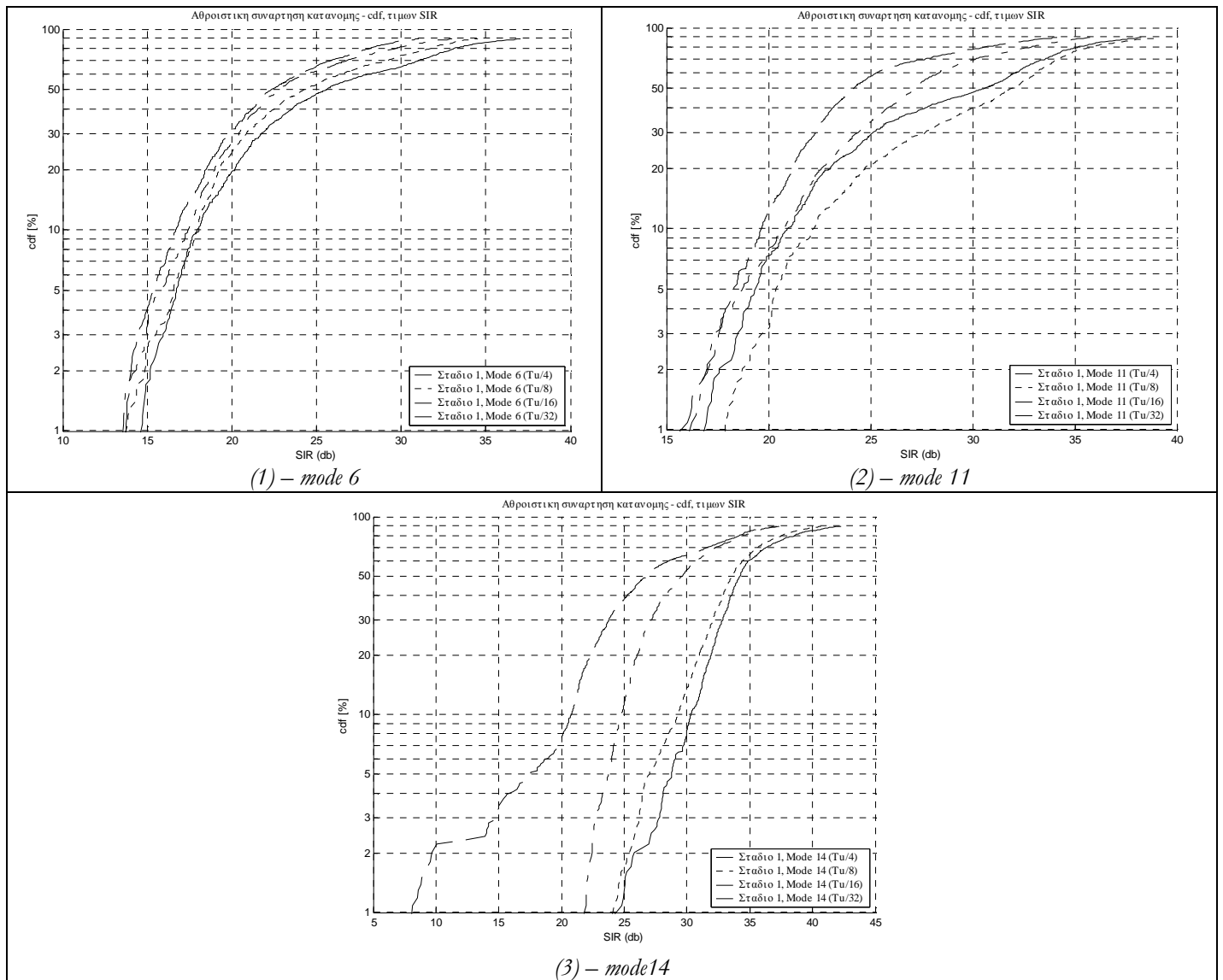
επίπεδα των παρεμβολών που δημιουργούνται κατά την επέκταση των SFNs σε γειτονικές υποπεριοχές και σχετίζονται άμεσα με την τιμή του παράγοντα T_g αλλά και την χρησιμοποίηση κοινών συχνοτήτων. Η επίδραση των δυο προαναφερθέντων παραγόντων επιβεβαιώνεται πλήρως από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο διάγραμμα 2. Πιο συγκεκριμένα, ο αριθμός των πομπών ανά SFN, αυξάνει καθώς περνάμε από το mode 6 προς το mode 14 (αύξηση της cap_{sfn}), ενώ μειώνεται αισθητά για τιμές του παράγοντα T_g , ίσες με $1/32T_U$. Οι όποιες αποκλίσεις εμφανίζονται, αιτιολογούνται πλήρως από τον greedy χαρακτήρα του αλγορίθμου.

Διάγραμμα 3 – Αριθμός πομπών ανά site : Το συγκεκριμένο στατιστικό στοιχείο επηρεάζεται και αυτό με την σειρά του από δυο παράγοντες. Σχετίζεται άμεσα με τον βαθμό εξάπλωσης των SFNs, στην Περιοχή Εξυπηρέτησης. Επιπλέον εξαρτάται από την συνολική απαιτούμενη χωρητικότητα ανά Υποπεριοχή Εξυπηρέτησης, με την έννοια ότι όσο πιο μεγάλη είναι η ζήτηση, τόσο περισσότερα θα είναι τα SFNs που θα χρειαστούν (άρα και οι πομποί) για την κάλυψη των αναγκών. Στο διάγραμμα 3, παρατηρείται ότι για κάθε mode του Σταδίου 2 (κυκλοφοριακό φορτίο αυξημένο κατά 50%), ο αριθμός των πομπών ανά site είναι μεγαλύτερος από τα αντίστοιχα modes για το Στάδιο 1. Επιπλέον, ο αριθμός των πομπών ανά site μειώνεται καθώς μειώνεται και ο βαθμός εξάπλωσης των SFNs, όπως εύκολα προκύπτει μέσω αντιπαράθεση με το διάγραμμα 2.

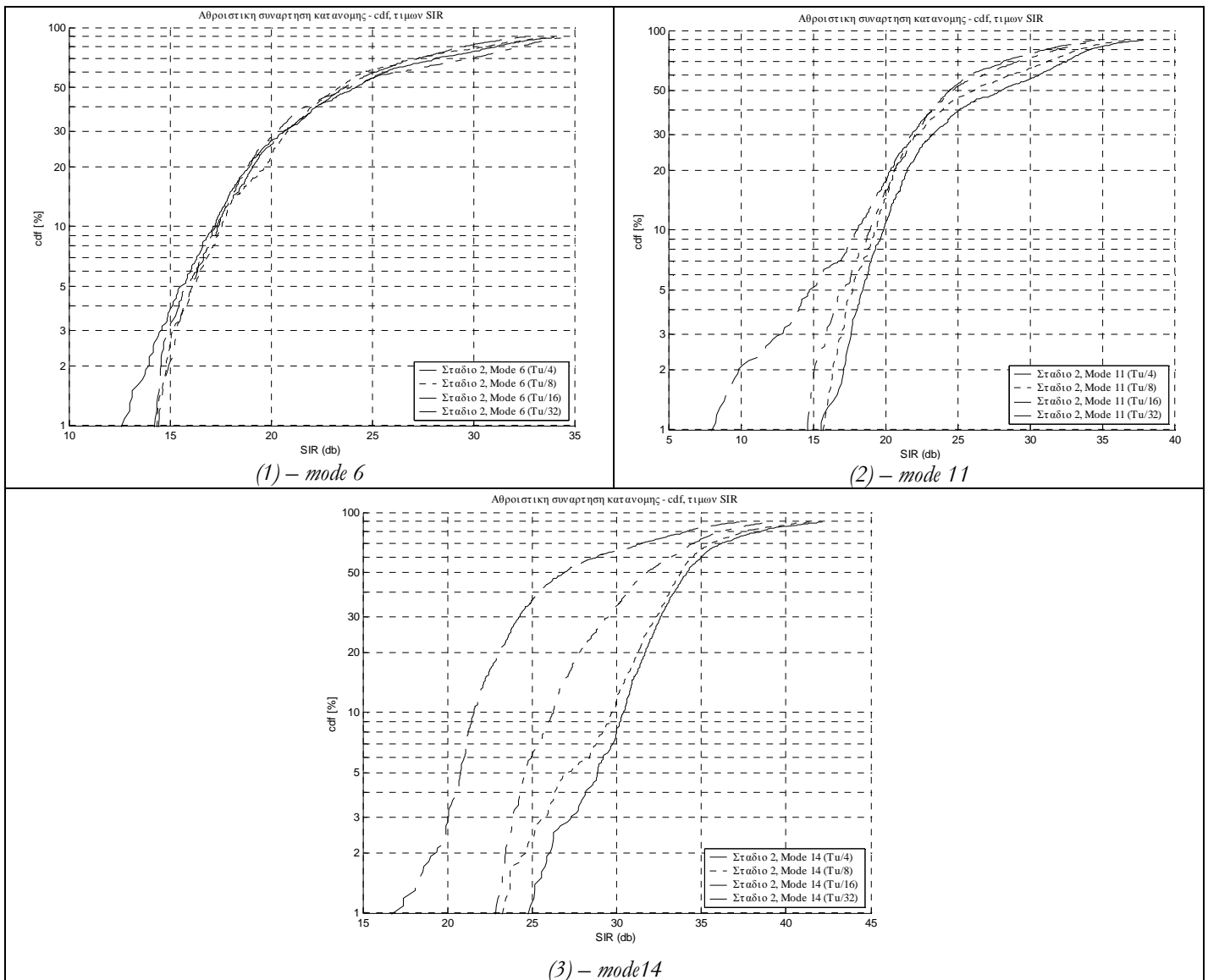
Διάγραμμα 4 – Ποσοστό Χρησιμοποίησης ανά SFN : Τέλος το πολύ σημαντικό στατιστικό στοιχείο της χρησιμοποίησης των SFNs, απεικονίζεται στο διάγραμμα 4. Ο υπολογισμός του πραγματοποιείται μέσω του τύπου $\frac{Total\ Traffic}{\#SFN} \cdot cap_{sfn} \%$. Είναι λοιπόν προφανές, ότι η μετρική

αυτή σχετίζεται άμεσα με την απόδοση του αλγορίθμου. Όσο περισσότερο αποκλίνει ο αριθμός των SFNs ($\#SFN$) που ο αλγόριθμος υπολογίζει, από τον θεωρητικό ελάχιστο, τόσο το ποσοστό χρησιμοποίησης μειώνεται. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο διάγραμμα 4, συμφωνούν πλήρως με την παραπάνω παρατήρηση.

Στην συνέχεια, οι γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν, απεικονίζουν την αθροιστική συνάρτηση κατανομής (*cumulative density function – cdf*) των τιμών SIR, για όλες τις ομάδες χρηστών, για όλες τις περιπτώσεις εκτέλεσης του αλγορίθμου. Μέσω των πιο κάτω διαγραμμάτων, αξιολογείται η αποτελεσματικότητα της ιδέας των δοκιμαστικών σημείων (*Test Points*), κατά την διάρκεια εξάπλωσης των SFNs.

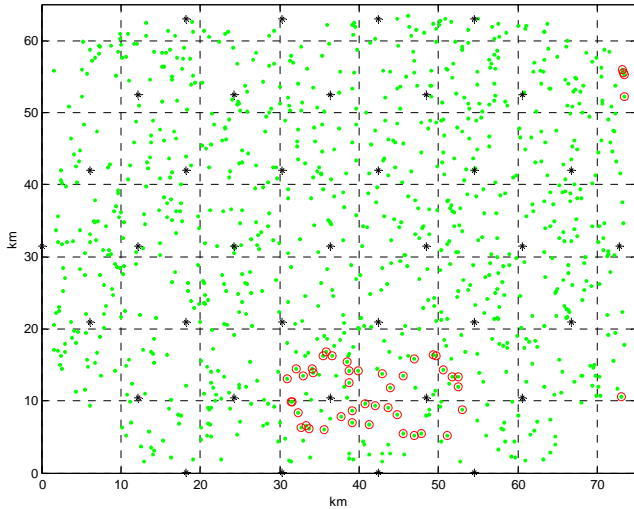
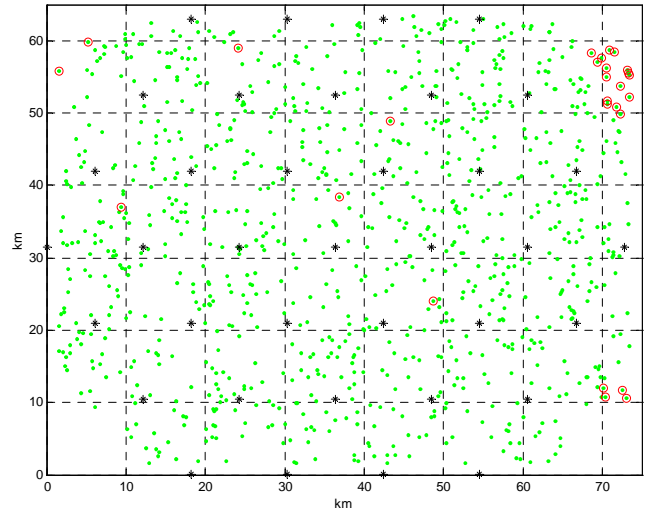


Σχήμα 6-7. Κατανομή cdf, τιμών SIR ανά ομάδα χρηστών, κατά την διάρκεια του πρώτου σταδίου



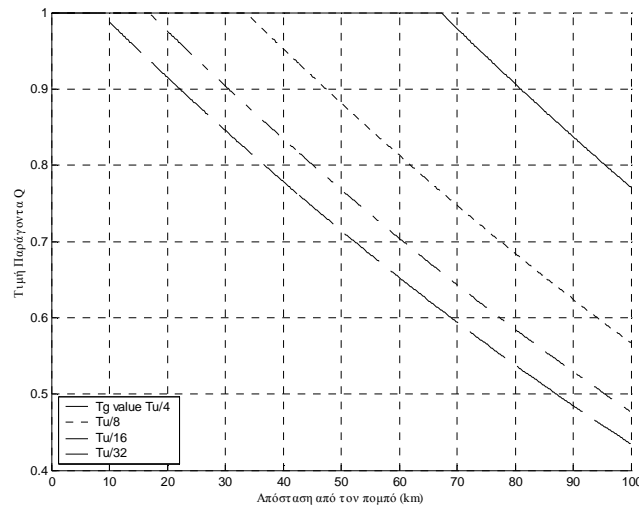
Σχήμα 6-8. Κατανομή cdf, τιμών SIR ανά ομάδα χρηστών, κατά την διάρκεια του δεύτερου σταδίου

Για την πλειονότητα των περιπτώσεων, οι ομάδες χρηστών, μέσω της λύσης που παράχθηκε από τον προτεινόμενο αλγόριθμο, απολαμβάνουν SIR μεγαλύτερο ή ίσο από το ελάχιστο απαιτούμενο. Παρ' όλα αυτά για τις περιπτώσεις του σταδίου 1, mode 14, υπήρξε ένα 7% περίπου των ομάδων χρηστών που δεν κατάφεραν να επιτύχουν την ελάχιστη τιμή των 20dB, με τον παράγοντα T_g , να είναι ίσος με την μέγιστη δυνατή τιμή, δηλαδή $1/32T_U$. Παρόμοιες αποκλίσεις εμφανίστηκαν και για τις περιπτώσεις του σταδίου 2, για τα modes 11 και 14, με τιμή $T_g = 1/32T_U$, οι οποίες ανέρχονταν στα ποσοστά των 4,7% και 2,7% αντίστοιχα. Ενδεικτικά για τις δυο τελευταίες περιπτώσεις, στο Σχήμα 6-9 απεικονίζονται οι ομάδες χρηστών, για τις οποίες ο λόγος SIR, σημείωσε απόκλιση από την επιθυμητή ελάχιστη τιμή. Παρατηρούμε ότι οι τοποθεσίες των εν λόγω ομάδων χρηστών είναι στις συνοριακές γραμμές των Υποπεριοχών Εξυπηρέτησης, όπως ήταν αναμενόμενο.

(1) Στάδιο 2, mode 11, $T_g = 1/32 T_U$ (2) Στάδιο 2, mode 14, $T_g = 1/32 T_U$

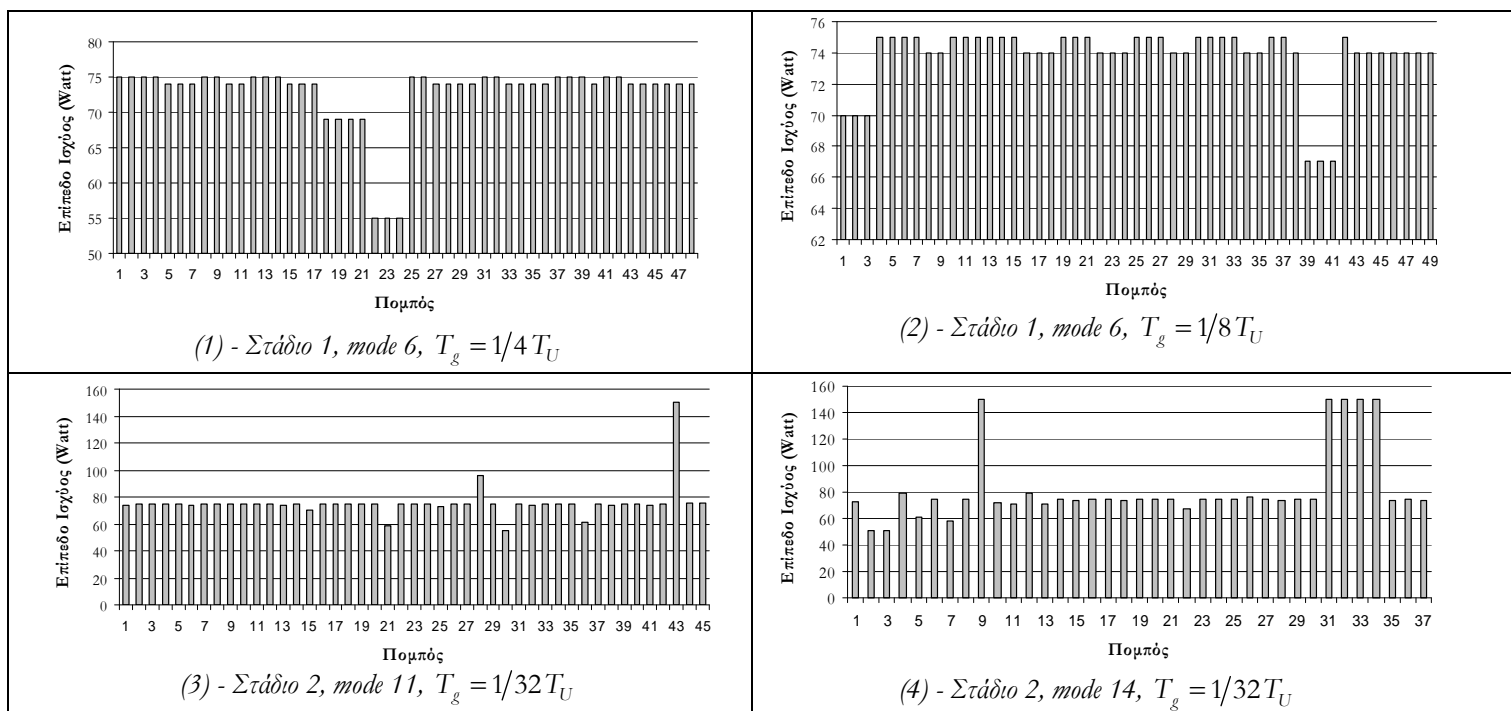
Σχήμα 6-9. Τοποθεσίες χρηστών με λόγο SIR μικρότερο από τον επιθυμητό ελάχιστο

Είναι προφανές από την ως τώρα ανάλυση των αποτελεσμάτων που παρήγαγε ο προτεινόμενος αλγόριθμος, ότι η δομή της τοπολογίας της υπό εξέταση Περιοχής Εξυπηρέτησης (απόσταση μεταξύ site γύρω στα 12 km) δεν ενδείκνυται για τιμές του παράγοντα T_g , ίσες με $1/32 T_U$. Στο επόμενο γράφημα (Σχήμα 6-10) φαίνεται η τιμή $Q_{g,t}$ σε σχέση με την απόσταση από τον πομπό. Η τιμή του $Q_{g,t}$ κινείται στο πεδίο $[0,1]$ και καθορίζει τον βαθμό που το λαμβανόμενο σήμα συνεισφέρει είτε θετικά είτε αρνητικά, στον υπολογισμό του λόγου SIR, σύμφωνα με την εξίσωση 1, που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 6. Για την τιμή του παράγοντα T_g ίση με $1/32 T_U$, η απόσταση μεταξύ του δέκτη και του πομπού για την οποία το λαμβανόμενο σήμα αρχίζει να επηρεάζει και αρνητικά τον λόγο SIR είναι τα 8.4Km μη συμβατή με τα 12km της απόστασης μεταξύ των πομπών στην υπό εξέταση τοπολογία. Μια πυκνότερη δομή από sites θα επέτρεπε την καλλίτερη αξιοποίηση των SFNs που κάνουν χρήση τόσο μικρών τιμών του παράγοντα T_g .



Σχήμα 6-10. Τιμή παράγοντα $Q_{g,t}$, σε σχέση με την απόσταση από τον πομπό

Στην συνέχεια ακολουθούν κάποια ενδεικτικά διαγράμματα, στα οποία εμφανίζονται τα στιγμιότυπα των αποτελεσμάτων που έδωσε ο αλγόριθμός σε σχέση με το σκέλος του προβλήματος που αναφέρεται στον Καθορισμό των Επιπέδων Ενέργειας (Power Allocation), στους πομπούς.



Σχήμα 6-11. Εφαρμοζόμενη ισχύς, στην μετάδοση του DVB-T σήματος, ανά πομπό, σε διάφορες περιπτώσεις

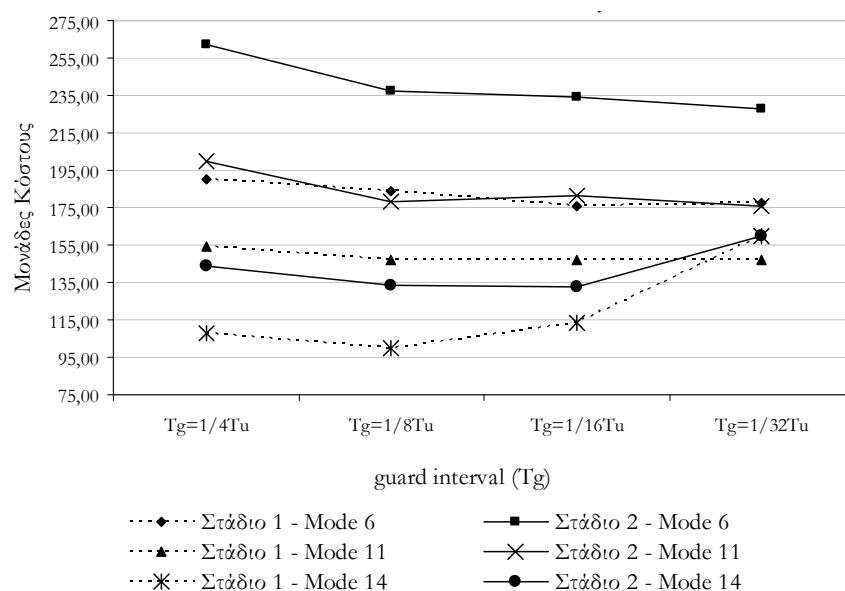
Παρατηρούμε ότι καθώς οι απαιτήσεις για την ελάχιστη τιμή SNR (γ_0) γίνονται πιο αυστηρές, οι περιπτώσεις πομπών που ρυθμίζονται στο να λειτουργούν με το ανώτατο επιτρεπόμενο όριο ισχύος αυξάνουν.

Τέλος, ολοκληρώνουμε την παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή του προτεινόμενου αλγορίθμου, σε μια ρεαλιστική τοπολογία, με την αξιολόγηση του ως προς το κόστος των λύσεων που ο τελευταίος παράγει. Πιο συγκεκριμένα, ορίσαμε ενδεικτικές τιμές για τα $Cost_{SFN}$, $Cost_F$, $Cost_T$ και $Cost_P$, όπως αυτά παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν στην παράγραφο 6.3.3. Ο Πίνακας 6-3 αναγράφει τις τιμές αυτές.

| $Cost_{SFN}$ | $Cost_F$ | $Cost_T$ | $Cost_P$ |
|--------------|----------|----------|----------|
| 5 | 1 | 3 | 0,01 |

Πίνακας 6-3. Ενδεικτικές τιμές κόστους, κρίσιμων μεγεθών κατά την διάρκεια υλοποίησης DVB-T δικτύων.

Το ενδεικτικό κόστος για κάθε λύση που προέκυψε από την εκτέλεση του προτεινόμενου αλγορίθμου, απεικονίζεται στο Σχήμα 6-12. Το κόστος προκύπτει από την εφαρμογή των τιμών που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα και των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου στην εξίσωση 4, του Κεφαλαίου 6.



Σχήμα 6-12. Ενδεικτικό κόστος ανά παραγόμενη λύση, μέσω του προτεινόμενου αλγορίθμου

Παρατηρούμε ότι για το στάδιο 1 οικονομικότερο κόστος εμφανίζει η λύση που χρησιμοποίησε το mode 14 και τιμή T_g ίση με $1/8T_U$, σε ότι αφορά τις παραμέτρους διαμόρφωσης και μετάδοσης του σήματος DVB-T. Για το στάδιο 2 η οικονομικότερη λύση αφορούσε το mode 14 και τιμή T_g ίση με $1/16T_U$. Σε περίπτωση διαφορετικών τιμών στις τιμές του Πίνακας 6-3, τα παραπάνω αποτελέσματα ενδέχεται να διαφοροποιηθούν.

6.4 Ανακεφαλαίωση

Το παρόν κεφάλαιο αφιερώθηκε στην παρουσίαση ενός greedy αλγορίθμου για την επίλυση του προβλήματος RRM στα δίκτυα IP-enabled DVB-T. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος αξιολογήθηκε με την χρήση προσομοίωσης στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab. Τα αποτελέσματα εφαρμογής του σε ένα ρεαλιστικό σενάριο λειτουργίας υπήρξαν άκρως ικανοποιητικά για όλες σχεδόν τις περιπτώσεις. Οι λύσεις του αλγορίθμου περιελάμβαναν τον πλήρη προσδιορισμό των απαραίτητων δικτύων SFN. Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος κατάφερε να προσδιορίσει τις θέσεις και τα επίπεδα εκπεμπόμενης ενέργειας των πομπών που συνθέτουν τα SFNs και να επιλέξει την κατάλληλη συχνότητα λειτουργίας, με στόχο την κάλυψη των απαιτήσεων σε χωρητικότητα στην Περιοχή Εξυπηρέτησης που αναπτύσσονται. Η απόδοση του αλγορίθμου, σε σχέση με τον απαιτούμενο αριθμό των SFNs, πλησίαζε σχεδόν στις περισσότερες περιπτώσεις την βέλτιστη θεωρητική λύση. Τέλος, η ταχύτητα εκτέλεσης του προτεινόμενου αλγορίθμου ήταν της τάξης των μερικών δευτερολέπτων ακόμα και για το προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab, καθιστώντας τον άκρως ελκυστικό για την χρησιμοποίησή του στην υλοποίηση διαχειριστικών συστημάτων για τα δίκτυα DVB-T.

7 Συμπεράσματα – Μελλοντικές Προοπτικές

Με την ολοκλήρωση της παρούσα διδακτορικής διατριβής, ο μελλοντικός ερευνητής έχει στην διάθεση του ένα πολύτιμο σημείο αναφοράς, στην πορεία ενσωμάτωσης των συστημάτων DVB-T, αλλά και γενικότερα ενοποίησης των Σύγχρονων Ασύρματων Δικτύων Επικοινωνίας. Η σπουδαιότητα της έγκειται στο πρωτοποριακό της χαρακτήρα, αφού ο θεωρητικός σχεδιασμός ενός Περιβάλλοντος Ασύρματων Ετερογενών Δικτύων (ΠΑΕΔ), στα πλαίσια των συστημάτων 4^{ης} Γενιάς, συνοδεύεται από την εφαρμογή του σε πραγματικά δίκτυα, συμπεριλαμβανομένου και του DVB-T. Με τον τρόπο αυτό όχι μόνο πιστοποιείται με την πιο έγκυρη μέθοδο η χρησιμότητα και τα οφέλη που θα προκύψουν, μέσω της ενσωμάτωσης των συστημάτων DVB-T (και γενικότερα της ενοποίησης διαφορετικών ασύρματων δικτύων), στο τομέα της προσφοράς υπηρεσιών πρόσβασης, αλλά ανατροφοδοτείται με πολύτιμα συμπεράσματα και βελτιώνεται η διαδικασία του σχεδιασμού. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και οι λύσεις που προδιαγράφηκαν για όλες τις λειτουργικές απαιτήσεις που προέκυψαν, μετά την φάση του σχεδιασμού, είτε στηρίχθηκαν σε κοινώς αποδεκτές και προτυποποιημένες λύσεις από την επιστημονική κοινότητα, είτε σε τεχνολογικούς νεωτερισμούς που εισήχθησαν και δοκιμάστηκαν για πρώτη φορά. Ιδιαίτερη προσοχή, δόθηκε σε θέματα όπως:

- Η διατήρηση της συμβατότητας των δικτύων με τους παραδοσιακούς χρήστες.
- Η επίτευξη της μικρότερης δυνατής επιβάρυνσης σε σχέση με την αυτοδύναμη λειτουργία των επιμέρους δικτύων, με στόχο την δυνατότητα της άμεσης εφαρμογής σε εμπορικά δίκτυα.
- Η προς τα πάνω επεκτασιμότητα (scalability) του προτεινόμενου συστήματος, μέσω της κατανεμημένης μορφής της διαχειριστικής οντότητας και της χρήσης του υβριδικού πυρήνα.
- Η δυνατότητα προσφοράς υπηρεσιών με ελάχιστο εγγυημένο επίπεδο ποιότητας ακόμα και σε δίκτυα του τύπου best effort.
- Η ολοκληρωμένη διαχείριση δικτύων, τερματικών και υπηρεσιών, με την δυνατότητα ορισμού του επιπέδου αυτονομίας.
- Εφαρμογή πολιτικών για γρήγορο επανακαθορισμό των παραμέτρων λειτουργίας των συστημάτων DVB-T, με στόχο την βελτιστοποιημένη χρήση των προσφερόμενων δικτυακών πόρων αλλά και την αύξηση του αριθμού των χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα.

Η ικανοποίηση των πιο πάνω ιδιοτήτων, μέσω της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής και σχεδιασμού για την ενσωμάτωση των συστημάτων DVB-T, όπως παρουσιάστηκαν από την διδακτορική μου διατριβή, οδηγεί στην άμεση υιοθέτηση προς εφαρμογή της από τους NPs. Το προηγούμενο συμπέρασμα, τονίζεται ιδιαίτερα, διότι είναι σε απόλυτη συμφωνία με την προσωπική μου άποψη, ότι οι ερευνητικές προσπάθειες ενός Μηχανικού, θα πρέπει πάντα να κινούνται προς την κατεύθυνση της ουσιαστικής προσφοράς στο κοινωνικό σύνολο. Η πρωτοτυπία που παρουσιάζει η ερευνητική μου δραστηριότητα, όπως αυτό αποδείχθηκε σε όλα τα στάδια της εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής, αλλά και με μια σειρά δημοσιεύσεων και ανακοινώσεων σε έγκριτα

επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια, σε συνδυασμό με την εφαρμοσιμότητα που η προσπάθεια υλοποίησης κατέδειξε εμφανέστατα, επιβεβαιώνουν πλήρως την προσήλωση μου στην παραπάνω άποψη.

Κατά την διάρκεια των ερευνητικών μου προσπαθειών, ο στόχος της εισαγωγής καινοτομιών και στοιχείων πρωτοτυπίας, στο πεδίο ενδιαφέροντος μου, παρέμενε πάντα σε πρώτη προτεραιότητα. Η επόμενη παράγραφο αφιερώνεται στην παρουσίαση τους.

7.1 Ανακεφαλαίωση Καινοτομικών Στοιχείων της Διατριβής

Τα καινοτομικά στοιχεία της παρούσας διδακτορικής διατριβής συνοψίζονται στις εξής κατηγορίες :

- **Κατάλληλος συνδυασμός αρχιτεκτονικών μοτίβων, με στόχο την ενοποίηση ετερογενών ασύρματων δικτύων και ενσωμάτωση των συστημάτων DVB-T.**

Η προσπάθεια ενοποίησης των συστημάτων DVB-T με δυο διαφορετικά ασύρματα δίκτυα (GPRS, IEEE 802.11b), από τα οποία το ένα (GPRS) ανήκε στο διαχειριστικό τομέα μιας εμπορικής εταιρείας, μας οδήγησε στο να προτείνουμε ένα συνδυασμό των μοντέλων που περιγράφονται στην αρχιτεκτονική Χαλαρής Σύζευξης (*Loose-Coupling*). Πιο συγκεκριμένα, η διασύνδεση του δικτύου GPRS με τα υπόλοιπα δύο συστήματα, επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης του απλού αρχιτεκτονικού μοντέλου της Χαλαρής Σύζευξης. Τα δίκτυα WLAN και DVB-T ενοποιούνται διαμέσου του λεγόμενου υβριδικού πυρήνα (*hybrid core*). Η ελκυστικότητα που παρουσιάζει η συνδυαστική αρχιτεκτονική που εμείς προτείνουμε έγκειται στο μικρό κόστος υλοποίησης, στις περιορισμένες επεμβάσεις στον ήδη υπάρχοντα εξοπλισμό των συστημάτων DVB-T, στην διατήρηση χαμηλού βαθμού πολυπλοκότητας σε σχέση με τις λειτουργικές απαιτήσεις, αλλά και την δυνατότητα να ενσωματωθούν μελλοντικά και νέες ασύρματες τεχνολογίες.

- **Υλοποίηση της προτεινόμενης Αρχιτεκτονικής και αντιμετώπιση όλων των Λειτουργικών Απαιτήσεων στην πορεία δημιουργίας Δικτύων 4^{ης} Γενιάς και με την χρήση συστημάτων DVB-T.**

Η εφαρμογή και η υλοποίηση της αρχιτεκτονικής ενσωμάτωσης των συστημάτων DVB-T στα πλαίσια των Δικτύων 4^{ης} Γενιάς, με δυο πραγματικά ασύρματα δίκτυα (παγκόσμια πρωτοτυπία), δημιούργησε μια σειρά από λειτουργικές απαιτήσεις (*operational requirements*), οι οποίες ικανοποιήθηκαν με αποτελεσματικότητα, ώστε να διασφαλιστεί η επιτυχία του εγχειρήματος. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην πορεία υλοποίησης και οι τεχνικές λύσεις που προτάθηκαν δεν εξαρτώνται από το είδος των δικτύων, άρα τις καθιστά εφαρμόσιμες σε κάθε ανάλογη προσπάθεια. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν τα εξής :

- ♦ Αναβάθμιση προηγμένων Διαχειριστικών Συστημάτων Δικτύων 4^{ης} Γενιάς, με την δυνατότητα παρακολούθησης του επιπέδου κυκλοφοριακού φορτίου ανά σύστημα και

ιδιαίτερα για την τεχνολογία DVB-T, σε επίπεδο στοιχείων πρόσβασης και ανίχνευσης καταστάσεων συμφόρησης, με την χρήση έξυπνων μεθόδων μέτρησης.

- ◆ Προτάθηκε μια ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική για την δημιουργία πολυτροπικών (multi-mode) τερματικών. Η αρχιτεκτονική συμπληρώθηκε με την εφαρμογή της κατά την διάρκεια υλοποίησης πρότυπων τερματικών 4^{ης} Γενιάς, με βάση την απαίτηση να συνεργάζονται με τα τρία διαφορετικά δίκτυα και ειδικότερα για την περίπτωση του DVB-T, τους Διαχειριστές των δικτύων και τους πελάτες των προηγμένων εφαρμογών.
- ◆ Πλήρεις λειτουργίες διαχείρισης τερματικών με την εισαγωγή νέου πρωτοκόλλου (NACP – Network Access Coordination Protocol), το οποίο είναι υπεύθυνο και για τον προσδιορισμό του καναλιού διάδρασης, στην περίπτωση όπου το DVB-T χρησιμοποιείται ως το κύριο δίκτυο πρόσβασης.

Επίσης προτάθηκαν και υλοποιήθηκαν λύσεις για μια σειρά θεμάτων όπως:

- ◆ Υποστήριξη διαδραστικών υπηρεσιών εκ μέρους του δικτύου DVB-T, μέσω της υλοποίησης του RIP, είτε με την βοήθεια του GPRS είτε με του WLAN.
- ◆ Διαλειτουργικότητα (*interoperability*) με το στοιχείο NAT του GPRS
- ◆ Υποστήριξη Προηγμένων Εφαρμογών, στην πλευρά του τερματικού.

Η επόμενη καινοτομική προσφορά της διδακτορικής που διατριβής, αν και εντάσσεται στην προηγούμενη κατηγορία, αναφέρεται ως ανεξάρτητη λόγω της μεγάλης σπουδαιότητας της.

▪ Διαχείριση Κινητικότητας.

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική και σχεδιασμός που ακολουθήθηκαν, υποστήριζαν αποτελεσματικές (*seamless*) διασυστηματικές μεταπομπές (*inter-system* ή *vertical handovers*) μεταξύ διαφορετικών δικτύων, αλλά και ενδοσυστηματικές μεταπομπές (*intra-system* ή *horizontal handovers*) μεταξύ διαφορετικών σημείων πρόσβασης του ίδιου δικτύου. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται για την περίπτωση των συστημάτων DVB-T, όπου για πρώτη φορά, σε παγκόσμιο επίπεδο, αντιμετωπίζεται με μεγάλη αποτελεσματικότητα το θέμα της διασυστηματικής κινητικότητας από και προς το δίκτυο αυτό. Αναλυτικότερα πραγματοποιήθηκαν τα εξής:

- ◆ Αναβάθμιση των multi-mode τερματικών με κατάλληλο λογισμικό με στόχο την διαχείριση των δικτυακών συνδέσεων (συμπεριλαμβανομένου του μηχανισμού κινητικότητας) και των ενεργών εφαρμογών.
- ◆ Χρήση και προσαρμογή του MIPv4 για την υποστήριξη αδιάλειπτων διασυστηματικών μεταπομπών μεταξύ διαφορετικών ασύρματων τεχνολογιών, όπως η περίπτωση διαλειτουργικότητας με το στοιχείο GPRS NAT.
- ◆ Η εκμετάλλευση και συνεργασία με τους εγγενείς μηχανισμούς κινητικότητας των επιμέρους ασυρμάτων δικτύων (*Inter Access Point Protocol* στην περίπτωση των WLANs και τον μηχανισμό μεταπομπών που διαθέτουν τα κυψελωτά GPRS δίκτυα).
- ◆ Εκμετάλλευση low-level (π.χ. *radio level*) αλλά και high-level (π.χ. στατιστικά δεδομένα προερχόμενα από το επίπεδο των εφαρμογών) πληροφοριών με στόχο την βελτιστοποίηση

των μεταπομπών στην πλευρά του τερματικού. Οι πιο πάνω πληροφορίες αξιοποιήθηκαν με σκοπό την γένεση *triggering events* προς την κατεύθυνση προγραμματισμένων και προληπτικών μεταπομπών, από την πλευρά του τερματικού και της διαχειριστικής οντότητας.

- ◆ Προσαρμογή και αναβάθμιση των εφαρμογών (*application adaptation*) και του περιεχομένου των υπηρεσιών (*content adaptation*) στις απαιτήσεις της λειτουργίας της κινητικότητας, στα πλαίσια του Δικτύου 4^{ης} Γενιάς.

Πολύ σημαντικό ρόλο στον προτεινόμενο μηχανισμό κινητικότητας, διαδραμάτισε το Πρωτόκολλο Συντονισμού Προσπέλασης Δικτύου (*Network Access Co-ordination Protocol – NACP*). Μέσω του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου επιτρέπεται από την πλευρά του διαχειριστή δικτύου η καθοδήγηση (ή σε διαφορετικές συνθήκες η επιβολή) του τερματικού στην επιλογή της καλλίτερης ασύρματης τεχνολογίας κάθε φορά. Το πρωτόκολλο αυτό βοηθά στην ανταλλαγή των απαραίτητων εκείνων πληροφοριών μεταξύ του τερματικού και του διαχειριστή του δικτύου με στόχο την επίτευξη σκοπών, όπως η βέλτιστη χρήση των προσφερόμενων δικτυακών πόρων, προσφορά καλλίτερου επιπέδου υπηρεσιών, υλοποίηση συγκεκριμένων πολιτικών διαχείρισης των δικτύων κ.α. Η διάδραση μεταξύ τερματικού και διαχειριστικής οντότητας, όπως αυτή υλοποιείται μέσω του NACP, αναβαθμίζει τον μηχανισμό κινητικότητας αφού επιτυγχάνει να απαντήσει στα τρία βασικά ερωτήματα που τίθενται κατά την διάρκεια των μεταπομπών. Τα ερωτήματα αυτά αναφέρονται στην χρονική στιγμή και τον λόγο της μεταπομπής (πότε και γιατί), αλλά και στο ποιο θα είναι το δίκτυο προορισμού (*target network*). Επισημαίνεται εδώ ότι η εισαγωγή του NACP δεν επηρεάζει τους υποκείμενους μηχανισμούς κινητικότητας, αφού δρα συμπληρωματικά και όχι μόνο επιτρέπει την παράλληλη εξέλιξη τους, αλλά προσβλέπει στην βελτίωση τους.

- **Πειραματική αξιολόγηση των ωφελειών που προκύπτουν μέσω της ενσωμάτωσης των συστημάτων DVB-T σε Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς.**

Στην παρούσα διδακτορική, παρουσιάστηκαν, μια σειρά από μετρήσεις με στόχο την αξιολόγηση της ενσωμάτωσης των συστημάτων DVB-T, σε σχέση με τις δυνατότητες του στην προσφορά πολυμεσιικών υπηρεσιών IP, τόσο σε επίπεδο συστήματος όσο και σε αυτό του χρήστη (*system and user plane evaluation*). Πιο συγκεκριμένα, διερευνήθηκαν εκτενώς οι επιδόσεις των επιμέρους ασύρματων δικτύων αλλά και του DVB-T, σε σχέση με την μετρική του RTD (σημαντική για τις TCP-based υπηρεσίες) και την μετρική του OWD (σημαντική για τις UDP-based υπηρεσίες). Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε μια ενδελεχής αξιολόγηση του μηχανισμού κινητικότητας που υιοθετήθηκε, στα πλαίσια υλοποίησης της πειραματικής πλατφόρμας, με χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την συμβατότητα των υπηρεσιών και την αντοχή τους, στα μεταβατικά φαινόμενα που εμφανίζονται κατά την διάρκεια των διασυστηματικών μεταπομπών (απώλεια πακέτων ή υπερβολική αύξηση του delay). Τέλος, μέσω

της διεξαγωγής μιας σειράς από ρεαλιστικά σενάρια λειτουργίας, επιβεβαιώθηκε η αποτελεσματικότητα των συστημάτων DVB-T, στην ουσιαστική αντιμετώπιση καταστάσεων συμφόρησης σε ένα από τα συνιστώσα μέρη του Δικτύου 4^{ης} Γενιάς και στην περίπτωση απώλειας της ραδιοαύλησης στην πλευρά του τερματικού.

Η εκτέλεση των πιο πάνω πειραμάτων και τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατέδειξαν με τον πιο κατηγορηματικό τρόπο τα οφέλη που θα προκύψουν από την δημιουργία Δικτύων 4^{ης} Γενιάς και με την συμμετοχή των συστημάτων DVB-T, ενώ παρουσιάζουν πολύ μεγάλο ενδιαφέρον λόγω της μοναδικότητας τους σε παγκόσμιο επίπεδο.

Η δεύτερη μεγάλη κατηγορία καινοτομικών προσφορών της παρούσας διδακτορικής διατριβής επικεντρώνεται στον πολύ σημαντικό ρόλο που θα διαδραματίσουν οι διαδικασίες RRM (Radio Resource Management), στην πορεία υλοποίησης των Δικτύων 4^{ης} Γενιάς. Πιο συγκεκριμένα, η απαίτηση για γρήγορο επανακαθορισμό των παραμέτρων λειτουργίας των επιμέρους συστημάτων, με στόχο την βελτιστοποιημένη χρήση των προσφερόμενων δικτυακών πόρων αλλά και την αύξηση του αριθμού των χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα, γίνεται εντονότερη σε αυτά τα περιβάλλοντα. Ως πεδίο εφαρμογής, παρουσιάστηκε και αναλύθηκε το πρόβλημα RRM για τα δίκτυα DVB-T. Πιο συγκεκριμένα :

- **Πλήρης ανάλυση και μοντελοποίηση του προβλήματος RRM στα δίκτυα IP-enabled DVB-T (Διαχείριση Πόρων σε πολλαπλά συστήματα DVB-T, αποκλειστικής παροχής υπηρεσιών IP με αρχιτεκτονική SFN).**

Οι λόγοι που μας οδήγησαν στο να επικεντρώσουμε την προσοχή μας στο συγκεκριμένο τύπο δικτύου σχετίζονταν με τις αυξημένες δυνατότητες του, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν στα πλαίσια των συστημάτων 4^{ης} Γενιάς αλλά και στην μικρή ερευνητική δραστηριότητα που υπάρχει στον συγκεκριμένο τομέα. Προς την κατεύθυνση αυτή, παρήχθησαν τα εξής καινοτομικά αποτελέσματα :

- ◆ Μαθηματική διατύπωση των δεδομένων εισόδου-εξόδου, των συνθηκών περιορισμών και των επιθυμητών στόχων των διαδικασιών RRM για την περίπτωση των πολλαπλών συστημάτων DVB-T, αποκλειστικής παροχής υπηρεσιών IP με αρχιτεκτονική SFN.
- ◆ Αξιολόγηση της διαδεδομένης, στα δίκτυα DVB-T, αρχιτεκτονικής SFN μέσω προσομοίωσης. Σύγκριση με την αρχιτεκτονική MFN.
- ◆ Αναγωγή του προβλήματος διαχείρισης πόρων των πολλαπλών συστημάτων DVB-T, αποκλειστικής παροχής υπηρεσιών IP με αρχιτεκτονική SFN σε δύο γνωστά NP-Complete προβλήματα (graph coloring και bin packing).

▪ **Προδιαγραφή και υλοποίηση ενός «greedy» (άπληστου) ευριστικού αλγορίθμου για την υλοποίηση των διαδικασιών RRM στα δίκτυα IP-enabled DVB-T.**

- ◆ Παρουσίαση ενός greedy αλγορίθμου για την επίλυση του προβλήματος RRM στα IP-enabled DVB-T δίκτυα.
- ◆ Ο προτεινόμενος αλγόριθμος αξιολογήθηκε με την χρήση προσομοίωσης, και τα αποτελέσματα εφαρμογής του σε ένα ρεαλιστικό σενάριο λειτουργίας υπήρξαν άκρως ικανοποιητικά για όλες σχεδόν τις περιπτώσεις. Οι λύσεις του αλγορίθμου περιελάμβαναν τον πλήρη προσδιορισμό των απαραίτητων παραμέτρων λειτουργίας του απαιτούμενου αριθμού δικτύων SFN. Πιο συγκεκριμένα, στα δεδομένα εξόδου του αλγορίθμου συγκαταλέγονται τα παρακάτω στοιχεία:
 - Προσδιορισμός του αριθμού και των σημείων ανάπτυξης (*RAPs* ή *sites*) των απαιτούμενων πομπών (*transmitters*) των δικτύων SFN (στον ρόλο του *RAB*), με σκοπό την κάλυψη των αναγκών της Περιοχής Εξυπηρέτησης σε χωρητικότητα και επίπεδο λαμβανόμενου σήματος.
 - Καθορισμός της συχνότητας λειτουργίας ανά SFN, με στόχο την μεγιστοποίηση του παράγοντα επαναχρησιμοποίησης και ελαχιστοποίηση του επιπέδου παρεμβολών.
 - Προσδιορισμός των επιπέδων εκπεμπόμενης ενέργειας σε κάθε πομπό ανά δίκτυο SFN.
 - Ανάθεση των χρηστών στο κατάλληλο SFN με στόχο την εξυπηρέτηση των αιτούμενων υπηρεσιών τους.

Η απόδοση του αλγορίθμου, σε σχέση με τον απαιτούμενο αριθμό των SFNs, πλησίαζε σχεδόν στις περισσότερες περιπτώσεις το κατώτατο θεωρητικό όριο, ενώ επιτύγχανε και μεγάλο ποσοστό επαναχρησιμοποίησης των διαθέσιμων συχνοτήτων. Τέλος, η ταχύτητα εκτέλεσης του προτεινόμενου αλγορίθμου ήταν της τάξης των μερικών δευτερολέπτων, καθιστώντας τον άκρως ελκυστικό για την χρησιμοποίηση του στην υλοποίηση διαχειριστικών συστημάτων για τα δίκτυα DVB-T.

Ολοκληρώνοντας, σημειώνω ότι καθ' όλη την διάρκεια της διδακτορικής διατριβής μου, δεν απέφυγα να επισημάνω τις τυχόν αδυναμίες που παρουσίαζαν κάποιες από τις επιλογές μου (π.χ. πρωτόκολλο MIPv4), με παράλληλη πάντα την παράθεση κάποιων προτάσεων μου για μελλοντική βελτίωση. Με το τρόπο αυτό, ήδη μέσα από την ανάγνωση των προηγούμενων κεφαλαίων, έχουν διαφανεί κάποια ενδιαφέροντα θέματα για τους μελλοντικούς ερευνητές. Η επόμενη παράγραφος θα προσπαθήσει να παρουσιάσει μια συστηματική καταγραφή τους.

7.2 Μελλοντικά Ερευνητικά Θέματα

Η παρούσα διδακτορική διατριβή, εκτός των άλλων, θέτει τις βάσεις για μια σειρά από ενδιαφέροντα ερευνητικά θέματα, τα οποία χρήζουν της προσοχής του μελλοντικού ερευνητή. Στην συνέχεια της παραγράφου, ακολουθεί μια περιγραφή των πιθανών επεκτάσεων που σχετίζονται με την παρούσα διατριβή, αλλά οριοθετούνται και θέματα που πρέπει οπωσδήποτε να απασχολήσουν την παγκόσμια ερευνητική κοινότητα, στην πορεία υλοποίησης της ιδέας των Δικτύων 4^{ης} Γενιάς.

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική επιτρέπει την εύκολη ενσωμάτωση στις υποδομές ενός Δικτύου 4^{ης} Γενιάς και άλλων, διαφορετικής τεχνολογίας, ασύρματων δικτύων, εκτός αυτών που παρουσιάστηκαν. Στην κατεύθυνση αυτή παρουσιάζουν μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον, τα θέματα που απορρέουν από την προσθήκη των δικτύων 3^{ης} Γενιάς (π.χ. UMTS). Οι αυξημένες χωρητικότητες που τα συστήματα αυτά προσφέρουν, σε συνδυασμό με τις δυνατότητες των άλλων δύο μεγάλων κατηγοριών, ευρυζωνικών δικτύων (WLAN και DVB-T), είναι σίγουρο ότι θα «απογειώσουν» το επίπεδο και την ποιότητα των προσφερόμενων υπηρεσιών.

Σημαντική προσπάθεια πρέπει να καταβληθεί και προς την κατεύθυνση εξέλιξης και βελτιστοποίησης των μηχανισμών κινητικότητας. Σημείο καμπής θα αποτελέσει η μετάβαση στην έκδοση 6 του πρωτοκόλλου IP (IPv6), όλων των ασύρματων δικτύων αλλά και του Internet. Μέσω αυτής της κίνησης (και γενικότερα της υιοθέτησης του πρωτοκόλλου IP, ως του κυρίαρχου μέσου για την μεταφορά των δεδομένων), αναμένεται να δοθεί μια πολύ σημαντική ώθηση στην ιδέα των Δικτύων 4^{ης} Γενιάς. Η βελτίωση που θα επέλθει, μέσω της υιοθέτησης του πρωτοκόλλου IPv6, σε συνδυασμό με συμπληρωματικά πρωτόκολλα διαχείρισης της (όπως το NACP) κινητικότητας, θα μειώσει στο ελάχιστο τα μεταβατικά φαινόμενα (δικαιυμάνσεις delay και απώλειες πακέτων), κατά την διάρκεια των διασυστηματικών μεταπομπών. Η ενσωμάτωση του πρωτοκόλλου NACP, στα μηνύματα του MIP, αποτελεί ένα ενδιαφέρον επόμενο βήμα. Οι εξελίξεις στο συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο, αποτελούν σημείο κλειδί για την επιτυχημένη υλοποίηση συστημάτων 4^{ης} Γενιάς και πρέπει να τύχουν μεγάλης προσοχής εκ μέρους της ερευνητικής κοινότητας.

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η δημιουργία και η εξέλιξη των πολυτροπικών (multi-mode) τερματικών. Ήδη, οι κατασκευαστές έχουν υλοποιήσει μια σειρά από τερματικές συσκευές, με την δυνατότητα πρόσβασης, σε παραπάνω από ένα ασύρματα δίκτυα. Η στατική, χειροκίνητη επιλογή του τελικού ενεργού δικτύου, πρέπει να αντικατασταθεί από ολοκληρωμένους μηχανισμούς δυναμικής διαχείρισης των υπαρχόντων διεπαφών και υπηρεσιών, στην πλευρά του τερματικού. Ο ρόλος της διαχειριστικής οντότητας του περιβάλλοντος ετερογενών ασύρματων δικτύων, αναμένεται καθοριστικός στην καθοδήγηση του τερματικού στην επιλογή του πιο κατάλληλου δικτύου. Η παρούσα διδακτορική διατριβή παρουσίασε ένα πρωτότυπο αρχιτεκτονικό μοντέλο για την ανάπτυξη multi-mode τερματικών. Αναμένεται με ενδιαφέρον, η συνέχιση της προσπάθειας από τους κατασκευαστές hardware και software, στην κατεύθυνση της παρουσίασης ολοκληρωμένων λύσεων

σε επίπεδο υλικού, αλλά και την εγγενή υποστήριξη από τα υπάρχοντα λειτουργικά συστήματα, των προηγμένων λειτουργιών, για τις οποίες ήταν υπεύθυνα τα TSMS modules.

Τα ολοκληρωμένα διαχειριστικά συστήματα, θα αποτελέσουν την αιχμή του δόρατος στην προσπάθεια υλοποίησης της ιδέας των συστημάτων 4^{ης} Γενιάς. Η λειτουργία τους θα αφορά την διαχείριση των χρηστών, των υπηρεσιών και των δικτύων. Εστιάζοντας στον ρόλο των διαδικασιών RRM, τονίζεται η αναγκαιότητα επέκτασής τους, σε όλα τα είδη των ασύρματων τεχνολογιών, μέσα από την δημιουργία έξυπνων, γρήγορων και αποδοτικών αλγορίθμων. Ήδη, η παρούσα διδακτορική διατριβή έβαλε τις βάσεις για το πρόβλημα RRM, στα δίκτυα IP-enabled DVB-T. Ο μελλοντικός ερευνητής έχει στην διάθεση του ένα ισχυρό μαθηματικό μοντέλο λειτουργίας του δικτύου DVB-T, το οποίο μπορεί να εξελίξει και να εμπλουτίσει με νέα στοιχεία και παραμέτρους (π.χ. γεωγραφικές συνθήκες περιοχής εξυπηρέτησης, χρήση ακριβέστερων μοντέλων διάδοσης κ.α.). Επιπλέον, ενδιαφέρον παρουσιάζει ο συνδυασμός των διαδικασιών Διαχείρισης Ασύρματων Πόρων με τις πολιτικές διαμοιρασμού του ρεύματος μεταφοράς MPEG-2 ανά SFN (MAMBO/DiffServ κτλ). Τέλος, είναι απαραίτητη η μελέτη και η υλοποίηση μηχανισμών που θα προσφέρουν την δυνατότητα ενδοσυστηματικών μεταπομπών σε συστήματα του τύπου DVB-T.

Καταλήγοντας, θα πρέπει να αναφερθούμε στο θέμα των νέων υπηρεσιών που θα προκύψουν από την ενοποίηση των ασυρμάτων δικτύων, των εφαρμογών τους αλλά και των συστημάτων διαχείρισης του περιεχομένου τους. Πράγματι, σε περιβάλλοντα, όπου το δίκτυο πρόσβασης μεταβάλλεται συχνά, η ανάγκη για την εισαγωγή νέων δυναμικά προσαρμοζόμενων υπηρεσιών είναι πολύ σημαντική. Επιπλέον, οι εφαρμογές θα πρέπει να είναι σε θέση να αντιλαμβάνονται την διαφοροποίηση του ασύρματου μέσου πρόσβασης, χωρίς φυσικά να ασχολούνται με συγκεκριμένες τεχνικές λεπτομέρειες, με τελικό σκοπό την προσαρμογή της συμπεριφοράς τους.

Είναι προφανές ότι η σειρά των ερευνητικών θεμάτων που απορρέουν από την εισαγωγή των συστημάτων 4^{ης} Γενιάς παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία. Το ενδιαφέρον και η ενασχόληση της επιστημονικής κοινότητας αναμένεται να μεγαλώσει στο άμεσο μέλλον. Η παρούσα διδακτορική διατριβή, αποτελεί μια ολοκληρωμένη προσπάθεια, με σημαντικά στοιχεία πρωτοτυπίας, τα οποία την καθιστούν μια πολύτιμη αναφορά, για τον μελλοντικό ερευνητή.

Βιβλιογραφία

- [301192] Broadcast Technical Body - ETSI EN 301 192 V1.3.1 (2003-01).
- [3GPP02] 3GPP, “Feasibility Study on 3GPP System to WLAN Interworking”, Technical Report 3GPP TR 22.934 v1.2.0, May 2002, <http://www.3gpp.org>.
- [AD97] Alexander S., Droms R., “DHCP Options and BOOTP Vendor Extensions”, RFC 2132, March 1997.
- [AH+03] Ahmavaara K., Haverinen H., Pichna R., “Interworking architecture between 3GPP and WLAN systems”, IEEE Communications Magazine, Volume 41, Issue 11, Nov. 2003, pp. 74 – 81.
- [BB+02] Berezdivin R., Breinig R., Topp R. “Next-generation wireless communications concepts and technologies”, IEEE Communications Magazine, Volume 40, Issue 3, Mar 2002, pp. 108 – 116.
- [BC+03] Buddhikot M. M., Chandranmenon G., Han S., Lee Y., Miller S., Salgarelli L., “Design and implementation of a WLAN/CDMA2000 interworking architecture”, IEEE Communications Magazine, Volume 41, Number 11, Nov 2003, pp. 90 – 100.
- [BE+04] Benali O., El-Khazen K., Garrec D., Guiraudou M., Martinez G., “A Framework for an Evolutionary Path toward 4G by Means of Cooperation of Networks”, IEEE Communications Magazine, Volume 42, Issue 5, May 2004.
- [BEU95] Beutler R., “Optimization of Digital Single Frequency Networks,” Frequenz, vol. 49, no. 11–12, Nov–Dec 1995.
- [BIA00] Bianchi G., “Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Volume 18, Number 3, March 2000, pp. 535 – 547.
- [BP+97] Balakrishnan H., Padmanabhan V., Seshan S., Katz R., “ A comparison of mechanisms for improving TCP performance over wireless links”, IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), Volume 5, Issue 6, December 1997.
- [CFS+90] Case J., McCloghrie K., Rose M., and Waldbusser S., “Structure of Management Information for Version 2 of Simple Network Management Protocol (SNMPv2)”, RFC 1902, January 1996.
- [CG+00] Campel A. T., Gomez J., Kim S., “Design Implementation and Evaluation of Cellular IP”, IEEE Personal Communications, Volume 7, Issue 4, August 2000, pp. 42-49.
- [CGP03] Catallina Gallego M., Roux P., “Candidate Network Selection in Composite Radio Environments”, Proceedings of the 1st International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks (HET-NETs'03), D. Kouvatsos (ed.), Ilkley, 2003, pp. 17/1-17/10.
- [CK99] Crescenzi P., Kann V., “A compendium of NP optimization problems”, 1999,

<http://www.nada.kth.se/theory/problemist.html>

- [**COST231**] “Propagation Prediction Models”, COST 231 Final Report, chapter 4.
- [**CP02**] Chakravorty R., Pratt I., “Performance issues with General Packet Radio Service”, JCN, Volume 4, Issue 2, December 2002, pp. 266-281.
- [**CRE3+03**] Public Deliverable 3, “Terminal Architecture in Composite Radio Environments”, IST CREDO Project (2001-33093), February 2003, (<http://credo.nal.motlabs.com>).
- [**CRE7+03**] Public Deliverable 7, “Prototype Terminal for Composite Radio Environments”, IST CREDO Project (2001-33093), May 2003, (<http://credo.nal.motlabs.com>).
- [**CRE8+03**] Public Deliverable 8, “Prototype NSMS for optimising composite radio environments”, IST CREDO Project (2001-33093), May 2003, (<http://credo.nal.motlabs.com>).
- [**CRE9+03**] Public Deliverable 9, “Prototype applications and profiles”, IST CREDO Project (2001-33093), May 2003, (<http://credo.nal.motlabs.com>).
- [**CS03**] Catalina M., Stathopoulos P., “Terminal Management System for Optimized Service Delivery in Composite Radio Environments”, in proc. IST Mobile & Wireless Telecommunications Summit, 2003, Portugal.
- [**CWK+97**] Crow, B.P.; Widjaja, I.; Kim, L.G.; Sakai, P.T.;, “IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks”, IEEE Communications Magazine, Volume 35, Issue 9, Sept. 1997, pp. 116 – 126.
- [**DAB**] DAB – Digital Audio Broadcasting, <http://www.worlddab.org/>
- [**DC02**] Demichelis C., Chimento C., “RFC 3077 – 3393 IP Packet Delay Variation Metric for IPPM”, RFC 3077-3393, 2002.
- [**DD+01**] Duros E., Dabbous W., Izumiyama H., Fujii N., Zhang Y., “A Link-Layer Tunneling Mechanism for Unidirectional Links”, RFC 3077, 2001.
- [**DE00**] Demichelis C., “Improvement of the Instantaneous Packet Delay Variation (IPDV) Concept and Applications”, World Telecommunications Congress 2000, May 2000.
- [**DEE91**] Deering S. E., “ICMP Router Discovery Messages”, RFC 1256, September 1991.
- [**DK+03**] Demestichas P., Koutsouris N., Koundourakis G., Tsagkaris K., Oikonomou A., Stavroulaki V., Papadopoulou L., Theologou M.E., Vivier G., El Khazen K., “Management of networks and services in a composite radio context”, IEEE Wireless Communications, Volume 10, Issue 4, 2003, pp. 44 – 51.
- [**DO+03**] Doufexi A., Tameh E., Nix A., Armour S., Molina A., “Hotspot wireless LANs to enhance the performance of 3G and beyond cellular networks”, IEEE Communications Magazine, Volume 41, Issue 7, July 2003, pp. 58 – 65.
- [**DP02**] Dixit S., Prasad R., “Wireless IP and Building the Mobile Internet”, Artech House, 2002.
- [**DR97**] Droms R., “Dynamic Host Configuration Protocol”, RFC 2131, March 1997
- [**DRIVE**] IST Project DRiVE (Dynamic Radio for IP-Services in Vehicular Environments), <http://www.ist-drive.org>, June 2004
- [**DS+04**] Demestichas P., Stavroulaki V., Papadopoulou L., Vasilakos A., Theologou M., “Service

configuration and distribution in composite radio environments”, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Journal, Volume 34, Issue 1, Feb. 2004.

[DT+03] Doufexi A., Tameh E., Nix A., Armour S., Molina A., “Hotspot wireless LANs to enhance the performance of 3G and beyond cellular networks”, IEEE Communications Magazine, Volume 41 , Issue 7 , July 2003, pp. 58 – 65.

[EN300-744] ETSI, Jan.2001, “Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television”, EN300-744.

[EN301-195] ETSI, 1999, “Interaction channel through the Global System for Mobile Communications (GSM)”, EN 301-195.

[EN301-199] ETSI, 1999, “Interaction channel for Local Multipoint Distribution System (LMDS) distribution systems”, EN301-199.

[EN301-958] ETSI, 2002, “DVB Specification of interaction channel for digital terrestrial TV including multiple access OFDM”, EN301-958.

[ETS300-801] ETSI, 1997, “Interaction channel through Public Switched Telecommunications Network (PSTN)/ Integrated Services Digital Networks (ISDN)”, ETS300-801.

[ETSI01] ETSI, “Requirements and Architectures for Interworking between HIPERLAN/3 and 3rd Generation Cellular Systems”, Technical Report, ETSI TR 101 957, August 2001.

[FA04] IETF Internet Draft, Fairhurst G., “Ultra Lightweight Encapsulation (ULE) for transmission of IP datagrams over MPEG-2/DVB networks”, by ipdvb WG, March 2004 .

[FG03] Fang X., Ghosal D. “Performance modeling and QoS evaluation of MAC/RLC layer in GSM/GPRS networks”, ICC 2003 - IEEE International Conference on Communications, vol. 26, no. 1, May 2003, pp. 271 – 275.

[FG04] Fairhurst G., “Ultra Lightweight Encapsulation (ULE) for transmission of IP datagrams over MPEG-2/DVB networks”, Internet Draft, <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ipdvb-ule-02.txt>.

[FM+01] Foh C., Meini B., Wydrowski B., Zukerman M., “Modelling and performance evaluation of GPRS”, in Proc. IEEE VTC 2001, Rhodes, Greece, 2108-2112, May 2001.

[FM+99] Furuskär A., Mazur S., Müller F., Olofsson H., “EDGE: Enhanced data rates for GSM and TDMA/136 evolution”, IEEE Personal Communications, Volume 6, Number 3, June 1999, pp. 56 – 66.

[GA+02] Gang W., Mizuno M., Havinga P.J.M., “MIRAI architecture for heterogeneous network”, IEEE Communications Magazine, Volume 40, Number 2, Feb. 2002, pp. 126 – 134.

[GA+03] Gardikis, G.; Kourtis A.; Constantinou P.;, “Dynamic Bandwidth Allocation in DVB-T Networks Providing IP Services”, IEEE Transactions on Broadcasting Systems, September 2003, pp. 314-318.

[GJ03] Gustafsson E., Jonsson A., “Always best connected”, IEEE Wireless Communications, Volume 10, Issue 1, Feb. 2003, pp. 49 – 55.

- [GL00] Ghribi B.; Logrippo L.; “Understanding GPRS: the GSM packet radio service”, *Computer Networks*, Volume 34, Issue 5, November 2000, pp. 763-779.
- [GRAF01] Graf A., “DAB Ensemble Planning – Problems and Techniques”, *Telecommunication Systems*, 18, 2001, pp. 137-154.
- [GS79] Garey M., Johnson D., “Computers and Intractability. A guide to the theory of NP-Completeness” Freeman, New York, 1979.
- [HAI00] Hain T., “Architectural Implications of NAT”, RFC 2993, November 2000.
- [HALE80] Hale W. K., “Frequency Assignment: Theory and Applications”, *Proceedings of IEEE* 68, 1980, pp. 1497-1514.
- [HAN94] Hanks S., et al. “Generic Routing Encapsulation over IPv4 Networks”, RFC 1701, October 1994.
- [HO+02] Honkasalo H., Pehkonen K., Niemi M.T., Leino A.T., “WCDMA and WLAN for 3G and beyond”, *IEEE Wireless Communications*, Volume 9, Issue 2, April 2002, pp. 14 – 18.
- [HS01] Holdrege M., Srisuresh P., “Protocol Complications with the IP Network Address Translator”, RFC 3027, January 2001.
- [HS03] Hadzi-Velkov Z., Spasenovski B., “Saturation throughput -- Delay analysis of IEEE 802.11 DCF in fading channel”, *ICC 2003 - IEEE International Conference on Communications*, Volume 26, Number 1, May 2003, pp. 121 – 126.
- [HT00] Holma H., Toskala A., “W-CDMA for UMTS”, J.Wiley&Sons, 2000.
- [HUT01] Helsinki University of Technology (HUT), 2001, Dynamics Mobile IP system (available at <http://dynamics.sourceforge.net/>).
- [HY03] Hui Y. S., Yeung H. K., “Challenges in the migration to 4G mobile systems”, *IEEE Communications Magazine*, Volume 41, Issue 12, Dec 2003, pp. 54 – 59.
- [IM+04] Inoue M., Mahmud K., Murakami H., Hasegawa M., Morikawa H., “Novel Out-of-Band Signalling for Seamless Interworking Between Heterogeneous Networks”, *IEEE Wireless Communications*, Volume 11, Issue 2, April 2004, pp. 54-63.
- [ITU99] ITU-T Recommendation Y.1540 (previously numbered I.380) “Internet Protocol Data Communication Service - IP Packet Transfer and Availability Performance Parameters”, Feb. 1999.
- [JL+89] Jacobson V., Leres C., McCanne S., “tcpdump tool”, 1989 (available via anonymous ftp to [ftp.ee.lbl.gov](ftp://ftp.ee.lbl.gov)).
- [KA+02] Kouvatsos D., Al-Begain K., Awan I., “A queueing model for a wireless GSM/GPRS cell with multiple service classes”, in *Networking 2002*, LNCS 2345, E. Gregori et al. (Eds.) Springer, 984-995, 2002.
- [KK+03] Koundourakis G., Koutsouris N., Stavroulaki V., Papadopoulou L., Tountopoulos V., Kouis D., Demestichas P., Mitrou N., “Network and Service Management System for Optimising Service Delivery and Traffic Distribution in Composite Radio Environments” *Proceedings of*

IST Mobile & Wireless Telecommunications Summit, 2003, Portugal.

[**KM+01**] Kalliokulju J., Meche P., Rinne J. M., Vallström J., Varshney P., Häggman S., “Radio access selection for multistandard terminals”, IEEE Communications Magazine, Volume 39, Number 10, October 2001, pp. 116 – 124.

[**KR+01**] Kalliokulju J., Meche P., Rinne M.J., Vallstrom J., Varshney P., Haggman S.-G., “Radio access selection for multistandard terminals”, IEEE Communications Magazine, Volume 39, Issue 10, Oct. 2001, pp.116 – 124.

[**KS+03**] Kontovasilis K., Skianis C., Kormentzas G., “Estimating Signalling Efficiency in a Composite Radio Environment”, Proceedings of the 1st International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks (HET-NETs’03), D. Kouvatsos (ed.), Ilkley, 2003, pp. 65/1-65/12.

[**KSM+02**] Khun-Jush J.; Schramm P.; Malmgren G.; Torsner J.;, “HiperLAN2: Broadband wireless communications at 5GHz”, IEEE Communications Magazine, no. 6, Jun 2002 pp. 130-136.

[**KT+01**] Keller R., Lohmar T., Tönjes R., Thielecke J., “Convergence of cellular and broadcast networks from a multi-radio perspective”, IEEE Personal Communications, Volume 8, Issue 2, April 2001, pp. 51 – 56.

[**KT+03**] Kouis D., Tountopoulos V., Stathopoulos P., Kontovasilis K., Mitrou N., “Measurement-Based QoS Management in Composite Radio Environment” , 7th WSEAS International Conference on Communications, Corfu Island, Greece, July 2003.

[**LS+03**] Loukatos D., Sarakis L., Kontovasilis K., Mitrou N., “Efficient Real-Time Traffic Analysis Tools For Monitoring Performance On Packet Networks”, Proceedings of the 1st International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks (HET-NETs’03), D. Kouvatsos (ed.), Ilkley, 2003, pp. 52/1-52/11.

[**LU+03**] Luo J. , Mukerjee R., Dillinger M., Mohyeldin E., Schulz E., “Investigation of radio resource scheduling in WLANs coupled with 3G cellular network”, IEEE Communications Magazine, Volume 41 , Issue 6 , June 2003, pp. 108 – 115.

[**LV03**] Levkowitz H., Vaarala S., “Mobile IP Traversal of Network Address Translation Devices”, RFC 3519, April 2003.

[**MA+03**] Marques V., Aguiar R., Garcia C., Moreno J., Beaujean C., Melin E., Liebsch M., “An IP-based QoS architecture for 4G operator scenarios”, IEEE Wireless Communications, Volume 10, Number 3, Jun 2003, pp. 54 – 62.

[**MC+03**] Mangold S., Choi S., Hiertz R. G., Klein O., Walke B., “Analysis of IEEE 802.11E for QoS support in wireless LANs”, IEEE Wireless Communications, Volume 10, Number 6, Dec 2003, pp. 40 – 50.

[**MD+01**] Mehta M., Drew N., Vardoulas G., Greco N., Niedermeier C., “Reconfigurable terminals: an overview of architectural solutions”, IEEE Communications Magazine, Volume 39,

Number 8 , Aug. 2001, pp. 82 – 89.

[**MIB11**] IEEE 802.11, 1999 Edition (ISO/IEC 8802-11: 1999), Annex D – ANS.1 encoding of MAC and PHY MIB

[**MIL92**] Mills D., “Network Time Protocol (Version 3) Specification, Implementation and Analysis”, RFC 1305, 1992.

[**MM+97**] Mignone V., Morello A., Visintin M., “An Advanced Algorithm for Improving DVB-T Coverage in SFN,” in Proc. International Broadcasting Convention, Sep. 1997.

[**MN02**] Montavont N., Noël T., “Handover management for mobile nodes in IPv6 networks”, IEEE Communications Magazine, Volume 40, Issue 8, Aug 2002, pp. 38 – 43.

[**MPE04**] MPEG4IP Project (<http://mpeg4ip.sourceforge.net>).

[**MPEG+95**] Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information: Video, ISO/IEC International Standard 13818-2, 1995.

[**MPEG95**] Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information: Systems, ISO/IEC International Standard 13818-1, 1995.

[**MR91**] McCloghrie K., Rose M., “Management Information Base for Network Management of TCP/IP-based internets: MIB-IP”, RFC 1213, March 1991

[**MS+01**] Mähönen P., Saarinen T., Passas N., Orphanos G., Muñoz L., García L., Marshall A., Melpignano D., Inzerilli T., Lucas F., Vitiello M., “Platform-independent IP transmission over wireless networks: The WINE approach”, IEEE Personal Communications, Volume 8, Number 6, December 2001, pp. 32 – 40.

[**PA+98**] Paxson V., Almes G., Mahdavi J., Mathis M., “Framework for IP Performance Metrics”, RFC 2330, 1998

[**PA95**] Perkins M.; Arnstein D., “Statistical Multiplexing of Multiple MPEG-2 Video Programs in a Single Channel”, SMPTE J. 104, 1995, no. 9, pp. 596 –599 (1995).

[**PD00**] Patel G., Dennett S., “The 3GPP and 3GPP2 movements toward an all-IP mobile network”, IEEE Personal Communications, Volume 7, Number 4, August 2000, pp. 62 – 64.

[**PE02**] Perkins C., “Mobile IP – Update Version”, IEEE Communications Magazine, 50th Anniversary Issue, May 2002, pp. 66 – 82.

[**PE97**] Perkins C., “Mobile IP”, IEEE Communications Magazine, Volume 35, Issue 5, May 1997.

[**PER02**] Perkins C., “IP Mobility for IPv4”, RFC 3344, August 2002.

[**PER96**] Perkins C., “Minimal Encapsulation Within IP”, RFC 2004, October 1996.

[**PR01**] Prasad R., Ruggieri M., “Technology Trends in Wireless Communications”, Artech House.

[**PRC96**] Perkins C., “IP Encapsulation within IP”, RFC 2003, October 1996.

[**RA+00**] Ramjee. R., et al., “IP-based Access Network Infrastructure for Next-Generation Wireless Data Networks”, IEEE Personal Communications, Volume 7, Issue 4, August 2000, pp.

34-41.

[REI98] Reimers U., “Digital video broadcasting”, IEEE Communications Magazine, Volume 36, Issue 6, June 1998, pp. 104 – 110.

[RK+01] Robles T., Kadelka A., Velayos H., Lappetelainen A., Kessler A., Li H., Mandato D., Ojala J., Wegmann B., “QoS support for an all-IP system beyond 3G”, IEEE Communications Magazine, Volume 39, Number 8, August 2001, pp. 64 – 72.

[SE01] Srisuresh P., Egevang K., “Traditional IP Network Address Translator (Traditional NAT)”, RFC 3022, January 2001.

[SEG02] Segura R., “IP Roaming over cellular digital video broadcast networks”, MILCOM 2002 - IEEE Military Communications Conference, October 2002 pp. 460-465.

[SF+02] Salkintzis A.K., Fors C., Pazhyannur R., “WLAN-GPRS integration for next-generation mobile data networks”, IEEE Wireless Communications, Volume 9, Issue 5, Oct. 2002, pp. 112 – 124.

[SF+02] Salkintzis, A.K., Fors C., Pazhyannur R., “WLAN-GPRS integration for next-generation mobile data networks”, IEEE Wireless Communications, Volume 9, Issue 5, 2002, pp.112 – 124.

[SG98] Solomon J., Glass S., “Mobile IPv4 Configuration Option for PPP IPCP”, RFC 2290, February 1998.

[SH99] Srisuresh P., Holdreg M., “IP Network Address Translator (NAT) Terminology and Considerations”, RFC 2663, August 1999.

[SIM94] Simpson W., “The Point-to-Point Protocol (PPP)”, RFC 1661, July 1994.

[SJ03] Sung-Eun K., John A. “Copeland TCP for seamless vertical handoff in hybrid mobile data networks”, GLOBECOM 2003 - IEEE Global Telecommunications Conference, Volume 22, Number 1, Dec 2003, pp. 661 – 665.

[SK+02] State R., El-Khazen K., Martinez G., Vivier G. “Service management for multi-operator heterogeneous networks”, GLOBECOM 2002 - IEEE Global Telecommunications Conference, Volume 21, Number 1, November 2002, pp. 2080 – 2084.

[SK+04] Skianis C., Kontovasilis K., Kormentzas K., Lisa G., “Simulation Study of a Signalling Protocol Efficiency in a Composite Radio Environment”, The 2004 High Performance Computing & Simulation (HPC&S) Conference σε συνδυασμό με το 18th EUROPEAN SIMULATION MULTICONFERENCE (ESM 2004) Magdeburg, Germany, 13

[ST+03] Stathopoulos P., Tountopoulos V., Kouis D., Demestichas P., Kontovasilis K., Mitrou N., “QoS Challenges in Beyond 3G Heterogenous Networks and a Service Based Approach”, In Proc. HET-NETs 2003, Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks, Ilkley UK, July 2003.

[STA96] Stallings W., “IPv6: The New Internet Protocol”, IEEE Communications Magazine, Volume 34, Issue 7, July 1996, pp. 96 – 108.

[VAR00] Varshney U., “Recent advances in wireless networking”, IEEE Computer, Vol. 33,

Issue 6, June 2000.

[VL02] Vishnevsky V., Lyakhov A., “802.11 LANs: saturation throughput in the presence of noise”, in Networking 2002, LNCS 2345, E. Gregori et al. (eds.) Springer, 1008-1019, 2002.

[WA+03] Wisely D., Aghvami H., Gwyn L. S., Zahariadis T., Manner J., Gazis V., Houssos N., Alonistioti N. “Transparent IP radio access for next-generation mobile networks”, IEEE Wireless Communications, Volume 10, Issue 4, 2003, pp. 26 – 35.

[WIL02] Wiljakka J., “Transition to IPv6 in GPRS and WCDMA mobile networks”, IEEE Communications Magazine, Volume 40, Number 4, Apr 2002, pp. 134 – 140.

[WQ+01] Wu H., Qiao C., De S., Tonguz O., “Integrated cellular and ad hoc relaying systems: iCAR, IEEE”, Journal on Selected Areas in Communications, Volume 19, Number 10, October 2001, pp. 2105 – 2115.

[WS00] Wang X., Schulzrinne H., “An Integrated Resource Negotiation, Pricing and QoS Adaptation Framework for Multimedia Applications”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Volume 18, Issue 12, pp. 2514-2529, Dec 2000.

[XI+02] Xilouris G.; Gardikis G. ; Pallis E. ; Kourtis A. ;, “Reverse Path Technologies in Interactive DVB-T Broadcasting”, in Proceedings of IST Mobile and Wireless Telecommunications Summit, Greece, June 2002, pp. 292-295.

[XR02] Xiao Y., Rosdahl J., “Throughput and delay limits of IEEE 802.11”, IEEE Communications Letters, Volume 6, Number 8, Aug 2002, pp. 355 – 357.

[ZS01] Zander J., Seong-Lyun K., “Radio Resource Management for Wireless Networks”, Artech House, 2001.

[ΘEO02] Θεολόγου Μ.Ε., “Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών”, Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα, Μάρτιος 2002.

[KX02] Κωνσταντινόπουλου Χ., “Διασφάλιση Ποιότητας Υπηρεσίας και Διαστασιολόγηση Συστημάτων Κινητών Επικοινωνιών GSM/GPRS (2.5G) ΚΑΙ Μετάβαση στα Συστήματα 3ης Γενιάς (3G)”, Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π. Αθήνα, 2002.

[ΛΟ02] Δ., Λουκάτος, 2002, “Παραγωγή και Ανάλυση Κίνησης με Έμφαση σε Δίκτυα Τεχνολογίας ATM και IP”, Διδακτορικό, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ελλάδα.

Συντομεύσεις

| | |
|----------------|---|
| 2.5G | <i>2.5 Generation</i> |
| 2G | <i>2nd Generation</i> |
| 3GPP | <i>Third Generation Partners Project</i> |
| 4G | <i>4th Generation</i> |
| AAA | <i>Authentication, Authorization and Accounting</i> |
| ABC | <i>Always Best Connected</i> |
| AC | <i>Authentication Center</i> |
| AP | <i>Access Point</i> |
| BER | <i>Bit Error Rate</i> |
| BG | <i>Border Gateway</i> |
| BSC | <i>Base Station Controllers</i> |
| BSS | <i>Base Station Subsystem</i> |
| BSS | <i>Basic Service Set</i> |
| BTS | <i>Base Transceiver Station</i> |
| CAC | <i>Call Admission Control</i> |
| CAD | <i>Common Administrative Domain</i> |
| CCoA | <i>Collocated Care-of-Address</i> |
| CDMA/CA | <i>Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance</i> |
| CG | <i>Charging Gateway</i> |
| CoA | <i>care-of-address</i> |
| COFMD | <i>Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex</i> |
| CREDO | <i>Composite Radio Environment for Enhanced service Delivery for the Olympics</i> |
| CS | <i>Coding Scheme</i> |
| CS | <i>Circuit Switched</i> |
| DAD | <i>Different Administrative Domain</i> |
| DCF | <i>Distributed Point Function</i> |
| DCS | <i>Digital Cellular System</i> |
| DHCP | <i>Dynamic Host Configuration Protocol</i> |
| DNS | <i>Domain Name Server</i> |
| DS | <i>Distribution Medium</i> |
| DSFNL | <i>Dynamic SFNs Layout configuration</i> |
| DVB | <i>Digital Video Broadcasting</i> |
| DVB-T | <i>Digital Video Broadcasting - Terrestrial</i> |
| EDGE | <i>Enhanced Data for GSM Evolution)</i> |
| EIR | <i>Equipment Identify Register</i> |

| | |
|---------------|---|
| ESS | <i>Extended Service Set</i> |
| ESSID | <i>Extended Service Set Identifier</i> |
| ETSI | <i>European Telecommunications Standards Institute</i> |
| FA | <i>Foreign Agent</i> |
| FA CoA | <i>Foreign Agent Care-of-Address</i> |
| FEC | <i>Forward Error Correction</i> |
| FIP | <i>Forward Interaction Path</i> |
| fps | <i>frames per second</i> |
| GGSN | <i>Gateway GPRS Support Node</i> |
| GISP | <i>Generic Internet Service Provision</i> |
| GPRS | <i>General Packet Radio Service</i> |
| GPS | <i>Global Positioning Satellite system</i> |
| GSM | <i>Global System for Mobile communications</i> |
| GTP | <i>GPRS Tunneling Protocol</i> |
| HA | <i>Home Agent</i> |
| HCF | <i>Hybrid Coordination Function</i> |
| HLR | <i>Home Location Register</i> |
| HSCSD | <i>High Speed Circuit-Switched Data</i> |
| IAPP | <i>Inter-Access Point Protocol</i> |
| IEEE | <i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i> |
| IFS | <i>Inter Frame Space</i> |
| IP | <i>Internet Protocol</i> |
| ISM | <i>Industrial, Scientific, Medical</i> |
| Kbps | <i>Kilo bits per second</i> |
| LANs | <i>Local Area Networks</i> |
| LLC | <i>Link Level Control</i> |
| LOS | <i>line-of-sight</i> |
| MAC | <i>Medium Access Control</i> |
| MANETs | <i>Mobile ad hoc NETWORKs</i> |
| Mbps | <i>Million bits per second</i> |
| MFN | <i>Multi-Frequency Networks</i> |
| MIBs | <i>Management Information Bases</i> |
| MIP | <i>Mobile IP</i> |
| MISP | <i>Multimedia Internet Service Provision</i> |
| MN | <i>Mobile Node</i> |
| MPE | <i>Multiprotocol Encapsulation</i> |
| MPEG | <i>Moving Pictures Expert Group</i> |

| | |
|----------------|---|
| MSC | <i>Mobile Switch Center</i> |
| NACP | <i>Network Access Co-ordination Protocol</i> |
| NAT | <i>Network Address Translator</i> |
| NCD | <i>Near Completely Decomposable structure</i> |
| NCM | <i>Network Configuration Manager</i> |
| NMS | <i>Network Management Systems</i> |
| NPs | <i>Network Providers</i> |
| NSMS | <i>Network and Service Management Systems</i> |
| OFMD | <i>Orthogonal Frequency Division Multiplex</i> |
| OMC | <i>Operations and Maintenance Center</i> |
| OWD | <i>One Way Delay</i> |
| OWD | <i>Round Trip Delay</i> |
| PCF | <i>Point Function Coordination</i> |
| PDA | <i>Personal Digital Assistant</i> |
| PDCH | <i>Packet Data Channel</i> |
| PDU | <i>Packet Data Units</i> |
| PID | <i>Packet Identifier</i> |
| PS | <i>Packet Switched</i> |
| PSTN | <i>Public Switched Telephone Network</i> |
| PUSI | <i>Payload Unit Start Indicator</i> |
| QAM | <i>Quadrature Amplitude Modulation</i> |
| QoS | <i>Quality of Service</i> |
| QPSK | <i>Quaternary Shift Keying</i> |
| RAB | <i>Radio Access Bearer</i> |
| RADIUS | <i>Remote Access Dial-In User Service</i> |
| RAPs | <i>Radio Access Ports</i> |
| RF | <i>Radio Frequency</i> |
| RIP | <i>Return Interaction Path</i> |
| RLL | <i>Radio Link Level</i> |
| RM | <i>Resource Management</i> |
| RRM | <i>Radio Resource Management</i> |
| RTD | <i>Round Trip Delay</i> |
| RTS-CTS | <i>Ready to Send – Clear to Send</i> |
| SDTV | <i>digital Standard Definition Television program</i> |
| SFN | <i>Single Frequency Networks</i> |
| SGSN | <i>Service GPRS Support Node</i> |
| SIM | <i>Subscriber Identity Module</i> |

| | |
|--------------|--|
| SIR | <i>Signal to Interference Ratio</i> |
| SIR | <i>Signal to Interference Ratio</i> |
| SM | <i>Session Management</i> |
| SN | <i>Sequence Number</i> |
| SNDCP | <i>Sub-Network Depended Convergence Protocol</i> |
| SNMP | <i>Simple Network Management Protocol</i> |
| SP | <i>Service Providers</i> |
| SS7 | <i>Signaling System 7</i> |
| TA | <i>Traffic Analyzer</i> |
| TCP | <i>Transport Control Protocol</i> |
| TDMA | <i>Time Division Multiple Access</i> |
| TG | <i>Traffic Generator</i> |
| TMA | <i>Traffic Monitor and Analyzer</i> |
| TMS | <i>Terminal Management Systems</i> |
| TPS | <i>Transmission Parameter Signalling</i> |
| TS | <i>transport stream</i> |
| TSMS | <i>Terminal and Service Management System</i> |
| UDP | <i>User Datagram Protocol</i> |
| UMTS | <i>Universal Mobile Telephone System</i> |
| VSS | <i>Video Streaming Service</i> |
| WCDMA | <i>Wideband Code Division Multiple Access</i> |
| WLANs | <i>Wireless Local Networks</i> |
| WNDP | <i>Wireless Network Design Problem</i> |
| AM | <i>Αλυσίδα Markov</i> |
| ΠΑΕΔ | <i>Περιβάλλον Ασύρματων Ετερογενών Δικτύων</i> |
| ΤΑΔ | <i>Τοπικά Ασύρματα Δίκτυα</i> |