



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ
ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ
ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΠΕΡΑΝ ΤΗΣ ΤΡΙΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ (B3G)**

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Ι. ΔΗΜΗΤΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

Πειραιάς, 2007

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ

.....

Δρ. Γεώργιος Ι. Δημητρακόπουλος

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Γεώργιος Ι. Δημητρακόπουλος, 2007.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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 Πανεπιστημίου Πειραιώς.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μετά το άλλοτε ταχύ και άλλοτε χρονοβόρο πέρασμα από τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα των τριών πρώτων γενεών, η αλματώδης εξέλιξη στις τηλεπικοινωνίες αντικατοπτρίζεται σήμερα σε τεράστιες επενδύσεις στην ανάπτυξη περαιτέρω καινοτόμων συστημάτων, που στόχο έχουν να αντεπεξέλθουν στις διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών. Κάτι τέτοιο δύνανται να επιτευχθεί διαμέσου της παροχής συνεχώς ανανεούμενων, επαναστατικών υπηρεσιών, που εγείρουν όμως ζητήματα υιοθέτησης ριζοσπαστικών εννοιών, όπως τα «συστήματα πέραν της τρίτης γενιάς (B3G)», η «δυναμική αναδιάρθρωση δικτύων» (*reconfigurability*) και τα «γνωσιακά δίκτυα» (*cognitive networks*). Σε αυτά τα πλαίσια κινείται η παρούσα διδακτορική διατριβή, που αναλύεται σε ζητήματα διαχείρισης των πόρων (και δη του χρησιμοποιούμενου φάσματος) και σχεδίασης σύνθετων υποδομών, σε συστήματα B3G.

Για το σκοπό αυτό, στο 1^ο κεφάλαιο της διατριβής παρουσιάζονται αρχικά οι παρελθούσες, σημερινές και μελλοντικές τάσεις στον κόσμο των ασυρμάτων επικοινωνιών. Εν συνεχεία, εισάγεται η έννοια «δυναμικά αναδιαρθρούμενων» (“reconfigurable”) δικτύων, που διαθέτουν μηχανισμούς αλλαγής διαφόρων λειτουργικών τους παραμέτρων, με στόχο τη βέλτιστη εξυπηρέτηση των χρηστών. Παράλληλα, μελετώνται οι επιπτώσεις από την εισαγωγή των εν λόγω δικτύων στον κόσμο των επικοινωνιών. Κατόπιν, μελετάται η μετάβαση προς τα γνωσιακά δίκτυα (“cognitive networks”), τα οποία διαθέτουν την ικανότητα απόκτησης γνώσης από παρελθούσες αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον και έτσι προσαρμόζουν τη μελλοντική τους συμπεριφορά με βάση αυτή τη γνώση. Τέλος, εισάγεται η έννοια του φάσματος, παρουσιάζονται διάφορες προσεγγίσεις πάνω στο θέμα της διαχείρισής του και επιχειρείται μια κατηγοριοποίησή των προσεγγίσεων αυτών με βάση διάφορα κριτήρια. Τέλος, εποπτικά παρατίθεται σε γενικές γραμμές η περαιτέρω διάρθρωση της διατριβής και η συμβολή της στην ανάλυση των ανωτέρω θεμάτων.

Κατόπιν, στο 2^ο κεφάλαιο αναλύονται τα βασικά ζητήματα που αναφέρονται κατά τη διαχείριση πόρων σε δίκτυα επικοινωνιών B3G και προτείνεται η γενική μορφή της αρχιτεκτονικής των οικογενειών αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται προς τούτο. Έτσι, η διατριβή επικεντρώνεται στην οικογένεια αλγορίθμων δυναμικής σχεδίασης και διαχείρισης ενός δικτύου (Dynamic Network Planning and Management – DNPM), παρουσιάζοντας τους αλγορίθμους που την απαρτίζουν, ήτοι:

- RAT and Spectrum Selection: Επιλογή τεχνολογίας και φάσματος προς λειτουργία. Οι σχετικοί αλγόριθμοι παρουσιάζονται στα κεφάλαια 3 και 4.
- CDMA Configuration: Βελτιστοποίηση λειτουργίας επιλεχθέντων CDMA συστημάτων. Ένας σχετικός αλγόριθμος διαχείρισης του διαθέσιμου CDMA φάσματος παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 5.
- OFDMA Configuration: Βελτιστοποίηση λειτουργίας επιλεχθέντων OFDMA συστημάτων. Μια τεχνική αποτίμησης της μεθόδου δεξαμενής φάσματος (spectrum pooling) σε επιλεχθέντα OFDMA συστήματα παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 6.

Παράλληλα, παρουσιάζονται οι αλληλεπιδράσεις των ανωτέρω οντοτήτων (αλγορίθμων) της οικογένειας DNPM. Τέλος, το κεφάλαιο κλείνει με μια ματιά στις μελλοντικές τάσεις των συστημάτων διαχείρισης δικτύων επικοινωνιών, δίνοντας έμφαση στη δυνατότητα απόκτησης γνώσης που θα βοηθήσει σε ταχύτερες και αποτελεσματικότερες αποφάσεις και στους μηχανισμούς που απαιτούνται προς τούτο.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πρώτο κομμάτι των αλγορίθμων, ως αναφέρθηκε ανωτέρω, ήτοι το RAT and Spectrum Selection.

Ο γενικής μορφής “RAT and Spectrum Selection” αλγόριθμος δύναται να εφαρμοστεί σε συστήματα reconfigurable και cognitive δικτύων. Η εν λόγω τεχνική θεωρεί μια περιοχή ενός δικτύου, η οποία λόγω υπερφόρτωσης, χρήζει εκ νέου προσαρμογής στις εξωτερικές συνθήκες, προκειμένου να εξυπηρετήσει με βέλτιστο τρόπο τους χρήστες εντός της περιοχής. Στην περιοχή αυτή υπάρχουν δυναμικά αναδιαρθρούμενοι πομποδέκτες που λειτουργούν με τυχούσες τεχνολογίες επικοινωνιών. Ο αλγόριθμος, αφού λάβει υπόψη του τις δυνατότητες όλων των πιθανών αναδιαρθρώσεων (κατανομές τεχνολογιών, φάσματος και κίνησης στους πομποδέκτες), επιλέγει τη βέλτιστη εξ'αυτών, με τρόπο που να αναθέτει στους χρήστες τα βέλτιστα δυνατά επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας, ελαττώνοντας παράλληλα το απαιτούμενο κόστος (ως προς την παροχή των ζητηθέντων επιπέδων ποιότητας, αλλά και ως προς την απαιτούμενη σηματοδότηση). Το πρόβλημα μοντελοποιείται μαθηματικά και παρουσιάζεται η γενικευμένη μέθοδος επίλυσής του, η οποία βασίζεται στη βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης, που συνίσταται στη μεγιστοποίηση των παρεχομένων επιπέδων ποιότητας και στην ελαχιστοποίηση του κόστους.

Μια παραλλαγή/απλούστευση της γενικής μορφής του αλγορίθμου σε περιπτώσεις σημερινών (εμπορικών) δικτύων, καλείται να αντιμετωπίσει το πρόβλημα RDQ-A (“RAT, Demand and QoS Assignment”) που αναφαινεται συχνά σε αυτά. Η εν λόγω τεχνική θεωρεί

ως διάρθρωση ενός δικτύου μόνο την επιλογή RAT προς λειτουργία, με στόχο τη χρήση του σε σημερινές εμπορικά εκμεταλλεύσιμες τεχνολογίες, όπως οι UMTS/HSDPA και WLAN/WiMAX. Ο προσαρμοσμένος αλγόριθμος θεωρεί και πάλι ένα τμήμα δικτύου που χρήζει προσαρμογής σε νέες συνθήκες, όμως τώρα οι χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες στους διαθέσιμους πομποδέκτες είναι οι UMTS/HSDPA και WLAN/WiMAX. Ο αλγόριθμος αφού εξετάσει και πάλι όλες τις δυνατές κατανομές τεχνολογιών στους πομποδέκτες, επιλέγει την καταλληλότερη εξ'αυτών, αποφασίζοντας παράλληλα και για την κατανομή της ζήτησης σε αυτούς και σε επίπεδα QoS. Το κριτήριο για την απόφαση είναι και πάλι η παροχή όσο το δυνατόν αυξημένων επιπέδων ποιότητας υπηρεσίας στους χρήστες, με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Και πάλι το πρόβλημα μοντελοποιείται μαθηματικά και παρουσιάζεται η αναλυτική μέθοδος επίλυσής του, η οποία συνίσταται και πάλι στη βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης.

Τέλος, παρουσιάζονται και πιθανές επεκτάσεις των 2 τεχνικών, κυρίως όσον αφορά τη δυνατότητα ενσωμάτωσης του στοιχείου της γνώσης, που θα τους προσδώσει το χαρακτηρισμό "cognitive".

Στο 4^ο κεφάλαιο, η διατριβή ασχολείται με την παρουσίαση αναλυτικών αποτελεσμάτων των ανωτέρω αλγορίθμων, προκειμένου να πιστοποιηθεί η ορθότητα των ισχυρισμών και να καταδειχθεί η εφαρμοστικότητα των αλγορίθμων σε ρεαλιστικές καταστάσεις.

Προς τούτο, αρχικά εξετάζονται διάφορα σενάρια εφαρμογής της γενικευμένης μεθόδου RAT and Spectrum Selection και παρουσιάζονται αποτελέσματα από προσομοιώσεις. Κατόπιν, εξετάζονται κάποια σενάρια εφαρμογής της προς αντιμετώπιση του RDQ-A προβλήματος σε υπερφορτωμένα δίκτυα UMTS/HSDPA και WLAN/WiMAX. Έτσι, πραγματοποιούνται εκ νέου προσομοιώσεις και παραθέτονται τα αποτελέσματα εξ'αυτών, που αναδεικνύουν την καταλληλότητα της μεθόδου για reconfigurable δίκτυα.

Στο 5^ο κεφάλαιο απαντάται το ερώτημα που τίθεται σχετικά με τη βέλτιστη διαχείριση του φάσματος των ήδη επιλεχθέντων συστημάτων προς λειτουργία σε ένα τμήμα B3G δικτύου. Έτσι, αναπτύσσεται μια μέθοδος για τη διαχείριση του φάσματος σε συστήματα CDMA που έχουν επιλεχθεί προς λειτουργία με τους ανωτέρω αλγορίθμους. Η μέθοδος ονομάζεται "Demand Allocation into Multiple Carriers" (DAMC). Στόχος της είναι, θεωρώντας ένα σύνολο από πομποδέκτες που χρησιμοποιούν τεχνολογίες CDMA, να κατανείμει τα διαθέσιμα CDMA φέροντα στους εν λόγω πομποδέκτες. Για την κατανομή αυτή υποθέτονται διάφορες πολιτικές κατανομής και τελικά επιλέγεται εκείνη η πολιτική που ικανοποιεί το κριτήριο της ελάχιστης εκπεμπόμενης και λαμβανόμενης ισχύος σε ολόκληρο το τμήμα δικτύου.

Η μέθοδος DAMC μοντελοποιείται μαθηματικά και εξετάζονται διάφορα πιθανά σενάρια εφαρμογής της, ενώ εν συνεχεία παρουσιάζονται ορισμένα ενδεικτικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της σε ένα προσομοιωμένο δίκτυο.

Στο 6^ο κεφάλαιο μελετάται το θέμα της εμπορικής εκμετάλλευσης του φάσματος, με έμφαση στο διαθέσιμο φάσμα για τεχνολογίες OFDMA. Αναλύονται διάφορες παράμετροι του θέματος αναφορικά με τη δυνατότητα αξιοποίησης του OFDMA φάσματος και εκτιμάται απο επιχειρηματικής / εμπορικής σκοπιάς το αποτέλεσμα της εκμετάλλευσής του από έναν πάροχο, όσο και της από κοινού εκμετάλλευσής του από μια μερίδα παρόχων, μέσω της δημιουργίας μιας δεξαμενής φάσματος (Spectrum Pooling). Η μέθοδος αποτίμησης της επίδοσης της τεχνικής δεξαμενής φάσματος μοντελοποιείται μαθηματικά. Στη συνέχεια θεωρούνται διάφορα σενάρια εφαρμογής της και παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της, τα οποία καταδεικνύουν την αποτελεσματικότητά της.

Τέλος, στο 7^ο κεφάλαιο περιγράφονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διατριβή και προτείνονται κάποιες πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις για τη συνέχιση της εργασίας σε θέματα που προέκυψαν εξ' αυτής.

Σε γενικές γραμμές, κεντρικό αντικείμενο της διατριβής αποτελεί ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη ταχέων και αποτελεσματικών αλγορίθμων για την επίλυση προβλημάτων (μαθηματικά μοντελοποιημένων) που σχετίζονται με τη διαχείριση πόρων και φάσματος, και τη σχεδίαση υποδομών B3G. Παράλληλα, πραγματοποιούνται προσομοιώσεις, τα αποτελέσματα των οποίων χρησιμοποιούνται για την πιστοποίηση της ορθότητας των ισχυρισμών σχετικά με την καταλληλότητα των παρουσιαζομένων μεθόδων επίλυσης των προβλημάτων.

Λέξεις κλειδιά: Συστήματα B3G, Δυναμική αναδιάρθρωση δικτύων, γνωσιακά δίκτυα, διαχείριση πόρων, διαχείριση φάσματος, βελτιστοποίηση

ABSTRACT

Telecommunication systems, after rapidly (and sometimes even slowly) moving beyond their first three generations, are ceaselessly evolving. This situation is nowadays reflected on enormous investments on research for novel systems, capable of living up to the – ever increasing – user requirements. Such expectations' effectiveness lies on the adoption and exploitation of innovative concepts, such as the "systems beyond 3G", the "reconfiguration", as well as the "cognitive networks" concepts. This constitutes also the main frame of this PhD thesis, which is mainly focused on facing aspects that deal with the management of resources (spectrum included) in reconfigurable / cognitive networks.

For this purpose, the thesis begins (in the 1st chapter) with an overview on former, current and future trends in the wireless world. It then introduces the concepts of "reconfigurable networks", i.e. networks that are capable of altering their infrastructures and/or operation parameters, so as to optimally respond to user requirements. At the same time, the implications of the introduction of reconfigurability in the wireless world are also a subject of study. In the sequel, the chapter considers the transition from reconfigurable towards cognitive networks, i.e. networks that dispose the ability to retain knowledge from their interactions with the environment and adapt their behavior according to this knowledge. Finally, the chapter presents some approaches for managing spectrum and classifies them according to certain criteria. The 1st chapter of the thesis provides also an outlook concerning the structure of the rest of the thesis.

The 2nd chapter deals with basic issues that arise when managing resources in B3G systems, and proposes a general view of the architecture of the related solution (management) algorithms. Then, it focuses on the family of algorithms called "Dynamic Network Planning and Management", which comprises the following algorithms:

- RAT and Spectrum Selection: Selection of operating Radio Access Technology (RAT). The related algorithms are contained in chapters 3 and 4.
- CDMA Configuration: Performance optimization of the selected CDMA RATs. A related algorithm that manages the available CDMA spectrum is presented in chapter 5.
- OFDMA Configuration: Performance optimization of the selected OFDMA RATs. A technique that evaluates the performance of spectrum pooling in OFDMA systems is presented in chapter 6.

At the same time, the 2nd chapter presents the interactions among DNPM algorithms. Finally, it provides an overview on future trends on communication networks management systems, emphasizing on the capability of encompassing knowledge mechanisms, in order to enable fast and more efficient decisions.

The 3rd chapter presents the first part of the aforementioned algorithms, i.e. the RAT and Spectrum Selection algorithm. The general form of this algorithm is applicable in reconfigurable and cognitive networks. It considers a specific service area which requires some kind of adaptation to external requirements (probably due to increased traffic), in order to optimally serve the users therein. The area is covered by reconfigurable transceivers, which operate with arbitrary RATs. The algorithm, after taking into consideration the capabilities of the candidate reconfigurations (allocations of RATs, spectrum and demand to transceivers), selects the optimum one, so that to provide users with the best possible quality levels, minimizing the required cost from reconfigurations. The related problem is mathematically formulated and solved through the optimization of an objective function that consists in the maximization of the quality and the minimization of the associated cost.

A variation of this generic algorithm, appropriate for cases of current (commercial) networks, tackles with the problem called RDQ-A ("RAT, Demand and QoS Assignment") that usually comes up therein. The technique considers as "configuration" only the selection of the operating RAT and has to choose between UMTS/HSDPA and WLAN/WiMAX. The adjusted algorithm considers again a network segment (service area) that requires adaptation to new conditions. It tests all possible allocations of RATs to the available transceivers and selects the most appropriate one, deciding at the same time for the quality levels to be provided to users. The criterion for the decision is the provision of the highest possible quality, at the minimum possible cost. The problem is again mathematically formulated and solved through a greed algorithm, consisting again in the optimization of an objective function.

The chapter ends with potential extensions of the techniques, mostly related to the potentiality of encompassing knowledge features.

The 4th chapter of the thesis presents detailed results that derive from the application of the above algorithms in simulated networks, so as to prove their appropriateness in realistic situations. To this effect, several application scenarios are considered and simulation results

are presented, that certify the effectiveness of the algorithms, in current networks (UMTS/HSDPA and WLAN/WiMAX), as well as future ones.

The 5th chapter provides an answer to the issue of performance optimization of the previously selected operating RATs in a reconfigurable (cognitive) network segment. To this effect, it considers a CDMA RAT selected for operation and presents a method called “Demand Allocation into Multiple Carriers” (DAMC), which aims at allocating the available CDMA spectrum carriers to the available CDMA-operating transceivers, so that to satisfy certain criteria. The allocation is realized through applying several policies. DAMC selects the most appropriate policy, in terms of minimizing the overall transmitted/receive power in the network segment. The DAMC method is mathematically formulated, while several application scenarios are considered. In the sequel, the chapter presents indicative results from the application of DAMC in a simulated network.

The 6th chapter deals with how to optimize spectrum utilization (from a commercial point of view, in OFDMA technologies. Several parameters of this aspect are thoroughly analyzed, in terms of the possibilities of exploiting spectrum usage by a Network Operator, as well as by several Network Operators, applying spectrum pooling mechanisms. A method for evaluating the performance of spectrum pooling based on game theory is presented. For the evaluation, several application scenarios are considered, while indicative results prove the appropriateness of the method.

Finally, the 7th chapter recapitulates on the current and future trends in the world of communications, dealt with, in the thesis. Emphasis is placed on resource management and planning of infrastructures. The thesis ends with an outlook on the novel concepts contained in the thesis, as well as their potential future extensions – improvements.

In general, the thesis comprises aspects of mathematically modeling telecommunication-related problems and solving them through the design and development of the appropriate algorithms. Simulations are also performed for validating the methods’ effectiveness when used to efficiently, transparently and accurately solve those problems.

Keywords: Reconfiguration, Cognitive Networks, Radio Resource Management, Spectrum Management, Optimization

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ

Στους γονείς μου, Γιάννη και Αναστασία
και στη μνήμη της νονάς μου, Ευαγγελίας

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η γνώση είναι δύναμη και όποιος την κατέχει, σε οποιοδήποτε τομέα της ανθρώπινης πρωτοβουλίας και αν αυτή αναφέρεται, διαθέτει τα εχέγγυα για την πολυπόθητη (από την πλειοψηφία των ανθρώπων) ανοδική εξέλιξη της αξίας της ανθρώπινης υπόστασης. Βασιζόμενος σε αυτή και μόνο την πεποίθηση ξεκίνησα τον Οκτώβριο του 2002 την προσπάθεια για την κατάκτηση της γνώσης στο αντικείμενο στο οποίο αυτή η διατριβή αναφέρεται. Δεδομένου όμως ότι αυτή την πεποίθηση μου την μεταλαμπάδευσαν οι γονείς μου, σε αυτούς πρέπει αρχικά να χαρίσω το μεγαλύτερο μερίδιο της ηθικής ικανοποίησης που το αποτέλεσμα της προσπάθειας αυτής αφήνει. Επιπλέον, εκείνοι με στήριξαν με κάθε τρόπο σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου σε όλες τις εκπαιδευτικές βαθμίδες και για αυτό επίσης τους είμαι ευγνώμων.

Η παρούσα διατριβή έλαβε χώρα στο εργαστήριο Δικτύων Τηλεπικοινωνιών και Δικτυακών Υπηρεσιών του τμήματος Ψηφιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Πειραιώς. Με την έναρξη των εργασιών πάνω στη διατριβή, αμέριστη εμπιστοσύνη προς το πρόσωπό μου επέδειξε ο επιβλέπων καθηγητής μου, επίκουρος καθηγητής του Πανεπιστημίου Πειραιώς, κ. Παναγιώτης Δεμέστιχας. Θα ήθελα να εκφράσω με θαυμασμό τις ευχαριστίες μου προς τον κ. Δεμέστιχα, τόσο για την τεράστια συμβολή του στην ολοκλήρωση της διατριβής μου με τη συνεχή του καθοδήγηση και τις οξυδερκείς του παρατηρήσεις πάνω σε τεχνικά θέματα, όσο και για την ηθική υποστήριξη που μου παρείχε καθ'όλη τη διάρκεια των κοινών μας προσπαθειών. Αυτός αποτέλεσε το λόγο για να εντείνω τις προσπάθειές μου σε περιόδους δυσκολιών, αλλά και να βελτιώσω / ολοκληρώσω τις σκέψεις μου πάνω σε διάφορα θέματα που αναφαίνονταν κατά καιρούς. Ελπίζω με την παρούσα εργασία, αλλά και με ολόκληρη τη μεταξύ μας συνεργασία, να έχω φανεί και να φανώ ακόμα περισσότερο αντάξιος των προσδοκιών του, αλλά και της συναισθηματικής υποχρέωσης που νιώθω να αντεπεξέλθω σε αυτές.

Υπόχρεος επίσης νιώθω προς τον επίκουρο καθηγητή Κανάτα Αθανάσιο, διότι εκείνος ήταν που με προέτρεψε να τον ακολουθήσω στην πρόκληση της αντιμετώπισης μιας καινούριας κατάστασης με όλες τις δυσκολίες που αυτή συνεπάγεται, στο Πανεπιστήμιο Πειραιώς και εκείνος ήταν επίσης που μου ενίσχυσε την επιθυμία να ξεκινήσω την προσπάθεια για την απόκτηση ενός διδακτορικού διπλώματος, κατά τις προκαταρκτικές μας συζητήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ).

Στο ΕΜΠ και στις εκεί σπουδές μου πρέπει να αποδώσω και σχεδόν το μεγαλύτερο ποσοστό των γνώσεων που μου προσέφερε πάνω στο αντικείμενο με το οποίο ασχολούμαι, καθώς το κλίμα μέσα σε αυτό με ενέπνευσε για να συνεχίσω τον αγώνα για την επιστημονική πρόοδό μου. Για αυτό το λόγο θα ήθελα εκ βαθέων να ευχαριστήσω και τους εκεί καθηγητές μου, οι οποίοι αποτελούν πηγή συνεχούς εκμείευσης γνώσεων για τους φοιτητές τους. Προεξάρχων αυτών (για εμένα) ο καθηγητής Φίλιππος Κωνσταντίνου, στο εργαστήριο του οποίου πραγματοποίησα τη διπλωματική μου εργασία και γενικότερα τα πρώτα μου βήματα για το πέρασμα από τη φοιτητική στην επαγγελματική σκέψη. Ο κ. Κωνσταντίνου, στάθηκε πηγή έμπνευσης για μένα και για αυτό κυρίως τον ευχαριστώ.

Επειδή όμως η φιλία αποτελεί ένα πολύ σημαντικό κομμάτι της κοινωνικής ζωής ενός ανθρώπου, θα ήθελα να ευχαριστήσω εκ βαθέων το συνάδελφο και φίλο (Δρα. σύντομα) Γιώργο Μπράβο. Μαζί ξεκινήσαμε την προσπάθεια της δημιουργίας κάτι καινούριου στο Πανεπιστήμιο Πειραιά και μαζί περάσαμε πολλές δυσκολίες, αλλά μετά από εποικοδομητικές συζητήσεις και ώριμες «κληρώσεις», καταφέραμε πάντα να βρίσκουμε τη βέλτιστη λύση.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω το φίλο και συνάδελφο Δρα. Κώστα Τσαγκάρη για τη βοήθειά του, χωρίς την οποία θα ήταν μάλλον αδύνατη η ολοκλήρωση της εργασίας αυτής, αλλά και τη Λέκτορα Βέρα-Αλεξάνδρα Σταυρουλάκη, η οποία επίσης με βοήθησε σημαντικά με τις γνώσεις, την εργατικότητα, αλλά και το ήθος της. Ακόμα, δε θα ήθελα σε καμία περίπτωση να παραλείψω να ευχαριστήσω τη συνάδελφο και φίλη μου Λουίζα-Μαγδαληνή Παπαδοπούλου, η οποία με τις γνώσεις της στη χρήση πολλών προγραμμάτων λογισμικού με βοήθησε να κερδίσω πολύ χρόνο σε σημαντικές στιγμές κατά τη διάρκεια της πορείας μου προς την ολοκλήρωση της διατριβής. Ομοίως και τον Κώστα Κυρίτση, με τον οποίο πορευτήκαμε από κοινού στις σπουδές μας και οι συζητήσεις μαζί του με έβγαζαν συχνά από επαγγελματικά, αλλά και συναισθηματικά αδιέξοδα.

Ακόμα, σημαντικό μερίδιο στο αποτέλεσμα της εργασίας αυτής κατέχουν τα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου Δικτύων Τηλεπικοινωνιών και Δικτυακών Υπηρεσιών με κυριότερους αρωγούς τους Απόστολο Κατιδιώτη, Άγγελο Σαασάκη, Γιούλη Κρητικού και Διονύση Πετρομανωλάκη (με τυχαία σειρά), οι οποίοι και με βοήθησαν πολύ σε τεχνικά θέματα. Τους ευχαριστώ και τους εύχομαι καλή σταδιοδρομία.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες και την αληθινή αγάπη προς τους συναδέλφους, αλλά κυρίως στενούς φίλους Δημήτρη Αλεξόπουλο, Αντώνη Ζήσιμο, Γιώργο Μπράβο (αυτή τη φορά ως μέλος της παρέας), Βασίλη Χατζηγιαννάκη και Αλέξανδρο Παπακωστόπουλο. Η παρέα μας, οι ώριμες συζητήσεις μας, οι επιστημονικές μας αναζητήσεις

και οι κοινές μας αγωνίες και προσπάθειες, αποτελούν μεν αξέχαστες αναμνήσεις, αλλά ταυτόχρονα καλλιεργούν την προσδοκία ενός ανάλογου μέλλοντος. Παιδιά, σας ευχαριστώ όλους για τα υπέροχα φοιτητικά χρόνια που περάσαμε και σας εύχομαι καλή σταδιοδρομία.

Με τιμή,

Γιώργος Ι. Δημητρακόπουλος

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΠΑΙΑ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΟΙ ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΠΕΡΑΝ ΤΗΣ 3^{ης} ΓΕΝΙΑΣ (B3G) – ΟΙ ΕΝΝΟΙΕΣ «ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΔΙΑΡΘΡΩΣΗ» (RECONFIGURABILITY) ΚΑΙ «ΓΝΩΣΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ» (COGNITIVE NETWORKS)	21
1.1 Εξέλιξη των συστημάτων επικοινωνιών.....	22
1.2 Η έρευνα σε περιβάλλοντα ασυρμάτων επικοινωνιών B3G	24
1.3 Η ικανότητα δυναμικής αναδιάρθρωσης (Reconfigurability).....	27
1.4 Επιπτώσεις από την εισαγωγή των δυναμικά αναδιαρθρούμενων (reconfigurable) δικτύων. ...	30
1.5 Από τα reconfigurable δίκτυα, στα γνωσιακά δίκτυα επικοινωνιών ασύρματης πρόσβασης (Cognitive, Wireless Access, Networks)	32
1.5.1 Γνωριμία – Βασικά Λειτουργικά Χαρακτηριστικά	32
1.5.2 Επιχειρησιακό Μοντέλο	35
1.6 Γενικές προκλήσεις σχετικά με τη χρήση του φάσματος.....	37
1.7 Διάφορες Προσεγγίσεις για τη Διαχείριση του Φάσματος.....	39
1.7.1 Κατηγοριοποίηση με βάση το επίπεδο καθορισμού του προς χρήση φάσματος	39
1.7.2 Κατηγοριοποίηση με βάση τη χρήση του φάσματος καθαυτή	41
1.8 Διάρθρωση της διατριβής.....	42
1.9 Βιβλιογραφία.....	46
2. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ RECONFIGURABLE ΚΑΙ COGNITIVE ΔΙΚΤΥΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ	49
2.1 Γενικά περί αρχιτεκτονικής συστημάτων διαχείρισης B3G συστημάτων.....	50
2.2 Αρχιτεκτονική Λειτουργίας Αλγορίθμων Διαχείρισης Πόρων (Functional Architecture).....	54
2.3 Επιχειρησιακά μοντέλα και ταξινόμηση στα πεδία του χρόνου	57
2.4 Η οικογένεια αλγορίθμων διαχείρισης DNPM.....	58
2.4.1 Γενική παρουσίαση	58
2.4.2 Λειτουργία και Αλληλεπίδραση Οντοτήτων DNPM	59
2.5 Μελλοντικές Κατευθύνσεις Αρχιτεκτονικής Διαχείρισης Δικτύων – Ο Χαρακτηρισμός “cognitive”.....	61
2.6 Βιβλιογραφία.....	65
3. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΑΝΑΔΙΑΡΘΡΩΣΕΩΝ (RAT AND SPECTRUM SELECTION)	67
3.1 Εισαγωγή.....	68
3.2 RAT and Spectrum Selection – Γενική Περιγραφή.....	70
3.3 RAT and Spectrum Selection – Αναλυτική Περιγραφή.....	71
3.3.1 Είσοδος του προβλήματος	71
3.3.2 Έξοδος του προβλήματος	73
3.4 Εκτίμηση των δυνατοτήτων που προσφέρει κάθε πιθανή διάρθρωση	75
3.5 Μέθοδος επίλυσης RAT and Spectrum Selection – Γενικά.....	77
3.5.1 Γενική προσέγγιση μεθόδου	77
3.5.2 Πρώτη φάση: υπολογισμός υποψηφίων διαρθρώσεων A_{TC}	79
3.5.3 Δεύτερη φάση: κατανομή A_{TU} με A_{UQ}^{basic}	80
3.5.4 Τρίτη φάση: τελική κατανομή A_{UQ} (με βελτιωμένα επίπεδα QoS)	82
3.5.5 Τέταρτη φάση: επιλογή της καταλληλότερης αναδιάρθρωσης	83
3.6 Μέθοδος επίλυσης RAT and Spectrum Selection – Αναλυτική Περιγραφή RAT, Demand and QoS Assignment (RDO-A)	84
3.6.1 Προκαταρκτική Ανάλυση	84
3.6.2 Πρώτη φάση: Κατανομή A_{TC}	85
3.6.3 Δεύτερη φάση: Κατανομή A_{TU} με A_{UQ}^{basic}	85

3.6.4	Τρίτη φάση: Κατανομή A_{UQ} (με βελτιωμένα επίπεδα QoS)	88
3.7	Δυνατότητες ενσωμάτωσης του στοιχείου της «γνώσης»	91
3.8	Συμπεράσματα - Προοπτικές	93
3.9	Βιβλιογραφία	95
4.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ "RAT AND SPECTRUM SELECTION" ΣΕ ΠΡΟΣΟΜΙΩΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΑ	97
4.1	Εισαγωγή	98
4.2	Γενική μέθοδος RAT and Spectrum Selection – Αποτελέσματα Εφαρμογής	98
4.2.1	Είσοδοι	99
4.2.2	Σενάριο 1	102
4.2.3	Σενάριο 2	104
4.2.4	Σενάριο 3	106
4.2.5	Σενάριο 4	108
4.3	RAT and Spectrum Selection – Αποτελέσματα επίλυσης προβλήματος RDQ-A	110
4.3.1	Εισαγωγή	110
4.3.2	UMTS-WLAN δίκτυο: Κανονικό Φορτίο	110
4.3.3	UMTS-WLAN δίκτυο: Κανονικό Φορτίο - Προσομοίωση στην πλατφόρμα NS-2	119
4.3.4	UMTS-WLAN δίκτυο: Υψηλό Φορτίο	124
4.3.5	HSDPA/WiMAX δίκτυο: Κανονικό Φορτίο	131
4.4	Συμπεράσματα	135
4.5	Βιβλιογραφία	136
5.	ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΑΝΑΔΙΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΣΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ CDMA	137
5.1	Εισαγωγή	138
5.2	Κίνητρο για μελέτη	139
5.3	DAMC – Αναλυτική Περιγραφή	143
5.3.1	Παράμετροι εισόδου: Σύστημα, Περιοχή Εξυπηρέτησης, Υπηρεσίες	143
5.3.2	Πολιτικές Κατανομής Ζήτησης	144
5.3.3	Κριτήρια Επιλογής της βέλτιστης πολιτικής κατανομής	145
5.4	Προσομοίωση και Ενδεικτικά Αποτελέσματα	146
5.4.1	Σενάριο1 – Γενικές Παράμετροι Εισόδου	147
5.4.2	Σενάριο 1 – Εφαρμογή πολιτικών A^s	149
5.4.3	Σενάριο 1 – Εφαρμογή πολιτικών A^l	154
5.4.4	Σενάριο 2 – Σύγκριση μεταξύ A^s και A^l	156
5.5	Ανάλυση Πολυπλοκότητας Μεθόδου	161
5.6	Επέκταση: Θεώρηση Κριτηρίου Εξισορρόπησης του Φορτίου (load balancing) Μεταξύ των Φερόντων	163
5.6.1	Γενικά Στοιχεία	163
5.6.2	Σύγκριση μεταξύ A^s και A^l	165
5.7	Συμπεράσματα - Κατευθύνσεις	166
5.8	Βιβλιογραφία	168
6.	ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ OFDMA	171
6.1	Εισαγωγική Μελέτη	172
6.2	Η Εκμετάλλευση του Φάσματος – Μειονεκτήματα και Προκλήσεις	173
6.3	Η τεχνική «δεξαμενής φάσματος» (Spectrum Pooling – SP)	176
6.3.1	Επισκόπηση τεχνικής	176
6.3.2	Περιγραφή Μοντέλου Οικονομικής Αξιολόγησης	176
6.4	Εφαρμογή Μοντέλου και Ενδεικτικά Αποτελέσματα	178
6.4.1	Σενάριο 1	178
6.4.2	Σενάριο 2	180
6.4.3	Σενάριο 3	181
6.5	Επιχειρηματικοί Ορίζοντες	183
6.6	Συμπερασματικά Στοιχεία	185
6.7	Βιβλιογραφία	187

7. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ	189
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ	193
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΛΙΣΤΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ (Μάιος 2007)	197

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ

1. **ΟΙ ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΠΕΡΑΝ ΤΗΣ 3^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ
(B3G) – ΟΙ ΕΝΝΟΙΕΣ «ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΔΙΑΡΘΡΩΣΗ»
(RECONFIGURABILITY) ΚΑΙ «ΓΝΩΣΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ»
(COGNITIVE NETWORKS)**

Περίληψη:

Το πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιεί μια αναφορά στις σύγχρονες τάσεις στον κόσμο των τηλεπικοινωνιών, επικεντρωνόμενο στο όραμα των συστημάτων πέραν της τρίτης γενιάς (Beyond the 3rd Generation - B3G). Κύριο μέσο διευκόλυνσης των B3G συστημάτων αποτελούν οι έννοιες της δυναμικής αναδιάρθρωσης δικτύων (*reconfigurability*) και των γνωσιακών δικτύων (*CN - cognitive networks*). Σε αυτές ακριβώς τις έννοιες δίνεται έμφαση. Τμήματα του κεφαλαίου έχουν δημοσιευτεί στα άρθρα [1][2].

1.1 Εξέλιξη των συστημάτων επικοινωνιών

Αδιαμφισβήτητος πρωταγωνιστής στην κινηματογραφική ταινία που ξετυλίγει το νήμα της ανθρώπινης ύπαρξης, ο όρος «επικοινωνία», που στην αρχική του έκφραση συνιστά τη μεταφορά πληροφορίας ανάμεσα σε δύο οντότητες, διαδραμάτισε καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη του ανθρωπίνου γένους. Αυτό παλαιότερα (ίσως και σήμερα) εκφραζόταν μέσω των εμπορικών δραστηριοτήτων που εξυπηρετούσε. Με την έλευση των τηλεπικοινωνιών, η διαδρομή μεταφοράς της πληροφορίας άλλαξε ριζικά και απομακρύνθηκε από την αρχική, φυσική διαδρομή μεταφοράς (δηλ. μεταξύ τόπων με εμπορική δραστηριότητα), για να καταλήξουμε στις μέρες της τηλεπικοινωνιακής επανάστασης που διανύουμε, όπου η επικοινωνία έχει μπει στην καθημερινή μας ζωή με τόσους πολλούς διαφορετικούς τρόπους, που είναι εύκολο να παραβλέψουμε την πολυσχιδία των διαφόρων μορφών της. Κάποιες από αυτές τις μορφές εμπλέκουν τον ανθρώπινο παράγοντα άμεσα (εφημερίδες), ενώ κάποιες άλλες όχι (δίκτυα υπολογιστών). Μάλιστα στο λυκαυγές του 21ου αιώνα και στα πλαίσια της γενικής παγκοσμιοποίησης σε πάμπολλους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, ριζικές αλλαγές παρατηρούνται κυρίως στις ασύρματες επικοινωνίες, δηλαδή εκείνες στις οποίες το μέσο μεταφοράς της πληροφορίας από τον πομπό στο δέκτη δεν περιλαμβάνει κάποιο σύρμα. Έτσι, οι ασύρματες επικοινωνίες βρίσκονται στην κορυφή της πυραμίδας του ερευνητικού ενδιαφέροντος και παρουσιάζουν μια αλματώδη εξέλιξη, χαρακτηριζόμενη από την τάση ενοποίησης διαφόρων, ξένων μεταξύ των, τεχνολογιών, με στόχο τη δημιουργία ενός παγκόσμιου τηλεπικοινωνιακού συστήματος, εύκολου στη χρήση, αποτελεσματικού, αλλά και με δυνατότητα συνεχούς βελτίωσης των παρεχομένων από αυτό υπηρεσιών. Ο στόχος αυτής της προσπάθειας είναι πλήρως ευθυγραμμισμένος με την τάση συνεχούς προόδου της τεχνολογίας, η οποία θα επισύρει οφέλη για τους χρήστες της και κέρδη για τους δημιουργούς της.

Τα πρώιμα ασύρματα επικοινωνιακά συστήματα που αναπτύχθηκαν γύρω στα 1980 απαντώνται στη βιβλιογραφία με τον όρο «συστήματα πρώτης γενιάς» (1G). Αυτά χρησιμοποιούσαν τη μέθοδο της αναλογικής διαμόρφωσης κατά συχνότητα (Frequency Modulation – FM) για να επιτύχουν την επικοινωνία φωνής, καθώς και Πολλαπλή Διαίρεση Πρόσβασης Συχνότητας (Frequency Division Multiple Access – FDMA) ως τεχνική πολλαπλής πρόσβασης στο τηλεπικοινωνιακό μέσο. Ως παραδείγματα τέτοιων συστημάτων μπορούμε να αναφέρουμε τα AMPS (Advanced Mobile Phone Service) στις ΗΠΑ, TACS (Total Access Communication System) στην Ευρώπη και NTT στην Ιαπωνία.

Ο κορεσμός που επήλθε στα συστήματα 1G λόγω του περιορισμένου αριθμού χρηστών που μπορούσαν να εξυπηρετήσουν, σε συνδυασμό με την ούτως ή άλλως αδιάκοπη ερευνητική προσπάθεια πάνω σε νέες τεχνολογίες, έφεραν στο προσκήνιο τα συστήματα δεύτερης γενιάς (2G) [3], τα οποία εμφανίστηκαν στην αγορά στις αρχές της δεκαετίας του '90 (1991) και αποτέλεσαν τα πρώτα ψηφιακά συστήματα ασυρμάτων επικοινωνιών, με αποδοτικότερη εκμετάλλευση του φάσματος και παροχή καλύτερης ποιότητας υπηρεσιών. Βασική διαφοροποίηση των συστημάτων αυτών είναι ότι χρησιμοποιούν τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης, με αποτέλεσμα να διαθέτουν τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών τόσο φωνής, όσο και δεδομένων, σε μικρές όμως ταχύτητες (9,6-14,4Kbps). Τέτοιες υπηρεσίες μάλιστα χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό από τους χρήστες και η αποτελεσματικότητά τους αποτελεί πλέον ζωτικό κριτήριο για την εμπορική επιτυχία των εν λόγω συστημάτων. Τα συστήματα 2G χρησιμοποιούνται ευρέως και σήμερα, με κύριους εκφραστές τους τα GSM, PDC, cdmaOne (IS-95) και US-TDMA (IS-136). Ωστόσο, τα συστήματα 2G έχουν αρκετές ελλείψεις, που γίνονται περισσότερο φανερές καθώς οι απαιτήσεις των χρηστών αυξάνονται δραματικά. Έτσι, ολοένα και υψηλότερες ταχύτητες πρόσβασης σε υπηρεσίες δεδομένων θεωρούνται απαραίτητες, ενώ παράλληλα οι συσκευές εξοπλίζονται με νέες δυνατότητες, όπως η δυνατότητα πρόσβασης στο διαδίκτυο (internet), η δυνατότητα αποστολής – λήψης φωτογραφιών και μια πληθώρα άλλων εφαρμογών, οι οποίες επιβάλλουν την περαιτέρω συνέχιση της ερευνητικής προσπάθειας στις ασύρματες επικοινωνίες.

Ο καρπός της εν λόγω προσπάθειας ακούει στο όνομα «ασύρματες επικοινωνίες τρίτης γενιάς – 3G» με κυριότερο εκπρόσωπό του για την Ευρώπη το UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) [4]. Το UMTS έχει σχεδιαστεί για επικοινωνίες πολυμέσων, δηλαδή για εμπλουτισμό των μέχρι τούδε τρόπων επικοινωνίας με αποστολή – λήψη φωτογραφιών και video, καθώς επίσης και με πρόσβαση στο διαδίκτυο με υψηλές ταχύτητες. Έτσι, τα συστήματα 3G προσφέρουν ρυθμούς μετάδοσης της τάξεως των 144Kbps για χρήστες υψηλής κινητικότητας σε ευρείες περιοχές, 384Kbps για χρήστες χαμηλής κινητικότητας σε ευρείες περιοχές, αλλά και 2Mbps για τοπική κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους. Αυτό το πετυχαίνουν χρησιμοποιώντας τόσο τη μεταγωγή κυκλώματος για υπηρεσίες ευαίσθητες στη χρονική καθυστέρηση (φωνή, video), όσο και τη μεταγωγή πακέτου για υπηρεσίες περισσότερο ανθεκτικές στη χρονική καθυστέρηση (κίνηση δεδομένων). Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζουν αποδοτικότερη χρήση των πόρων του συστήματος. Επιπλέον, για τα συστήματα 3G προτάθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση η τεχνική της «ευρείας ζώνης πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα» (Wideband Code

Division Multiple Access – WCDMA) [5], η οποία αποτελεί εξέλιξη της «πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα ευθείας ακολουθίας» (Direct Sequence Code Division Multiple Access – DS-SS-CDMA) [6]. Στον αντίποδα αυτών, στις ΗΠΑ προτάθηκε και χρησιμοποιείται το cdma2000 [7].

Πρέπει δε να σημειωθεί ότι η μετάβαση από τη δεύτερη στην τρίτη γενιά, εκτός από τις ερευνητικές δυσκολίες που ενέπλεξε, δεν πραγματοποιήθηκε σε ένα στάδιο. Ένα ενδιάμεσο στάδιο υπήρξε η λεγόμενη γενιά 2.5 (2.5G) [8], η οποία χρησιμοποίησε τη λύση της μεταγωγής πακέτου. Κύριος εκφραστής της γενιάς αυτής είναι μια εξέλιξη του συστήματος GSM, το GPRS (General Packet Radio Service) [9][10]. Αντίστοιχα, στην άλλη πλευρά του Ατλαντικού, το πέρασμα από το cdmaOne στο cdma2000 πραγματοποιήθηκε μέσω των cdma2000 1x και cdma2000 3x.

Επακόλουθο των διαφορετικών προτύπων που χρησιμοποιούνται σε διάφορες περιοχές της υψηλίου αποτελεί το γεγονός των περιορισμένων δυνατοτήτων περιαγωγής (roaming) που προσφέρονται από τα ανωτέρω δίκτυα στους χρήστες τους. Η γενικότερη παγκοσμιοποίηση, ωστόσο, επηρεάζει σαφέστατα και τον τομέα των τηλεπικοινωνιών και επιβάλλει την προσπάθεια σύγκλισης των διαφορετικών τεχνολογιών, με στόχο την αδιάκοπη παροχή υπηρεσιών υψηλής ποιότητας, ανεξαρτήτως τοποθεσίας και χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας. Αυτή η τάση εκφράζεται από την έρευνα πάνω σε δίκτυα πέραν της τρίτης γενιάς (Beyond the Third Generation – B3G), όπως περιγράφεται ακολούθως.

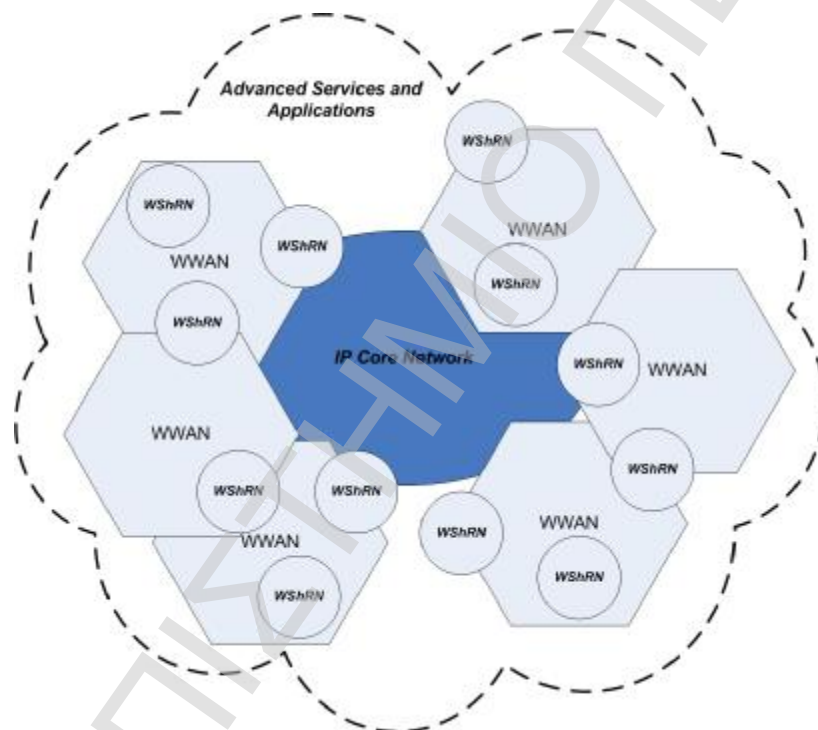
1.2 Η έρευνα σε περιβάλλοντα ασυρμάτων επικοινωνιών B3G

Καθώς η παγκοσμιοποίηση επιφέρει τη ανάγκη καθολικής αντιμετώπισης των θεμάτων που αναφέρονται στις επικοινωνίες, οι ολοένα αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών που δημιουργούνται από το σύστημα των επικοινωνιών καθαυτό επιτάσσουν την πραγματοποίηση τεράστιων επενδύσεων στον τομέα της έρευνας, που στόχο έχει την πραγμάτωση του οράματος της παροχής στο χρήστη συνεχούς και αψεγάδιαστης συνδεσιμότητας, οπουδήποτε και οποτεδήποτε, με τρόπο οικονομικά συμφέροντα.

Με την εισροή των 3G συστημάτων και χωρίς να έχουν παραγκωνιστεί τα ήδη υπάρχοντα συστήματα 2G και 2.5G, ο σημερινός κόσμος των τηλεπικοινωνιών χαρακτηρίζεται από τη συνύπαρξη τεχνολογιών (Radio Access Technologies – RATs), οι οποίες μπορούν κάλλιστα να ταξινομηθούν σε 2 μεγάλες οικογένειες, ήτοι:

- Την οικογένεια ασυρμάτων τεχνολογιών ευρείας περιοχής (Wireless Wide Area Networks - WWANs), που συμπεριλαμβάνει τις κινητές επικοινωνίες 2G/2.5G/3G [4], την οικογένεια πρωτοκόλλων IEEE 802.16 [11], το πρωτόκολλο WiMAX [12] και τις τεχνολογίες εκπομπής (broadcasting technologies) [13], και
- Την οικογένεια ασυρμάτων τεχνολογιών περιορισμένης κλίμακας (Wireless Short Range Networks - WShRN), που περιλαμβάνει ασύρματα τοπικά / προσωπικά δίκτυα (Wireless Local Area Networks – WLANs / Wireless Personal Area Networks - WPANs), όπως και τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks) [11][14][15].

Αυτή η κατάσταση απεικονίζεται στο Σχήμα 1-1.



Σχήμα 1-1: Το όραμα B3G

Μια τέτοια συνύπαρξη πληθώρας τεχνολογιών σε συνδυασμό με τις ολοένα αυξανόμενες προσδοκίες των χρηστών για παγκοσμίας εμβέλειας δυνατότητες στις τηλεπικοινωνίες, έχει φέρει στο προσκήνιο προσπάθειες διασυνεργασίας μεταξύ των ανωτέρω (μέχρι πρότινος ανταγωνιστικών) τεχνολογιών και κοινής λειτουργίας τους άνωθεν μια κοινής (καθολικής) υποδομής ασύρματης πρόσβασης (wireless access infrastructure), η οποία εκφράζει το λεγόμενο όραμα B3G. Η πραγμάτωση ενός τέτοιου οράματος θα έλυνε κυριολεκτικά τα χέρια των παρόχων δικτύου (Network Operators – NOs), λόγω των εναλλακτικών λύσεων

που υπόσχεται, σε περιπτώσεις που ένας NO αδυνατεί να εξυπηρετήσει τους χρήστες της περιφέρειάς του. Με αυτό το σκεπτικό η διασυνεργασία μεταξύ των διαφόρων RATs μοιάζει να αποτελεί προαπαιτούμενο, για τη θεμελίωση του οράματος B3G [16][17].

Η έννοια των συνεργαζόμενων δικτύων (cooperative networks), ιδανική στο άκουσμά της, έχει αναπτυχθεί με στόχο την αύξηση της αποδοτικότητας των παρεχομένων υπηρεσιών και την εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων διαφορετικής φύσης RATs, με παράλληλο εκμηδενισμό των μειονεκτημάτων τους. Κεντρική ιδέα αποτελεί το γεγονός της συνύπαρξης τεχνολογιών, όπως GSM, GPRS, UMTS, WLAN, WiMAX, DVB, WSN, ως συστατικών στοιχείων μιας ετερογενούς υποδομής ασύρματης πρόσβασης. Η συνύπαρξη αυτή δε, πραγματοποιείται με τρόπο συμπληρωματικό και όχι ανταγωνιστικό. Σε μια τέτοια υποδομή, ένας NO δύναται να κατέχει άδειες λειτουργίας για περισσότερα από ένα RATs. Ταυτόχρονα, έχει τη δυνατότητα να συνεργάζεται με άλλους NOs, ώστε να βασίζεται σε εναλλακτικές λύσεις, σε περίπτωση που ο ίδιος αδυνατεί να καλύψει την απαιτούμενη χωρητικότητα στο δίκτυό του ή τα απαιτούμενα επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας (QoS), με τρόπο οικονομικά αποδεκτό.

Οι εναλλακτικές αυτές λύσεις καθίστανται εκμεταλλεύσιμες μέσω κάποιου συστήματος διαχείρισης (management system) που προσαρτάται σε ένα RAT, με τη βοήθεια του οποίου οι χρήστες κατευθύνονται στο καταλληλότερο RAT σε διαφορετικά χωροχρονικά πλαίσια, βάσει των απαιτήσεών τους και κάποιων κριτηρίων αποδοτικότητας των δικτύων. Ένα σύστημα διαχείρισης με τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά εφαρμόζεται μεν σε κάθε τεχνολογία χωριστά, αλλά οι πλατφόρμες των διαφορετικών RATs δύνανται να συνεργάζονται. Αυτό αποτελεί μια καθ' όλα ρεαλιστική προσέγγιση, μέσω της οποίας ο κάθε NO διατηρεί απόρρητες τις πληροφορίες σχετικά με τη δομή του δικτύου του, παρά την όποια συνεργασία με τους μέχρι πρότινος ανταγωνιστές του. Πρέπει δε να σημειωθεί πως η έννοια των συνεργαζόμενων δικτύων υποδηλώνει την ύπαρξη μιας κεντρικής υποδομής που βασίζεται στο πρωτόκολλο IPv4 (Internet Protocol Version 4), δυνάμενη ωστόσο να εφαρμοστεί συνεργαζόμενη με το πρωτόκολλο IPv6, το οποίο θα μείωνε τις απαιτούμενες τεχνολογίες δικτύου και την επακόλουθη πολυπλοκότητα.

Σε γενικές γραμμές, η ιδέα της διάθεσης μιας πληθώρας συνεργαζόμενων RATs στο βωμό του κοινού στόχου για παροχή υψηλής ποιότητας υπηρεσιών, φαντάζει εξαιρετικά ελκυστική για τους NOs. Αυτό δικαιολογείται εφόσον, όποτε συναντούν δυσκολίες στο δίκτυό τους, μπορούν να βασίζονται σε εναλλακτικές λύσεις, μέσω της δυνατότητας εξυπηρέτησης των πελατών τους από συνεργαζόμενους παρόχους και μάλιστα με χρήση του ίδιου ή και άλλου RAT. Έτσι καθίσταται βέβαιη η μη υποβάθμιση της ποιότητας των παρεχομένων υπηρεσιών.

Μολαταύτα, όσο ελκυστική και να φαίνεται μια τέτοιου είδους συνεργασία, ο απώτερος στόχος της παροχής αφεγάδιαστης συνδεσιμότητας (ακόμα και εν κινήσει) είναι ακόμα μακρινός και ο δρόμος που οδηγεί προς αυτόν δύσβατος. Ο πρωταρχικός λόγος για αυτό συνίσταται σε πιθανές αντιδράσεις που δύναται να εγείρει ένα επιχειρησιακό μοντέλο που στηρίζεται στη συνεργασία μέχρι πρότινος ανταγωνιστών. Ένας δεύτερος, παράπλευρος λόγος έγκειται στο ότι η συνεργασία, ως περιγράφηκε, απαιτεί την εκ των προτέρων (a priori) εγκατάσταση του απαραίτητου λογισμικού για τη λειτουργία των RATs σε τερματικά και στοιχεία δικτύου, πράγμα το οποίο προϋποθέτει συνεχείς, πιθανόν ριψοκίνδυνες και σίγουρα δαπανηρές επενδύσεις, οποτεδήποτε εισάγονται στις παγκόσμιες επικοινωνίες, νέες τεχνολογίες.

Για να παρακαμφθεί η επιρροή τέτοιων μειονεκτημάτων στην τεχνολογική ανάπτυξη, υποχρεωτικά η επιστήμη στρέφεται στην κατεύθυνση δικτύων και τερματικών ευέλικτων, ικανών να προσαρμόζονται στις διαρκώς μεταβαλλόμενες συνθήκες του περιβάλλοντος. Μόνο με αυτόν τον τρόπο θα επιτευχθεί το πολυπόθητο όραμα της αδιάλειπτης συνδεσιμότητας. Αυτές οι ικανότητες αντικατοπτρίζονται στις λεγόμενα «δυναμικά αναδιαρθρούμενα δίκτυα» (reconfigurable networks) και ακόμα περισσότερο στα «γνωσιακά δίκτυα» (cognitive networks - CN). Αυτές οι κατηγορίες δικτύων αποτελούν και το αντικείμενο των ακολούθων 2 παραγράφων.

1.3 Η ικανότητα δυναμικής αναδιάρθρωσης (Reconfigurability)

Η ικανότητα δυναμικής αναδιάρθρωσης (Reconfigurability) αποτελεί εξέλιξη της έννοιας του Software Defined Radio (SDR) [25] και συνιστά μια έννοια που σκοπό έχει να διευκολύνει τη διασυνεργασία μεταξύ τεχνολογιών, ξένων μεταξύ τους και έτσι να προσφέρει εναλλακτικές επιλογές ασύρματης πρόσβασης σε συγκεκριμένες περιοχές εξυπηρέτησης (service areas). Αυτό το επιτυγχάνει προσφέροντας σε τερματικές συσκευές, αλλά και σε στοιχεία δικτύου, τη δυνατότητα να αναπροσαρμόζονται στις εκάστοτε συνθήκες, με την παροχή μηχανισμών που καθιστούν πραγματοποιήσιμη την αλλαγή παραμέτρων των πρωτοκόλλων μιας τεχνολογίας και της εν γένει διάρθρωσής της, όποτε οι εξωτερικές συνθήκες το επιβάλλουν. Η αναδιάρθρωση δύναται να πραγματοποιηθεί όχι μόνο με τα προεγκατεστημένα κομμάτια λογισμικού σε κάθε τερματικό, αλλά και με δυναμικό (online) κατέβασμα (download) του απαιτούμενου λογισμικού, όπως και ασφαλή εγκατάστασή του, με στόχο τη λειτουργία της νέας τεχνολογίας. Η ιδέα αυτή αποτελεί μια ειδοποιό διαφορά στα συστήματα B3G εν

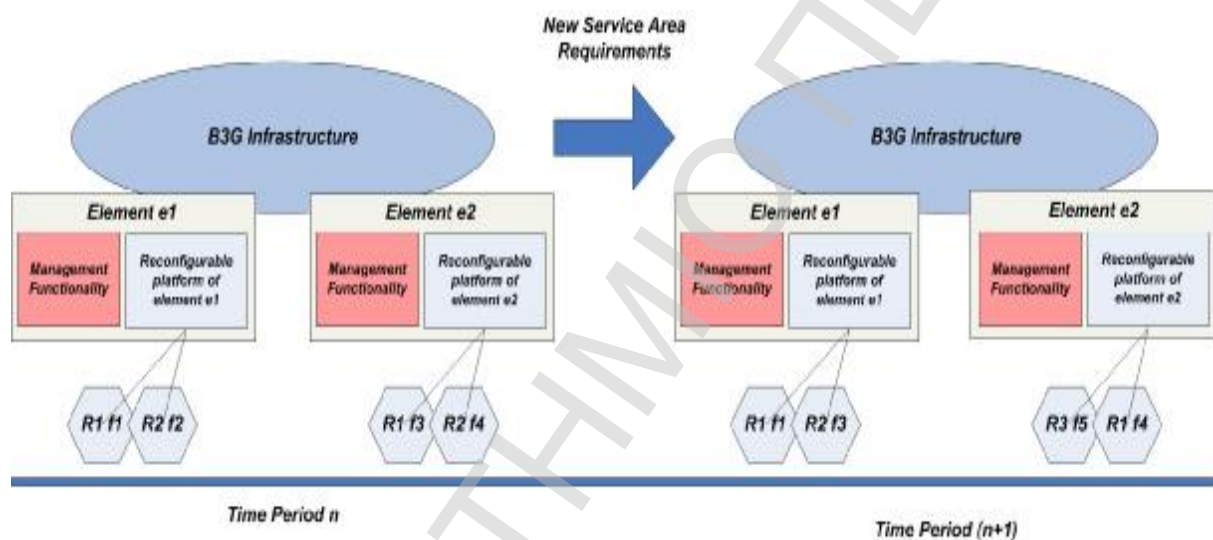
συγκρίσει με την παραδοσιακή στατικότητα που χαρακτήριζε μέχρι σήμερα τα τερματικά και τα στοιχεία ενός παραδοσιακού δικτύου ασυρμάτων επικοινωνιών. Με άλλα λόγια, δεν αποτελεί σενάριο επιστημονικής φαντασίας ένα τμήμα δικτύου το οποίο αναδιαρθρώνεται, χρησιμοποιώντας διαφορετική τεχνολογία, από τη μέχρι πρότινος χρησιμοποιούμενη, επιλέγοντας κάθε στιγμή την καταλληλότερη.

Το Σχήμα 1-2 συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά και κάποια στοιχεία διαχείρισης των εννοιών που κυριαρχούν στις ασύρματες επικοινωνίες σήμερα.

Είδος ασύρματης επικοινωνίας	Βασικά Χαρακτηριστικά Τερματικών και Στοιχείων Δικτύου
<i>Κλασικές ασύρματες επικοινωνίες</i>	Ένα RAT / τερματικό Ένα RAT / στοιχείο δικτύου Στατικός καθορισμός παραμέτρων δικτύου
<i>Συνεργαζόμενα Δίκτυα B3G</i>	Τα τερματικά επιλέγουν ανάμεσα σε πολλά RATs. Εναλλακτικά υπάρχει η δυνατότητα ταυτόχρονης χρήσης πολλών RATs. Ένα RAT ανά στοιχείο δικτύου (βασικό χαρακτηριστικό) Προεγκατάσταση (offline) του λογισμικού και του υλικού που απαιτείται για τη λειτουργία εναλλακτικών RATs
<i>Δυναμικά αναδιαρθρούμενα δίκτυα</i>	Τα τερματικά επιλέγουν ανάμεσα σε πολλά RATs. Εναλλακτικά υπάρχει η δυνατότητα ταυτόχρονης χρήσης πολλών RATs. Δυναμική (online) εγκατάσταση και καθορισμός παραμέτρων του λογισμικού που απαιτείται για τη χρήση του επιλεγμένου RAT, κατά τη λειτουργία του τερματικού και των στοιχείων δικτύου.

Σχήμα 1-2: Βασικές έννοιες ασυρμάτων επικοινωνιών

Η αναδιάρθρωση εν γένει συνιστά διαδικασία που επηρεάζει πολλά στρώματα του OSI (cross-layer process). Ωστόσο, επικεντρώνοντας το ενδιαφέρον μας στα κατώτερα των στρωμάτων, μόνο και μόνο για να δοθεί μια σαφής εικόνα της αναδιάρθρωσης, θα λέγαμε ότι μια πλατφόρμα που προσφέρει τη δυνατότητα δυναμικής αναδιάρθρωσης, παρέχει στους πομποδέκτες της τη δυνατότητα (επί παραδείγματι) να επιλέγουν την εκάστοτε καταλληλότερη τεχνολογία και συχνότητα προς λειτουργία. Αυτή η δυνατότητα θα αποτελέσει και βασικό κομμάτι της διατριβής και προς κατανόησή της παρατίθεται και το ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 1-3).



Σχήμα 1-3: Πλατφόρμα δυναμικά αναδιρθρούμενη

Παρατηρούμε ότι κάθε στοιχείο (element) μιας υποδομής B3G, δύναται να αναπροσαρμόζει (βάσει νέων συνθηκών και απαιτήσεων) τη συχνότητα λειτουργίας του, το RAT του, ή και τα δύο των ανωτέρω. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση έξυπνων μηχανισμών διαχείρισης, σαν αυτούς που θα παρουσιαστούν στα επόμενα κεφάλαια.

Παρακάτω παρατίθενται ορισμένες σημαντικές επιπτώσεις των δυναμικά αναδιρθρούμενων δικτύων στις τηλεπικοινωνίες, αναφορικά με την εμπορική τους εκμεταλλευσιμότητα. Επίσης, προχωρώντας ένα βήμα περαιτέρω, βλέπουμε πώς χρησιμοποιώντας δυναμικά αναδιρθρούμενα δίκτυα μπορεί να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο η συνδεσιμότητα και να ενισχυθεί η εξέλιξη των συστημάτων επικοινωνιών μέσω της έννοιας της επίγνωσης (cognition) των συνθηκών και της τάχιστης λήψης των βέλτιστων αποφάσεων.

1.4 Επιπτώσεις από την εισαγωγή των δυναμικά αναδιαρθρούμενων (reconfigurable) δικτύων.

Βάσει των ανωτέρω, αναμένεται ότι η ικανότητα δυναμικής αναδιάρθρωσης τερματικών και στοιχείων δικτύου θα επιφέρει μια πληθώρα θετικών αποτελεσμάτων σε όλους τους τομείς δραστηριοτήτων στον κόσμο των ασυρμάτων επικοινωνιών. Οι εμπλεκόμενες οντότητες στις εκάστοτε αναδιρθώσεις πιστεύεται ότι θα επηρεαστούν σημαντικά. Συνοπτικά αναφέρουμε τα κατωτέρω:

Η έννοια της δυναμικής αναδιάρθρωσης διευκολύνει τη χρήση νέου τύπου υπηρεσιών και τις δυνατότητες παγκόσμιας περιαγωγής, οι οποίες κάθε μάλιστα θα επεκταθούν αξιοσημείωτα, διαμέσου της προσαρμογής της λειτουργίας των τερματικών σε περιβάλλοντα επικοινωνιών τοπικού χαρακτήρα. Παρομοίως, η δυνατότητα «κατεβάσματος» και εγκατάστασης λογισμικού στα τερματικά θα επισύρει επαναστατικές τεχνολογικά υπηρεσίες, που θα αποκτήσουν μάλιστα και προσωπικό χαρακτήρα, δηλαδή θα διαμορφώνονται σύμφωνα με τις επιθυμίες και τις ανάγκες του κάθε χρήστη. Εδώ πρέπει να σημειωθεί πως βασικά χαρακτηριστικά αναδιάρθρωσης υπάρχουν και σήμερα σε συστήματα κινητών επικοινωνιών, όπως επί παραδείγματι στο GSM, όπου οι ρυθμίσεις του WAP (Wireless Application Protocol) και του GPRS πραγματοποιούνται αυτόματα από τους, κατά τόπους, παρόχους δικτύων / υπηρεσιών.

Οι πάροχοι θα αποκτήσουν εναλλακτικές επιλογές για να επιτύχουν τα ζητούμενα επίπεδα χωρητικότητας (capacity) των δικτύων τους και των ζητούμενων επιπέδων ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service – QoS). Επιπλέον, θα μπορούν να εισάγουν υπηρεσίες νέου τύπου, επί πληρωμή, ευκολότερα, με τρόπο που θα τους διαφοροποιεί από τους ανταγωνιστές τους. Ακόμα, μέσω των αναδιρθώσεων που θα πραγματοποιούνται στα τερματικά και στα στοιχεία δικτύου, οι πάροχοι αναμφίβολα θα έχουν στη διάθεσή τους περισσότερα στοιχεία που θα διευκολύνουν τις υπηρεσίες εξυπηρέτησης των πελατών τους. Τέλος, σημαντικό πλεονέκτημα που πηγάζει από το σχεδιασμό και την κατασκευή αναδιαρθρούμενων στοιχείων δικτύου (επί παραδείγματι σταθμούς βάσης 2G/3G) αποτελεί η ελάττωση του κόστους κατασκευής, συντήρησης και διαχείρισης ενός δικτύου, πράγμα που αυτομάτως επιφέρει τεράστια αύξηση των κερδών των παρόχων. Εδώ βέβαια θα πρέπει να επισημάνουμε πως σε αρχικό στάδιο οι χρήστες ίσως διαπιστώσουν κάποια αύξηση του κόστους παροχής των διαφόρων υπηρεσιών, που θα οφείλεται στο αρχικό κόστος

αντικατάστασης των σημερινών στοιχείων δικτύου με αναδιαρθούμενα, ή στις όποιες πρόσθετες μετατροπές απαιτείται να πραγματοποιηθούν πάνω στα υπάρχοντα στοιχεία δικτύου. Ωστόσο, αυτή αύξηση κόστους θα εξισορροπηθεί αργότερα από τις προαναφερθείσες ευεργετικές επιπτώσεις των δικτύων 4G και άρα θεωρείται σχεδόν αμελητέα.

Επιπλέον, η έννοια της δυναμικής αναδιάρθρωσης αυξάνει την ευελιξία των τερματικών, καθόσον προβλέπει τη δυναμική εγκατάσταση και απεγκατάσταση λογισμικού. Αυτό σημαίνει επιτάχυνση των διαδικασιών για την εισαγωγή ενός νέου προϊόντος στην αγορά και άρα μείωση του απαιτούμενου χρόνου εξέλιξής του.

Αντιστοίχως η δυναμική αναδιάρθρωση αποτελεί εκμεταλλεύσιμη δύναμη και στο επίπεδο εφαρμογών, με τη δυνατότητα «κατεβάσματος» εφαρμογών στα τερματικά. Έτσι, οι πάροχοι υπηρεσιών θα έχουν τη δυνατότητα να εισάγουν οποιαδήποτε χρονική στιγμή και με ευκολία υπηρεσίες τεχνολογικά καινοτόμες, χωρίς να απαιτείται να προβλέψουν όλα τα χαρακτηριστικά που θα απαιτείται να διαθέτουν, πράγμα το οποίο αποτελεί τον κανόνα σήμερα.

Σε γενικές γραμμές ωστόσο, δεδομένου ότι τα ευεργετικά αποτελέσματα της ικανότητας δικτύων να αναδιαρθώνονται για να προσαρμόζονται στις εκάστοτε συνθήκες είναι πραγματικά εντυπωσιακά, ελλοχεύει ο κίνδυνος να παρουσιαστούν ως θαύματα από καιροσκόπους παρόχους, ώστε το κόστος χρησιμοποίησής τους από τους πελάτες τους να εκτοξευθεί στα ύψη. Για αυτό το λόγο, απαιτούνται προσεκτικές οικονομοτεχνικές μελέτες επί του θέματος (οι οποίες ξεφεύγουν από το σκοπό της διατριβής, εκτός από το θέμα της εμπορικής εκμετάλλευσης του φάσματος που αναλύεται στο κεφάλαιο 6), ώστε τα δυναμικά αναδιαρθούμενα δίκτυα να αποδειχτούν εμπορικά εκμεταλλεύσιμα. Σε διαφορετική περίπτωση, η εμπορική τους αποτυχία θα πρέπει να θεωρείται δεδομένη.

1.5 Από τα reconfigurable δίκτυα, στα γνωσιακά δίκτυα επικοινωνιών ασύρματης πρόσβασης (Cognitive, Wireless Access, Networks)

1.5.1 Γνωριμία – Βασικά Λειτουργικά Χαρακτηριστικά

Ευθυγραμμιζόμενοι με την πεποίθηση ότι κοινός στόχος όλων των ερευνητικών προσπαθειών στις τηλεπικοινωνίες είναι η παροχή διαρκώς αναβαθμισμένων και ριζοσπαστικών υπηρεσιών, με τρόπο μη δαπανηρό, θα καταλήξουμε αβίαστα στο συμπέρασμα ότι οι παρούσες δικτυακές τεχνολογίες αδυνατούν να αντεπεξέλθουν σε τόσο υψηλές προσδοκίες, παρά την παρατηρούμενη συνεχή και αδιαμφισβήτητη πρόοδο. Λαμβάνοντας υπόψη μάλιστα την αυξημένη πολυπλοκότητα που θα χαρακτηρίζει τα μελλοντικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα (εξαιτίας τόσο των διαρκώς και περισσότερο καινοτόμων παρεχομένων υπηρεσιών, όσο και της συνύπαρξης και συνεργασίας συστημάτων διαφορετικής φύσης), καθίσταται δύσκολη η εξελικτική πορεία των ασυρμάτων επικοινωνιών. Αυτό συμβαίνει διότι με την παρούσα λειτουργική αρχιτεκτονική των ασυρμάτων επικοινωνιών, η επικοινωνία μεταξύ των διαφόρων οντοτήτων κάθε δικτύου περιορίζεται σημαντικά από τη διαστρωματωμένη αρχιτεκτονική των πρωτοκόλλων, πράγμα το οποίο δεν επιτρέπει σε ένα στοιχείο δικτύου να διαθέτει γνώση της κατάστασης στην οποία βρίσκονται άλλα στοιχεία. Με αυτή τη λογική, οποιαδήποτε ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ στοιχείων δικτύου είναι εξαιρετικά χρονοβόρα, οπότε καθίσταται εξαιρετικά δύσκολη και αργή η προσαρμογή του όλου δικτύου σε τυχόν αλλαγές που επιτάσσονται από εξωτερικά αίτια.

Στον αντίποδα αυτών και με στόχο να χρησιμοποιηθούν συμπληρωματικά ως προς την όλη ασύρματη B3G υποδομή, βρίσκονται τα λεγόμενα *γνωσιακά δίκτυα επικοινωνιών* (cognitive networks) [18][19][19][20][21], τα οποία αναμένεται ότι θα διευκολύνουν σημαντικά την επίτευξη του στόχου της συνδεσιμότητας οποτεδήποτε, οπουδήποτε και με οποιονδήποτε τρόπο.

Σε γενικές γραμμές, *“cognitive”* μπορεί να ονομαστεί ένα σύστημα το οποίο διαθέτει τη δυνατότητα να *γνωρίζει* το βέλτιστο τρόπο με τον οποίο θα πρέπει να ανταποκριθεί στις επιταγές του εξωτερικού του περιβάλλοντος. Η εν λόγω *γνώση* προέρχεται από τη συνεχή ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ του συστήματος και του περιβάλλοντός του, μετατρέπεται σταδιακά σε εμπειρία και υποστηρίζεται από την ύπαρξη μηχανισμών λήψης αποφάσεων που δύνανται να *μαθαίνουν* τι απόφαση πρέπει να λάβουν. Στην περίπτωση των ασυρμάτων

δικτύων, ο cognitive χαρακτήρας συνίσταται στη δυνατότητα γνώσης του βέλτιστου τρόπου με τον οποίο τα δίκτυα πρέπει να προσαρμοστούν στις διαρκώς μεταβαλλόμενες εξωτερικές συνθήκες. Θα λέγαμε ότι τα cognitive δίκτυα, με τον τρόπο λειτουργίας τους, ελαχιστοποιούν (ακόμα περισσότερο από την περίπτωση των reconfigurable δικτύων) την εκ των προτέρων αναγκαία εγκατάσταση οποιουδήποτε λογισμικού σε τερματικά και στοιχεία δικτύου. Αντίθετα, διαθέτοντας απλά τους κατάλληλους μηχανισμούς που διατηρούν πληροφορία από παρελθούσες αλληλεπιδράσεις του δικτύου με το περιβάλλον, δύνανται να προσαρμόζουν καταλλήλως λειτουργικές τους παραμέτρους και άρα και τη συμπεριφορά τους, ανταποκρινόμενα έτσι σε εξωτερικές διεγέρσεις. Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις μάλιστα, η προσαρμογή πραγματοποιείται και εκ των προτέρων, λόγω της γνώσης του πότε είναι πιθανό να χρειαστεί.

Η προσαρμογή των cognitive δικτύων στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις του περιβάλλοντος πραγματοποιείται μέσω αναδιάρθρωσης των ιδίων λειτουργικών τους παραμέτρων, αναδιάρθρωση η οποία δύνανται να επηρεάσει όλα τα στρώματα λειτουργίας ενός πρωτοκόλλου, όπως το φυσικό (PHY), το MAC (Medium Access Control), το LLC (Logical Link Control), τα στρώματα δικτύου, μεταφοράς, κλπ.

Η αναδιάρθρωση στα στρώματα PHY/MAC περιλαμβάνει την επιλογή των καταλληλότερων RAT(s) και φάσματος για λειτουργία (εδώ υπάρχουν οι μηχανισμοί αναδιάρθρωσης που αναφέρθηκαν ανωτέρω, οι οποίοι δείχνουν και τη συμπληρωματικότητα των cognitive ως προς τα reconfigurable δίκτυα).

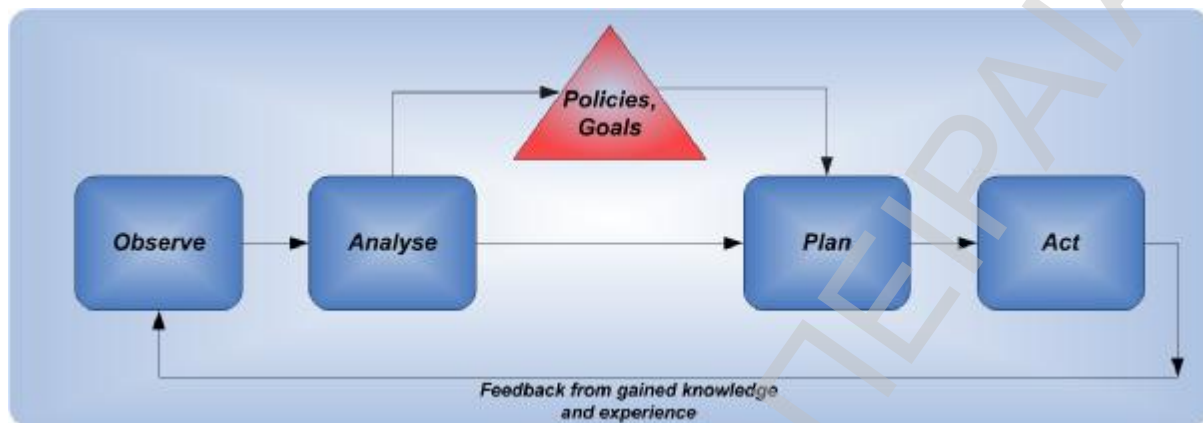
Στο επίπεδο δικτύου τα cognitive δίκτυα παρέχουν μηχανισμούς για την κατανομή της κίνησης στα επιλεχθέντα RATs, με τρόπο που εξασφαλίζει την ικανοποίηση δεδομένων κριτηρίων.

Στο επίπεδο εφαρμογών, διατίθενται μηχανισμοί για την παροχή των υψηλότερων δυνατών επιπέδων QoS στους χρήστες.

Με αυτή τη λογική, προβλέπεται ότι οι δικτυακές δυνατότητες που διαθέτουν τα cognitive δίκτυα θα συμβάλουν στη μείωση των εξόδων υποδομής (Capital Expenditure - CAPEX) και παράλληλα τον έλεγχο των λειτουργικών εξόδων (Operational Expenditure - OPEX), κατά την εγκατάσταση και θέση σε λειτουργία υποδομών B3G. Προς τούτο, διενεργείται έρευνα σε μεγάλη κλίμακα πάνω σε ποικίλα θέματα που αγκαλιάζουν την τεχνολογία των cognitive δικτύων, τόσο υπό τη σκέπη ερευνητικών προγραμμάτων, όσο και υπό άλλους οργανισμούς παγκόσμιας εμβέλειας [17][25]. Τέτοιες εργασίες έχουν στόχο τόσο τη θεμελίωση του

πλαisiού στο οποίο θα βασιστεί η εμπορική είσοδος των γνωσιακών δικτύων, όσο και την αναγνώριση των σχετικών με αυτά περιοχών δουλειάς.

Το Σχήμα 1-4 απεικονίζει γραφικά την αρχή λειτουργίας των cognitive δικτύων.



Σχήμα 1-4: Αρχή λειτουργίας cognitive δικτύων

Παρατηρούμε ότι το δίκτυο αδιαλείπτως παρακολουθεί (*observes / monitors*) το περιβάλλον, με στόχο να ανακαλύψει τυχόν αλλαγές που δύνανται να επηρεάσουν τη λειτουργία του. Οι παρατηρήσεις υπόκεινται σε ανάλυση (*analyse*) και αποτελούν τη βάση για τη λήψη της απόφασης αν απαιτείται κάποιας μορφής αναδιάρθρωση. Μόλις ληφθεί η σχετική απόφαση (*plan*), το δίκτυο δρα αναλόγως (*act*). Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται υπό τη μορφή βρόχου, ο οποίος καθοδηγείται (ελέγχεται) από ένα σύνολο από πολιτικές / στρατηγικές (*policies*) και στόχους (*goals*) αποφάσεων. Η όλη επαναλαμβανόμενη διαδικασία στηρίζεται σε μηχανικές μεθόδους εκμάθησης (*machine learning*).

Σε αυτό το σημείο εύλογα τίθεται το ζήτημα της διαχείρισης όλων των οντοτήτων που απαρτίζουν ένα cognitive δίκτυο. Συγκεκριμένα, οποιαδήποτε απόφαση του τρόπου με τον οποίο θα προσαρμοστεί ένα δίκτυο στις επιταγές του εξωτερικού του περιβάλλοντος, χρήζει υποστήριξης από έξυπνα συστήματα διαχείρισης.

Τα απαιτούμενα συστήματα διαχείρισης είναι αναγκαίο να αυτοματοποιούν - στο βαθμό του εφικτού - τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων αναδιάρθρωσης, ώστε να απλουστευθεί ο σχεδιασμός και η συνολική διαχείριση ενός δικτύου, σε ένα τόσο σύνθετο περιβάλλον. Με γνώμονα τα παραπάνω, στα πλαίσια της διατριβής προτείνεται η διάσπαση του συνολικού προβλήματος διαχείρισης πόρων (συμπεριλαμβανομένου πάντα του φάσματος) σε 2 μέρη:

Ένα ανεξάρτητο του RAT τμήμα της διαχειριστικής μεθόδου (inter-RAT management) βλέπει το όλο ζήτημα της διαχείρισης ενός δικτύου από ένα γενικό πρίσμα, όντας υπεύθυνο κυρίως για την αντιμετώπιση θεμάτων ανάθεσης / κατανομής της κίνησης στα RATs. Με αυτό υπονοείται ότι ένας αριθμός από RATs θεωρούνται ότι βρίσκονται στη διάθεση ενός τέτοιου συστήματος διαχείρισης. Συγκεκριμένα, το inter-RAT τμήμα αναλαμβάνει την ευθύνη για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με το βέλτιστο RAT/συχνότητα λειτουργίας, την κατανομή της κίνησης στα RATs, τον καθορισμό επιπέδων ποιότητας υπηρεσίας, κλπ. Οι ανωτέρω διαχειριστικές λειτουργίες σχετίζονται με την ύπαρξη και λειτουργία δυναμικά αναδιαρθρούμενων πομποδεκτών. Στο inter-RAT κομμάτι αναφέρονται τα κεφάλαια 3 και 4 της διατριβής.

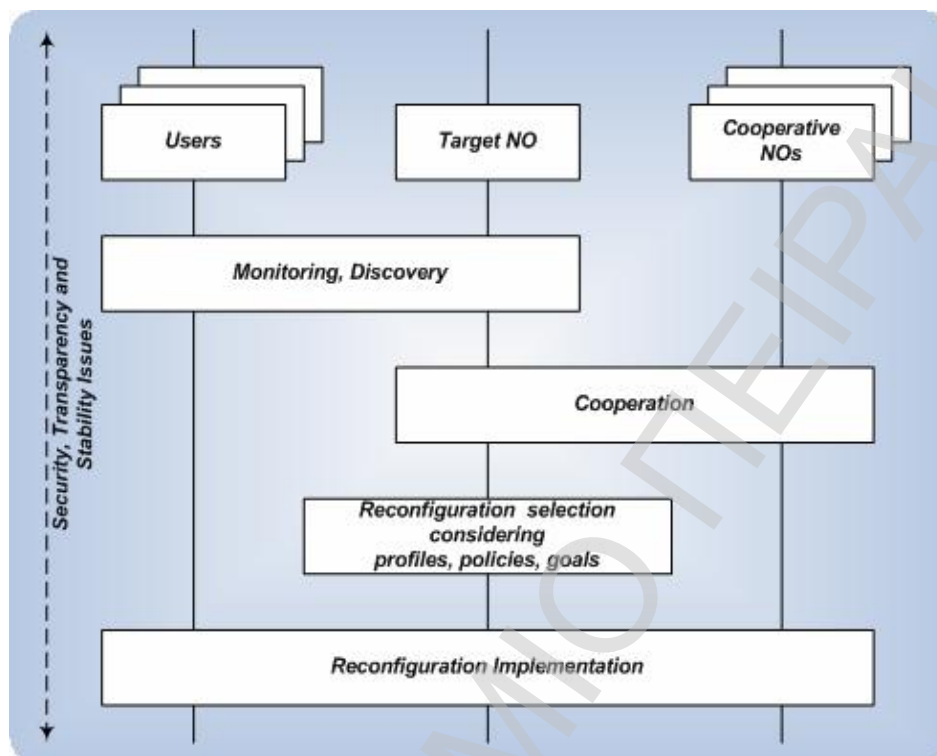
Έχοντας γνωστές τις διαρθρώσεις που έχουν αποφασιστεί από το inter-RAT τμήμα, η διαχείριση ενός B3G (εν γένει) δικτύου συνήθως συνεχίζεται με τη χρήση ενός δεύτερου τμήματος, που δεν είναι άλλο από ένα τμήμα που είναι υπεύθυνο (και χαρακτηριστικό) για κάθε επιλεχθείσα τεχνολογία (intra-RAT management). Το intra-RAT κομμάτι αποσκοπεί στο να βελτιώσει τις ήδη ληφθείσες αποφάσεις για ένα πομποδέκτη, αναφορικά με τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του εν λόγω RAT. Στο intra-RAT κομμάτι αναφέρεται το κεφάλαιο 5 της διατριβής.

Αναφορικά με τα παραπάνω, μια πληρέστερη ανάλυση των διαφόρων προσεγγίσεων των αλγοριθμικών μεθόδων διαχείρισης πόρων και του τρόπου με τον οποίο αυτοί συλλειτουργούν, παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο (2). Επιπλέον, η επόμενη παράγραφος παρουσιάζει ένα επιχειρησιακό μοντέλο για την εισαγωγή των cognitive δικτύων στην παγκόσμια σκηνή των τηλεπικοινωνιών, το οποίο αποσκοπεί στο να φωτίσει τα πιθανά οφέλη που θα προκύψουν εκ της χρήσης τους, καθώς και στο να αναλύσει τους ρόλους των εμπλεκόμενων με αυτά οντοτήτων (και τις μεταξύ τους δημιουργούμενες σχέσεις).

1.5.2 Επιχειρησιακό Μοντέλο

Ας θεωρήσουμε έναν NO που διαθέτει άδειες λειτουργίας αρκετών RATs σε ένα τμήμα ενός cognitive δικτύου. Το τμήμα αυτό αποτελείται από διάφορα cognitive στοιχεία (ήτοι στοιχεία που διαθέτουν δυναμικά αναδιαρθρούμενους πομποδέκτες και εξυπηρετούν δυναμικά αναδιαρθρούμενα τερματικά, υποστηριζόμενα από κατάλληλα συστήματα διαχείρισης που προσδίδουν το χαρακτηρισμό "cognitive"). Ταυτόχρονα, δεν αποκλείεται η πιθανότητα να υπάρχουν και άλλοι NOs στην ίδια περιοχή, υπεύθυνοι για τη λειτουργία του ίδιου ή άλλων RATs. Ένα σχετικό επιχειρησιακό μοντέλο απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 1-5. Πρέπει δε

να σημειωθεί ότι οι διάφορες αλληλεπιδράσεις αναφέρονται σε διάφορες χρονικές κλίμακες και επίπεδα διαχείρισης (στοιχείο, δίκτυο, υπηρεσία).



Σχήμα 1-5: Επιχειρησιακό Μοντέλο

Επικεντρωνόμαστε σε έναν NO (target NO), ο οποίος συνεχώς παρακολουθεί το περιβάλλον (monitoring) με στόχο την ανίχνευση τυχόν αλλαγών που επηρεάζουν την ομαλή λειτουργία του τμήματος του δικτύου. Παράλληλα γίνονται γνωστές και οι δυνατότητες που προσφέρονται από τις διάφορες υποψήφιες λύσεις αναδιάρθρωσης (discovery). Κάποια στιγμή, ο NO δέχεται ένα έναυσμα για αναδιάρθρωση, το οποίο δύναται να πηγάζει από ποικίλα αίτια, όπως επί παραδείγματι η αδυναμία παροχής των απαιτούμενων επιπέδων ποιότητας, χωρητικότητας, κλπ. Το έναυσμα αυτό μπορεί φυσικά να προέρχεται και από το τερματικό. Σε κάθε περίπτωση πάντως το έναυσμα αυτό οδηγεί στην αναγνώριση της ανάγκης προσαρμογής σε νέες συνθήκες, προσαρμογή η οποία επιτυγχάνεται με αναδιάρθρωση του εν λόγω τμήματος δικτύου.

Η όλη διαδικασία εμπλέκει και τους υπόλοιπους συνεργαζόμενους NOs [24] της περιοχής, αναφορικά με τυχόν προσφορές τους για την εξυπηρέτηση τμήματος της ζήτησης. Οι προσφορές αυτές, αλλά και άλλες παράμετροι, όπως τα προφίλ των εφαρμογών που ζητούν οι χρήστες και του εξοπλισμού που διαθέτουν, οι πολιτικές και οι στόχοι του NO,

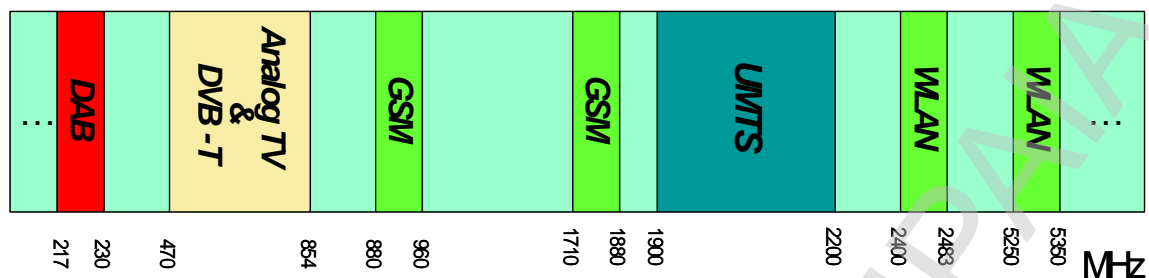
λαμβάνονται υποψη και οδηγούν στην επιλογή του κατάλληλου «σχήματος» αναδιάρθρωσης. Τέλος, η αναδιάρθρωση αυτή λαμβάνει χώρα και συνήθως περιλαμβάνει την ενεργοποίηση τυχόν RATs και τον καθορισμό νέων συμφωνιών με τους υπόλοιπους NOs.

1.6 Γενικές προκλήσεις σχετικά με τη χρήση του φάσματος

Με τον όρο «φάσμα» στις τηλεπικοινωνίες εννοούμε οποιοδήποτε εύρος στην κλίμακα των συχνοτήτων. Συχνά μάλιστα ο όρος υποδηλώνει το συγκεκριμένο εύρος που είναι απαραίτητο για την επιτυχή σύνδεση μεταξύ ενός πομπού και ενός δέκτη. Και αυτό διότι από την εποχή της πρώτης επιτυχούς μετάδοσης και λήψης ενός ραδιοφωνικού σήματος που πραγματοποιήθηκε από τον Guglielmo Marconi, το «ραδιο-φάσμα» αποδείχτηκε το περισσότερο θεμελιώδες μέγεθος από το οποίο εξαρτάται οποιαδήποτε ραδιοεπικοινωνία. Με το πέρασμα του χρόνου μάλιστα, η χρήση του αυξήθηκε και εξακολουθεί να αυξάνεται με γοργούς ρυθμούς, με αποτέλεσμα στη σύγχρονη εποχή, το φάσμα να τίθεται σε μια πληθώρα από διαφορετικές χρήσεις σε στεριά, θάλασσα, αέρα και διάστημα. Αυτές οι χρήσεις από τη μία πλευρά επιφέρουν τεράστια οφέλη στην κοινωνία μας, αλλά ταυτόχρονα καθιστούν ζωτικής σημασίας τη χρησιμοποίηση των κατάλληλων μηχανισμών διαχείρισης του πολύτιμου αυτού αγαθού. Στην πραγματικότητα και οι πάροχοι των υπηρεσιών που χρησιμοποιούν το φάσμα ενδιαφέρονται για τη σωστή διαχείρισή του, καθότι επιθυμούν να μεγιστοποιήσουν την αποδοτικότητα στη χρήση του φάσματος που διαθέτουν, ώστε να εξυπηρετήσουν ταυτόχρονα όσο το δυνατόν περισσότερους χρήστες και άρα να αυξήσουν τα έσοδά τους.

Προς το παρόν το φάσμα κατανέμεται σε εθνικό επίπεδο με τη μέθοδο της παροχής στατικών / μόνιμων αδειών για χρήση συγκεκριμένου εύρους του σε κάθε RAT [26][27][28], ενώ υπάρχουν περαιτέρω υποδιαιρέσεις του, ώστε κάθε πάροχος να έχει υπό την κατοχή του ένα μόνο κομμάτι που χρειάζεται για την παροχή συγκεκριμένων υπηρεσιών, μέχρις ότου λήξει η άδεια που κατέχει. Αυτά τα κομμάτια φάσματος έχουν προκαθορισμένο και σταθερό εύρος και απέχουν μεταξύ τους απόσταση (στην κλίμακα των συχνοτήτων) ικανή ώστε να αποφεύγονται οι ανεπιθύμητες παρεμβολές. Η απόσταση αυτή απαντάται στη βιβλιογραφία και με τον όρο «εύρος ζώνης – φρουρός». Αυτή η μέθοδος ανάθεσης φάσματος αποτελεί την ιδανική λύση και για εύκολη κατασκευή συσκευών που λειτουργούν σε συγκεκριμένες συχνότητες, οπότε σε γενικές γραμμές έχει αποδειχθεί η πλέον αποτελεσματική εδώ και χρόνια.

Ενδεικτικά, η παρούσα κατάσταση όσον αφορά την κατανομή του φάσματος σε διεθνές επίπεδο παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1-6):



Σχήμα 1-6: Διεθνής κατανομή συχνοτήτων

Ωστόσο, ουδέν καλόν αμιγές κακού! Η μέθοδος στατικής ανάθεσης φάσματος διαθέτει αρκετά μειονεκτήματα. Κατ' αρχάς οι βιομηχανίες ασυρμάτων συσκευών και επικοινωνιών συγκλίνουν συνεχώς μεταξύ τους και οι προσφερόμενες από αυτές υπηρεσίες και εφαρμογές ελάχιστα διαφέρουν μεταξύ τους. Έτσι, οι μέχρι πρότινος υπάρχοντες μηχανισμοί διαίρεσης του φάσματος αναλόγως της υπηρεσίας παύουν να είναι αποτελεσματικοί. Ακόμα μεγαλύτερη σύγκλιση αναμένεται να επέλθει τα επόμενα χρόνια, με τη συνένωση πολλών RATs διαφορετικής φύσεως σε κοινά δίκτυα – κορμούς, όπως επιτάσσουν οι σύγχρονες επικοινωνίες. Συγκεκριμένα, η είσοδος των cognitive δικτύων ήδη προβλέπει συγκεκριμένα σενάρια ευέλικτης χρήσης του διαθέσιμου φάσματος, όπως θα αναφερθεί στο κεφάλαιο 6. Εκτός των άλλων, η στατική παροχή αδειών σε συγκεκριμένα RATs παρεμποδίζει την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, καθώς επιβραδύνει τον κύκλο κάθε τεχνολογίας στην αγορά.

Επιπλέον, αξιοσημείωτο ζήτημα αποτελεί το γεγονός ότι τα περισσότερα δίκτυα επικοινωνιών υπόκεινται σε χρονικές και τοπικές μεταβολές της απαιτούμενης κίνησης, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται ανάλογα και το ποσοστό του φάσματος που χρησιμοποιείται. Έτσι, ένα κομμάτι του φάσματος που χρησιμοποιείται για μια υπηρεσία παραμένει αχρησιμοποίητο σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές και σε ορισμένες περιοχές, ενώ αντίστοιχα άλλες υπηρεσίες στερούνται του απαιτούμενου φάσματος στις ίδιες χρονικές στιγμές και περιοχές. Δεδομένης μάλιστα της οικονομικής αξίας που έχει αποκτήσει το φάσμα και της σημασίας της αποδοτικής χρήσης του, πρέπει ξεκάθαρα να αποφεύγεται οποιαδήποτε σπατάλη του.

Από τα παραπάνω γίνεται σαφής η ύπαρξη κινήτρων για τη μελέτη αποδοτικότερων σχημάτων ανάθεσης φάσματος και η πίεση προς την έρευνα για μεγαλύτερη αποδοτικότητα

στη χρήση του φάσματος και μεγαλύτερη ευελιξία. Αυτά βέβαια απαιτούν νέες τεχνολογίες αναφορικά με κεραιές, εναέριες διεπαφές (air interfaces) και τοπολογίες δικτύου.

Σε γενικές γραμμές, πιστεύεται ότι θα μπορούσε να βελτιωθεί η επίδοση των δικτύων, να αυξηθούν τα επίπεδα ποιότητας και να μειωθεί το κόστος προς το χρήστη, αν δινόταν η δυνατότητα στους NOs, να αποφασίσουν αυτοί για το πως θα αξιοποιήσουν το φάσμα. Με άλλα λόγια θα ήταν αποδοτικότερο το να διαλέξουν οι ίδιοι οι NOs το πώς θα αναθέσουν το φάσμα στα συστήματά τους, ώστε να αποφευχθεί το να υπάρχουν τμήματα φάσματος τα οποία μένουν αχρησιμοποίητα, ενώ θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν σε συστήματα τα οποία παρουσιάζουν υψηλή χρησιμοποίηση. Η δυνατότητα δυναμικής ανάθεσης του φάσματος που αποτελεί και το γενικό γνωστικό αντικείμενο μέσα στο οποίο κινείται η διατριβή, αποτελεί σήμερα έναν από τους πλέον σύγχρονους τομείς έρευνας στον τομέα των ασυρμάτων επικοινωνιών. Οι μέθοδοι, οι προϋποθέσεις, οι απαιτήσεις και τα αποτελέσματα μιας τέτοιας προσέγγισης εγείρουν το ενδιαφέρον της διεθνούς επιστημονικής κοινότητας, με ρυθμό αυξανόμενο μάλιστα, ειδικά με τη συνεχή έλευση περισσότερο εξελιγμένων συστημάτων.

1.7 Διάφορες Προσεγγίσεις για τη Διαχείριση του Φάσματος

1.7.1 Κατηγοριοποίηση με βάση το επίπεδο καθορισμού του προς χρήση φάσματος

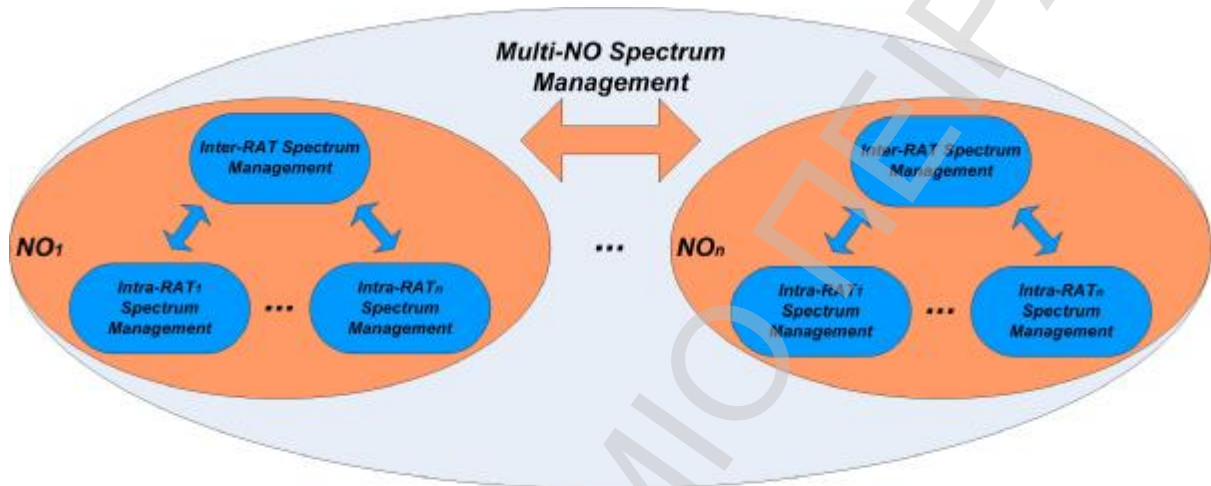
Ο καθορισμός του προς χρήση απαιτούμενου φάσματος, δύναται να προσεγγιστεί με 3 διαφορετικούς τρόπους:

- Διαχείριση φάσματος σε επίπεδο RAT (Intra-RAT Spectrum Management).
- Ταυτόχρονη διαχείριση φάσματος σε πολλά RATs ενός NO (Inter-RAT Spectrum Management).
- Από κοινού διαχείριση φάσματος πολλών παρόχων (Multi-NO Spectrum Management).

Τα παραπάνω παρουσιάζονται αναλυτικότερα στο Σχήμα 1-7.

Η Inter-RAT Spectrum Management προσέγγιση υποθέτει ότι ένας NO διαθέτει μεν κατά τα γνωστά άδειες λειτουργίας για περισσότερα του ενός RAT, ενώ παράλληλα, δύναται να κατανέμει ένα σύνολο από διαθέσιμες συχνότητες σε αυτά τα RATs με το βέλτιστο δυνατό τρόπο. Αυτή η μέθοδος διαχείρισης φάσματος είναι κατανεμημένη, δηλαδή μπορεί να

πραγματοποιηθεί ανά κυψέλη ή εν γένει ανά τμήμα δικτύου (network segment), όπου πολλές τεχνολογίες (UMTS, WLAN, HSDPA, WiMAX, κλπ) λειτουργούν ταυτόχρονα και αποσκοπεί στο να εγγυάται ανά πάσα στιγμή τη μέγιστη δυνατή αποδοτικότητα του δικτύου. Στα πλαίσια της διατριβής αυτής εξετάζονται τέτοιες μέθοδοι στα κεφάλαια 3 και 4 (ξανασημειώνεται εδώ η αντιστοιχία με τη γενικότερη ανάλυση περί inter-RAT συστημάτων).



Σχήμα 1-7: Κατηγοριοποίηση με βάση το επίπεδο καθορισμού φάσματος προς χρήση

Η Intra-RAT Spectrum Management προσέγγιση υποδηλώνει πως ένας NO εξετάζει ένα μόνο RAT ανά περίπτωση. Με τον τρόπο αυτό, γνωρίζοντας ανά πάσα στιγμή την κίνηση που καλείται να εξυπηρετήσει, ο NO αποφασίζει για την κατανομή του απαιτούμενου φάσματος στους χρήστες που εξυπηρετούνται από το εν λόγω RAT. Επιπλέον, κατανέμει τις επιλεχθείσες συχνότητες με τέτοιο τρόπο, ώστε να ικανοποιούνται διάφορα αντικειμενικά κριτήρια, χαρακτηριστικά αυτού καθαυτού του RAT. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται σε τακτά χρονικά διαστήματα (όσο συχνότερα τόσο καλύτερα μέχρις ενός ορίου που η απόδοση του συστήματος παραμένει ανεπηρέαστη) και ανακατανέμει διαρκώς το διαθέσιμο φάσμα στους χρήστες. Αν οι απαιτούμενες συχνότητες, δεν κατέχονται από το υπό θεώρηση RAT στα συγκεκριμένα χωροχρονικά πλαίσια, πραγματοποιείται κατάλληλη διαπραγμάτευση αγοραπωλησίας (μέθοδοι δημοπρασιών) από τη ρυθμιστική αρχή (regulatory body). Στα πλαίσια ωστόσο της διατριβής, εξετάζεται το χαρακτηριστικό παράδειγμα διαχείρισης φάσματος σε τεχνολογίες 3G (κεφάλαιο 5).

Εδώ πρέπει να επισημανθεί και η αντιστοιχία με το γενικό σύστημα διαχείρισης πόρων εντός ενός δεδομένου RAT (intra-RAT management).

Επιπλέον η περίπτωση Multi-NO Spectrum Management θεωρεί τις αιτήσεις για φάσμα που απευθύνονται συνολικά σε NOs και αποσκοπεί στην απο κοινού εκμετάλλευση του κατεχόμενου από το σύνολο των NOs, φάσματος, με στόχο την αύξηση των εσόδων τους. Μια τέτοια περίπτωση παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 6.

Τέλος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-7, δεν αποκλείεται παράλληλη εφαρμογή και των τριών τύπων προσέγγισης του προβλήματος διαχείρισης του φάσματος σε περιβάλλοντα B3G.

1.7.2 Κατηγοριοποίηση με βάση τη χρήση του φάσματος καθαυτή

Διεθνώς βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο διάφορων τύπων προσπάθειες αναφορικά με μια περισσότερο ευέλικτη διαχείριση του φάσματος. Η πλειοψηφία αυτών των ερευνητικών προσπαθειών μπορεί να ενταχθεί στις κατηγορίες που φαίνονται στο Σχήμα 1-8, θεωρώντας ως κριτήριο το εξεταζόμενο τμήμα του διαθέσιμου φάσματος και το κατά πόσο η χρήση του βασίζεται σε αδειοδότηση.

USAGE	Non – opportunistic (agreement based)	Opportunistic
SPECTRUM		
Licensed	✓	✓
Unlicensed	<i>Non Applicable</i>	✓

Σχήμα 1-8: Κατηγοριοποίηση μεθόδων διαχείρισης φάσματος με βάση τη χρήση του

Στο Σχήμα 1-8 παρατηρούμε ότι το φάσμα γενικά μπορεί να χωριστεί στις εξής κατηγορίες:

- Φάσμα που παραχωρείται με αδειοδότηση από την εκάστοτε ρυθμιστική αρχή (licensed), δηλαδή είτε την International Telecommunications Union (ITU) [26], είτε τις τοπικές αρχές, όπως την Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων (ΕΕΤΤ) [28]. Τα περισσότερα RATs (UMTS, GSM) λειτουργούν σε licensed ζώνες του φάσματος.
- Φάσμα που δεν παραχωρείται με αδειοδότηση (unlicensed) και η χρήση του είναι ελεύθερη ανά περιοχή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα RAT που λειτουργεί σε unlicensed ζώνες του φάσματος είναι το WLAN.

Σε γενικές γραμμές, η διαχείριση licensed φάσματος επιτρέπει σε διαφορετικής φύσεως RATs να μοιράζονται τους πόρους σε ένα δίκτυο, σύμφωνα με ένα 3G σενάριο. Κάτι παρόμοιο λειτουργεί επιτυχώς σήμερα με τη συνύπαρξη στην ίδια φασματική περιοχή της αναλογικής και της ψηφιακής τηλεόρασης. Αντιθέτως, η διαχείριση unlicensed φάσματος υπονοεί ότι το φάσμα αντιμετωπίζεται σαν ένας ανοιχτός διαθέσιμος πόρος που χρησιμοποιείται από οποιαδήποτε κατάλληλη συσκευή.

Επιπροσθέτως, η διαχείριση φάσματος μπορεί να καταστεί εφαρμόσιμη είτε κατόπιν συμφωνιών μεταξύ ΝΟ ή/και ρυθμιστικής αρχής (agreement – based), είτε άνευ συμφωνιών (opportunistic). Έτσι, το Σχήμα 1-8 εξηγεί πώς μπορούν να λειτουργήσουν οι διάφορες μέθοδοι διαχείρισης φάσματος με ή χωρίς την πραγματοποίηση προηγουμένως συμφωνιών.

1.8 Διάρθρωση της διατριβής

Κατάκολουθία με τα ανωτέρω, η διάρθρωση της διατριβής ακολουθεί την εξής λογική:

Το επόμενο κεφάλαιο (**δεύτερο**) θεωρείται θεμελιώδες για την κατανόηση του υπολοίπου της διατριβής, καθότι καθορίζει τα πλαίσια μέσα στα οποία αυτή τοποθετείται. Έτσι, αρχικά αναλύονται τα βασικά ζητήματα που αναφέρονται κατά τη διαχείριση πόρων σε δίκτυα επικοινωνιών 3G και προτείνεται η γενική μορφή της αρχιτεκτονικής των οικογενειών αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται προς τούτο, ορίζοντας καταλλήλως την περιοχή λειτουργίας καθεμιάς εξ'αυτών. Στη συνέχεια, η διατριβή επικεντρώνει στην οικογένεια αλγορίθμων δυναμικής σχεδίασης και διαχείρισης ενός δικτύου (Dynamic Network Planning and Management – DNPM), παρουσιάζοντας τους αλγορίθμους που την απαρτίζουν, ήτοι:

- RAT and Spectrum Selection: Επιλογή τεχνολογίας και φάσματος προς λειτουργία. Οι σχετικοί αλγόριθμοι παρουσιάζονται στα κεφάλαια 3 και 4.

- CDMA Configuration: Βελτιστοποίηση λειτουργίας επιλεγθέντων CDMA συστημάτων. Ένας σχετικός αλγόριθμος διαχείρισης του διαθέσιμου CDMA φάσματος παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 5.
- Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) Configuration: Βελτιστοποίηση λειτουργίας επιλεγθέντων OFDMA συστημάτων. Μια τεχνική αποτίμησης της μεθόδου δεξαμενής φάσματος (spectrum pooling) σε επιλεγθέντα OFDMA συστήματα παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 6.

Παράλληλα, παρουσιάζονται οι αλληλεπιδράσεις των ανωτέρω οντοτήτων (αλγορίθμων) της οικογένειας DNPM. Τέλος, το κεφάλαιο κλείνει με μια ματιά στις μελλοντικές τάσεις των συστημάτων διαχείρισης δικτύων επικοινωνιών, δίνοντας έμφαση στη δυνατότητα απόκτησης γνώσης που θα βοηθήσει σε ταχύτερες και αποτελεσματικότερες αποφάσεις και στους μηχανισμούς που απαιτούνται προς τούτο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ανάλυσης του τρόπου με τον οποίο συλλειτουργούν οι διάφοροι αλγόριθμοι διαχείρισης πόρων σε reconfigurable και cognitive δίκτυα επικοινωνιών, με την παρουσίαση και αναλυτική περιγραφή της αρχιτεκτονικής λειτουργίας τους, καθώς και της γενικότερης αρχιτεκτονικής διαχείρισης που αναμένεται να χαρακτηρίσει την επόμενη γενιά δικτύων.

Εν συνεχεία, στο **τρίτο** κεφάλαιο, παρουσιάζεται το πρώτο κομμάτι των αλγορίθμων, ως αναφέρθηκε ανωτέρω, ήτοι το *RAT and Spectrum Selection*.

Ο γενικής μορφής "*RAT and Spectrum Selection*" αλγόριθμος δύναται να εφαρμοστεί σε συστήματα reconfigurable και cognitive δικτύων. Η εν λόγω τεχνική θεωρεί μια περιοχή ενός δικτύου, η οποία λόγω υπερφόρτωσης, χρήζει εκ νέου προσαρμογής στις εξωτερικές συνθήκες, προκειμένου να εξυπηρετήσει με βέλτιστο τρόπο τους χρήστες εντός της περιοχής. Στην περιοχή αυτή υπάρχουν δυναμικά αναδιαρθρούμενοι πομποδέκτες που λειτουργούν με τυχούσες τεχνολογίες επικοινωνιών. Ο αλγόριθμος, αφού λάβει υπόψη του τις δυνατότητες όλων των πιθανών αναδιαρθρώσεων (κατανομές τεχνολογιών, φάσματος και κίνησης στους πομποδέκτες), επιλέγει τη βέλτιστη εξ'αυτών, με τρόπο που να αναθέτει στους χρήστες τα βέλτιστα δυνατά επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας, ελαττώνοντας παράλληλα το απαιτούμενο κόστος (ως προς την παροχή των ζητηθέντων επιπέδων ποιότητας, αλλά και ως προς την απαιτούμενη σηματοδοσία). Το πρόβλημα μοντελοποιείται μαθηματικά και παρουσιάζεται η γενικευμένη μέθοδος επίλυσής του, η οποία βασίζεται στη βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης, που συνίσταται στη μεγιστοποίηση των παρεχομένων επιπέδων ποιότητας και στην ελαχιστοποίηση του κόστους.

Μια παραλλαγή / απλούστευση της γενικής μορφής του αλγορίθμου σε περιπτώσεις σημερινών (εμπορικών) δικτύων, καλείται να αντιμετωπίσει το πρόβλημα RQ-A ("RAT, Demand and QoS Assignment") που αναφέρεται συχνά σε αυτά. Η εν λόγω τεχνική θεωρεί ως διάρθρωση ενός δικτύου μόνο την επιλογή RAT προς λειτουργία, με στόχο τη χρήση του σε σημερινές εμπορικά εκμεταλλεύσιμες τεχνολογίες, όπως οι UMTS/HSDPA και WLAN/WiMAX. Ο προσαρμοσμένος αλγόριθμος και θεωρεί και πάλι ένα τμήμα δικτύου που χρήζει προσαρμογής σε νέες συνθήκες, όμως τώρα οι χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες στους διαθέσιμους πομποδέκτες είναι οι UMTS/HSDPA και WLAN/WiMAX. Ο αλγόριθμος αφού εξετάσει και πάλι όλες τις δυνατές κατανομές τεχνολογιών στους πομποδέκτες, επιλέγει την καταλληλότερη εξ'αυτών, αποφασίζοντας παράλληλα και για την κατανομή της ζήτησης σε αυτούς και σε επίπεδα QoS. Το κριτήριο για την απόφαση είναι και πάλι η παροχή όσο το δυνατόν αυξημένων επιπέδων ποιότητας υπηρεσίας στους χρήστες, με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Και πάλι το πρόβλημα μοντελοποιείται μαθηματικά και παρουσιάζεται η αναλυτική μέθοδος επίλυσής του, η οποία συνίσταται και πάλι στη βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης.

Τέλος, παρουσιάζονται και πιθανές επεκτάσεις των 2 τεχνικών, κυρίως όσον αφορά τη δυνατότητα ενσωμάτωσης του στοιχείου της γνώσης, που θα τους προσδώσει το χαρακτηρισμό "cognitive".

Έτσι, ως λογική συνέχεια, στο **πέμπτο** κεφάλαιο, απαντάται το ερώτημα που τίθεται σχετικά με τη βέλτιστη διαχείριση του φάσματος των ήδη επιλεγθέντων συστημάτων προς λειτουργία σε ένα τμήμα B3G δικτύου. Έτσι, αναπτύσσεται μια μέθοδος για τη διαχείριση του φάσματος σε CDMA συστήματα που έχουν επιλεγθεί προς λειτουργία με τους ανωτέρω αλγορίθμους. Η μέθοδος ονομάζεται "Demand Allocation into Multiple Carriers" (DAMC). Στόχος της είναι, θεωρώντας ένα σύνολο από πομποδέκτες που χρησιμοποιούν τεχνολογίες CDMA, να κατανομή τα διαθέσιμα CDMA φέροντα στους εν λόγω πομποδέκτες. Για την κατανομή αυτή υποθέτονται διάφορες πολιτικές κατανομής και τελικά επιλέγεται εκείνη η πολιτική που ικανοποιεί το κριτήριο της ελάχιστης εκπεμπόμενης και λαμβανόμενης ισχύος σε ολόκληρο το τμήμα δικτύου.

Η μέθοδος DAMC μοντελοποιείται μαθηματικά και εξετάζονται διάφορα πιθανά σενάρια εφαρμογής της, ενώ εν συνεχεία παρουσιάζονται ορισμένα ενδεικτικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της σε ένα προσομοιωμένο δίκτυο.

Κατόπιν, στο **έκτο** κεφάλαιο, μελετάται το θέμα της εμπορικής εκμετάλλευσης του φάσματος, με έμφαση στο διαθέσιμο φάσμα για τεχνολογίες OFDMA. Αναλύονται διάφορες

παράμετροι του θέματος αναφορικά με τη δυνατότητα αξιοποίησης του OFDMA φάσματος και εκτιμάται απο επιχειρηματικής / εμπορικής σκοπιάς το αποτέλεσμα της εκμετάλλευσής του από έναν πάροχο, όσο και της από κοινού εκμετάλλευσής του από μια μερίδα παρόχων, μέσω της δημιουργίας μιας δεξαμενής φάσματος.

Η μέθοδος αποτίμησης της επίδοσης της τεχνικής δεξαμενής φάσματος μοντελοποιείται μαθηματικά. Στη συνέχεια θεωρούνται διάφορα σενάρια εφαρμογής της και παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της, τα οποία καταδεικνύουν την αποτελεσματικότητά της.

Τέλος, στο **έβδομο** κεφάλαιο, περιγράφονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διατριβή και προτείνονται κάποιες πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις για τη συνέχιση της εργασίας σε θέματα που προέκυψαν εξ' αυτής.

1.9 Βιβλιογραφία

- [1] P.Demestichas, G.Dimitrakopoulos, J.Strassner, D,Bourse, "Introducing Reconfigurability and Cognitive Networks Concepts in the Wireless World: Research Achievements and Challenges ", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, June 2006.
- [2] G. Dimitrakopoulos, P. Demestichas, K. Tsagkaris, A. Saatsakis, K. Moessner, M. Muck, D. Bourse, "Emerging Management Concepts for Introducing Cognition in the Wireless B3G World", submitted for publication to the *Wireless Personal Communications* journal.
- [3] M.Mouly and M.B Pautet. *The GSM System for Mobile Communications*. M.Mouly, 49 rue Louise Bruneau, Palaiseau, France 1992
- [4] The 3Rd Generation Partnership Project (3GPP) Web site, www.3gpp.org , 2007
- [5] H.Holma, A.Toscalà, *W-CDMA for UMTS*, J.Wiley & Sons, second edition 2002
- [6] A.J.Viterbi, *CDMA, Principles of Spread Spectrum Communications*, Addison-Wesley1995.
- [7] D.Knisely, S.Kumer, S.Laha and S.Nanada, "Evolution of wireless data services: IS-95 to CDMA2000", *IEEE Commun.Mag.*, vol.36, pp.140-149, Oct 1998
- [8] *IEEE Personal Communications*, Special Issue on The Evolution of TDMA to 3G, vol.6, no.3, June 1999.
- [9] C.Bettstetter, H.-J.Vogel and J.Eberspracher, "GSM Phase 2+, General Packet Radio Service GPRS: Architecture, Protocols and Interfaces", *IEEE Communications Surveys*, vol.2, no.3, Third Quarter 1999.
- [10] R. Kalden, I. Meirick, M. Meyer, "Wireless Internet access based on GPRS", *IEEE Personal Commun.*, Vol. 7 No. 2, April 2000
- [11] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 802 standards, www.ieee802.org, 2007
- [12] WiMAX Forum, <http://www.wimaxforum.org>, 2007
- [13] Digital Video Broadcasting (DVB), Web site, www.dvb.org, 2007
- [14] Bluetooth, www.bluetooth.com, 2007
- [15] ZigBee Alliance, www.zigbee.org, 2007
- [16] A. Jamalipour, T. Wada, T. Yamazato "A tutorial on multiple access technologies for beyond 3G mobile networks", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 43, no 2, Feb. 2005, pp. 110-117.
- [17] Wireless World Research Forum (WWRF), www.wireless-world-research.org, 2007.

- [18] FP6/IST project E2R (End-to-End Reconfigurability), www.e2r.motlabs.com, 2007.
- [19] P.Demestichas, G.Vivier, K.El-Khazen, M.Theologou, "Evolution in wireless systems management concepts: from composite radio to reconfigurability", *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 42, No. 5, pp. 90-98, May 2004.
- [20] J. Mitola III, G. Maguire Jr. "Cognitive radio: making software radios more personal", *IEEE Personal Commun.*, Vol. 6, No 4 , pp13 -18, August 1999.
- [21] R.W.Thomas, L.A. DaSilva, A.B. MacKenzie, "Cognitive Networks", IEEE DySPAN 2005, First Symposium on Dynamic Access Networks, Baltimore USA, 8-11 November 2005.
- [22] M. A. L. Thathachar and P. S. Sastry, *Networks of Learning Automata*, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [23] Wireless World Research Forum (WWRF), Working Group (WG) 6: Reconfigurability, White Paper, "Scenarios, System Requirements and Roadmaps for Reconfigurability", 2004.
- [24] P. Demestichas, V. Stavroulaki, « Issues in introducing Resource Brokerage Functionality in B3G Composite Radio Environments », *IEEE Wireless Communications Magazine*, vol. 11, No.10, October 2004.
- [25] Software Defined Radio (SDR) Forum website, <http://www.sdrforum.org> , 2006.
- [26] The International Telecommunications Union (ITU) Web Site, <http://www.itu.int>, 2006.
- [27] ERC, "European table of frequency allocations and utilizations frequency range 9 kHz to 275 GHz," ERC Report 25, January 2002.
- [28] Hellenic Telecommunications & Post Commission (EETT) Web Site, <http://www.eett.gr>, 2006.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ

2. **ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ RECONFIGURABLE ΚΑΙ COGNITIVE ΔΙΚΤΥΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

Περίληψη:

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η γενική μορφή της αρχιτεκτονικής που προτείνεται στα πλαίσια της διατριβής για συστήματα διαχείρισης δικτύων B3G. Έμφαση δίνεται στις μεθόδους διαχείρισης reconfigurable δικτύων και στη δυνατότητα ενσωμάτωσης του στοιχείου της γνώσης, που οδηγεί στη δημιουργία cognitive συστημάτων. Τμήμα του κεφαλαίου έχει δημοσιευτεί στα άρθρα [1],[9].

2.1 Γενικά περί αρχιτεκτονικής συστημάτων διαχείρισης B3G συστημάτων

Όπως ήδη αναφέρθηκε, προκειμένου τα συστήματα B3G να εισέλθουν επιτυχώς στον εμπορικό κόσμο, απαιτείται η μελέτη πολλών συναφών παραγόντων που θα καθορίσουν την εξελικτική τους πορεία. Μάλιστα, η γενικότερη συλλειτουργία διαφορετικών τεχνολογιών και η σύγκλιση των τηλεπικοινωνιών και του διαδικτύου, επιβάλλουν τη συμμόρφωση με έννοιες όπως η απλή και ταυτόχρονα πολυδιάστατη λειτουργία αλγορίθμων και μηχανισμών, που θα δύνανται να ανανεώνονται συνεχώς, ενσωματώνοντας καινοτόμα συστατικά.

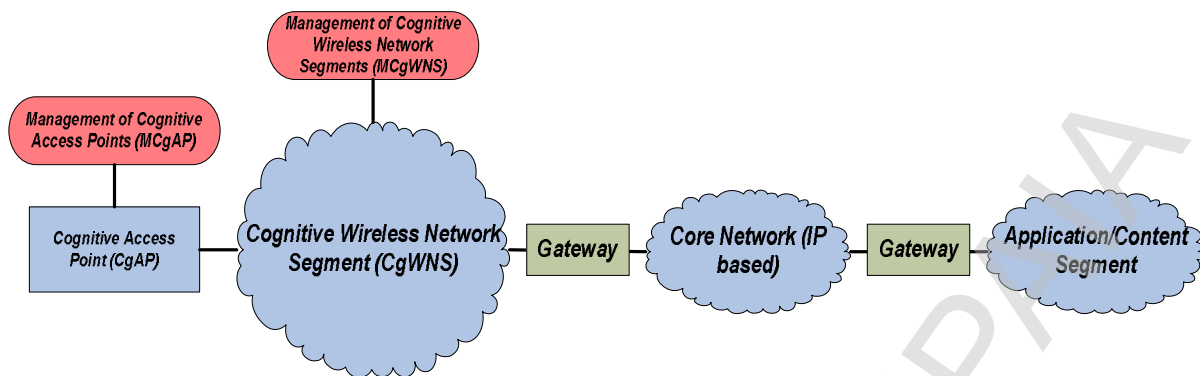
Επικεντρώνοντας την προσοχή μας στη διαχείριση των πόρων (συμπεριλαμβανομένου του απαιτούμενου φάσματος), απαραίτητη θεωρείται η ανάπτυξη ευφυών μεθόδων που θα βελτιστοποιούν τη χρήση τους επιτυχώς, ταχέως και με διαφάνεια. Οι μέθοδοι αυτές χρήζουν συνεχούς αναθεώρησης - βελτιστοποίησης, καθότι πρέπει να ανταποκρίνονται στις χωροχρονικές μεταβολές της κίνησης [2][3], ούσες προσαρμοσμένες (κομμένες και ραμμένες) στις εκάστοτε ανάγκες του υπό εξέταση τμήματος δικτύου και συνεπώς και του τελικού χρήστη. Αυτή η έννοια της «συνεχούς βελτιστοποίησης» συνιστά και την πεμπουσία της διαφοροποίησης του οράματος B3G από τις συμβατικές – σημερινές τεχνολογίες, αν αναλογιστούμε ότι τα περισσότερα δίκτυα σήμερα που λειτουργούν με συγκεκριμένες τεχνολογίες, έχουν σχεδιαστεί εκ των προτέρων με τρόπο στατικό, ώστε να καλύπτουν τις πιθανότερες ανάγκες που αναμένεται να παρουσιάσει η κίνηση ανά περιοχή και ανά χρονική περίοδο.

Αντίθετα, οι διεθνείς τάσεις σήμερα επιβάλλουν τον καθορισμό των παραμέτρων λειτουργίας των δικτύων με μεγαλύτερη ευελιξία, ώστε να επιτευχθεί στην πράξη η «προσαρμοστικότητα» που χαρακτηρίζει τα δυναμικά αναδιαρθρούμενα και γνωσιακά δίκτυα. Αυτό τελικά αναμένεται να βοηθήσει σημαντικά στη μείωση των ανεπαρειών που παρουσιάζει κάθε τεχνολογία χωριστά και άρα στην αποτελεσματικότερη ικανοποίηση των αναγκών του χρήστη.

Εστιάζοντας το ενδιαφέρον μας στα cognitive δίκτυα, που θα αποτελέσουν και τη ραχοκοκαλιά της διατριβής, εύλογα σε αυτό το σημείο θα ετίθετο το ερώτημα:

«Σε ποιά επίπεδα ενός cognitive δικτύου δύνανται (και επιβάλλεται) να εφαρμοστεί μία μέθοδος διαχείρισης των πόρων»;

Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα απεικονίζεται γραφικά στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2-1: Περιπτώσεις εφαρμογής αλγορίθμων διαχείρισης πόρων σε cognitive δίκτυα

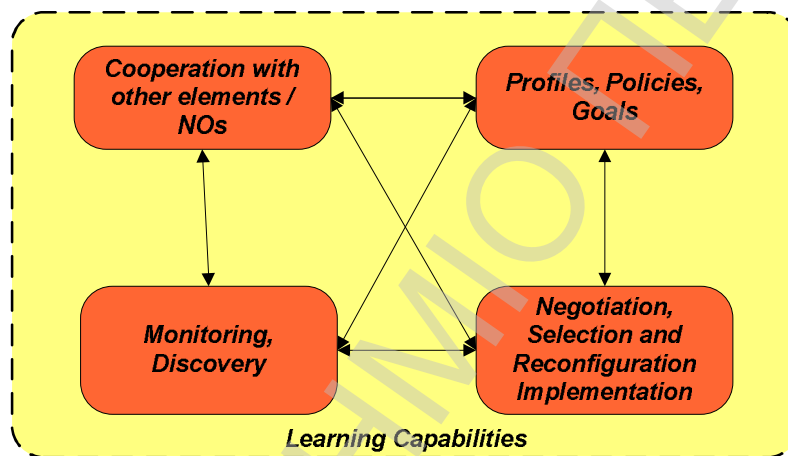
Ένα cognitive δίκτυο απαρτίζεται από πολυάριθμα τερματικά και στοιχεία δικτύου, διάσπαρμένα ποικιλοτρόπως και με τρόπο χρονικά μεταβαλλόμενο, τα οποία πρέπει να αποτελέσουν αντικείμενο διαχείρισης. Ως εκ τούτου, οποιαδήποτε συγκεντρωτική απόπειρα διαχείρισης (centralized) θα αποδειχθεί εξαιρετικά πολύπλοκη και άρα τελικά αναποτελεσματική. Αντιθέτως, διεθνείς ερευνητικές προσπάθειες κατευθύνονται προς λύσεις περισσότερο (ή λιγότερο) κατανεμημένες, όπως ακόμα και η αυτόνομη υπολογιστική (autonomic computing) [7][8]. Η αυτόνομη υπολογιστική προέρχεται από το ανθρώπινο νευρικό σύστημα. Όπως το νευρικό σύστημα επιτελεί αυτόβουλες ενέργειες (πχ. κυκλοφορία αίματος) ώστε να απελευθερώσει τον εγκέφαλο να ασχοληθεί με άλλες ενέργειες, έτσι και τα συστήματα αυτόνομης υπολογιστικής επιτελούν αυτοβούλως λειτουργίες που προηγουμένως απαιτούσαν σημαντική επέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα (πχ. Η αναδιάρθρωση μιας συσκευής) και στόχο έχουν τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός δικτύου ή μιας συσκευής.

Σε γενικές γραμμές λοιπόν, μόνο τέτοιες κατανεμημένες προσεγγίσεις μπορούν να εγγυηθούν τον απαιτούμενο βαθμό δυνατότητας κλιμάκωσής τους αναλόγως των αναγκών (δηλαδή να πραγματοποιηθούν με τρόπο περισσότερο ή λιγότερο κατανεμημένο – scalability and modularity), ώστε να ελαττωθεί η τελική πολυπλοκότητα.

Με αυτή τη λογική, οι αλγόριθμοι διαχείρισης πόρων σε cognitive δίκτυα μπορούν να ταξινομηθούν ιεραρχικά σε 2 συνεργαζόμενες βαθμίδες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-1 και εξηγείται κατωτέρω. Οι μηχανισμοί που υπάγονται στη βαθμίδα ελέγχου ενός ολόκληρου τμήματος του δικτύου (cognitive wireless network segment - CgWNS) έχουν ως πρωτεύοντα στόχο τους να συντονίζονται με το δίκτυο-κορμό, καθώς και να συντονίζουν – κατευθύνουν

τις αποφάσεις των μηχανισμών που υπάγονται στη βαθμίδα ελέγχου ενός στοιχείου δικτύου, που δύναται να είναι σημείο πρόσβασης (cognitive access point - CgAP), σταθμός βάσης, ή οποιοδήποτε άλλο στοιχείο δικτύου. Σημειώνουμε και πάλι εδώ τη λογική που ακολουθούμε της ύπαρξης πολυαριθμών στοιχείων δικτύου σε ένα ολόκληρο τμήμα δικτύου. Τέλος, δε θα πρέπει να παραλείψουμε και την ύπαρξη μηχανισμών που ελέγχουν τερματικά, οι οποίοι ωστόσο δε θα απασχολήσουν το υπόλοιπο της διατριβής.

Αν απομονώσουμε μια βαθμίδα, πχ τη βαθμίδα ελέγχου ενός CgAP, θα δούμε ότι αυτή αποτελείται από πλήθος συνεργαζόμενων μεταξύ τους αλγορίθμων, όπως θα αναλυθεί κατωτέρω. Η εσωτερική της μορφή θα μπορούσε να είναι η ακόλουθη (Σχήμα 2-2):



Σχήμα 2-2: Αναπαράσταση της εσωτερικής μορφής μιας βαθμίδας του συστήματος διαχείρισης γνωσιακών δικτύων

- Η οντότητα “Monitoring - Discovery” συνεχώς ερευνά το περιβάλλον ώστε να ανακαλύψει/μετρήσει τη ζήτηση, καθώς επίσης και για να διαπιστώσει ποιες είναι οι ικανότητες που διαθέτει κάθε πιθανή διάρθρωση του δικτύου.
- Η οντότητα “Cooperation with other elements/NOs” επικοινωνεί με άλλα στοιχεία δικτύου / παρόχους, ώστε να αποκτήσει πληροφορίες για την πολιτική τους, για τυχόν προσφορές τους κ.ο.κ.
- Η οντότητα “Profiles, Policies, Goals” παρέχει πληροφορίες για τις απαιτήσεις και τα προφίλ των χρηστών, των εφαρμογών και του υπό εξέταση στοιχείου δικτύου, καθώς και τις πολιτικές και στρατηγικές του παρόχου.

- Τέλος, η οντότητα “Negotiation, Selection and Reconfiguration Implementation” αποφασίζει και επιτελεί τις απαραίτητες λειτουργίες για την αναδιάρθρωση, βάσει των προφίλ, των πολιτικών και των ενσωματωμένων ικανοτήτων μάθησης (learning capabilities).

Διατηρώντας την προσοχή μας επικεντρωμένη σε κάθε βαθμίδα χωριστά, υποθέτουμε ότι αυτή αποτελείται από πλήθος αλγορίθμων, συνεργαζόμενων μεταξύ τους. Σε πλήρη ευθυγράμμιση με τα ανωτέρω, παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο μια αρχιτεκτονική λειτουργίας (Functional Architecture – FA) των διαφόρων αλγορίθμων διαχείρισης πόρων (συμπεριλαμβανομένου του φάσματος) που μελετώνται στα πλαίσια της επερχόμενης νέας γενιάς δικτύων επικοινωνιών [1]. Η έννοια της αρχιτεκτονικής αυτής είναι να περιγράψει πώς συλλειτουργούν οι διάφοροι αλγόριθμοι που σχετίζονται με τη διαχείριση των πόρων σε δυναμικά αναδιαρθρούμενα και γνωσιακά δίκτυα.

Συγκεκριμένα, είτε αναφερόμαστε στη βαθμίδα ελέγχου ενός cognitive δικτύου που διαχειρίζεται τα CgAPs, ήτοι στη μέθοδο Self-Management of Cognitive Access Points (SMCgAP), είτε στη Self-Management of Cognitive Wireless Networks Segments (SMCgWNS), προτείνεται η ομαδοποίηση των τεχνικών (αλγορίθμων) βελτιστοποίησης σε 3 ευρείες οικογένειες, ήτοι:

- τη «Δυναμική Σχεδίαση και Διαχείριση Δικτύου» (Dynamic Network Planning and Management – DNPM)
- την «Εξελιγμένη Διαχείριση Φάσματος» (Advanced Spectrum Management – ASM)
- την «Από Κοινού Διαχείριση των Πόρων» (Joint Radio Resource Management – JRRM)

Ο στόχος της αρχιτεκτονικής λειτουργίας αυτής είναι να αποτελέσει ένα σημαντικό βήμα προς έναν απο κοινού καθορισμό του τρόπου διαχείρισης πόρων σε μελλοντικά (και παρόντα) συστήματα επικοινωνιών.

Παρακάτω εισάγονται συνοπτικά τα συστατικά στοιχεία μιας τέτοιας αρχιτεκτονικής, δηλαδή οι οικογένειες αλγορίθμων DNPM, ASM και τέλος JRRM. Επίσης επεξηγείται ο τρόπος συνεργασίας των εν λόγω οικογενειών, ενώ έμφαση δίνεται στη συνέχεια της διατριβής στην οικογένεια DNPM, η οποία και αναλύεται διεξοδικά.

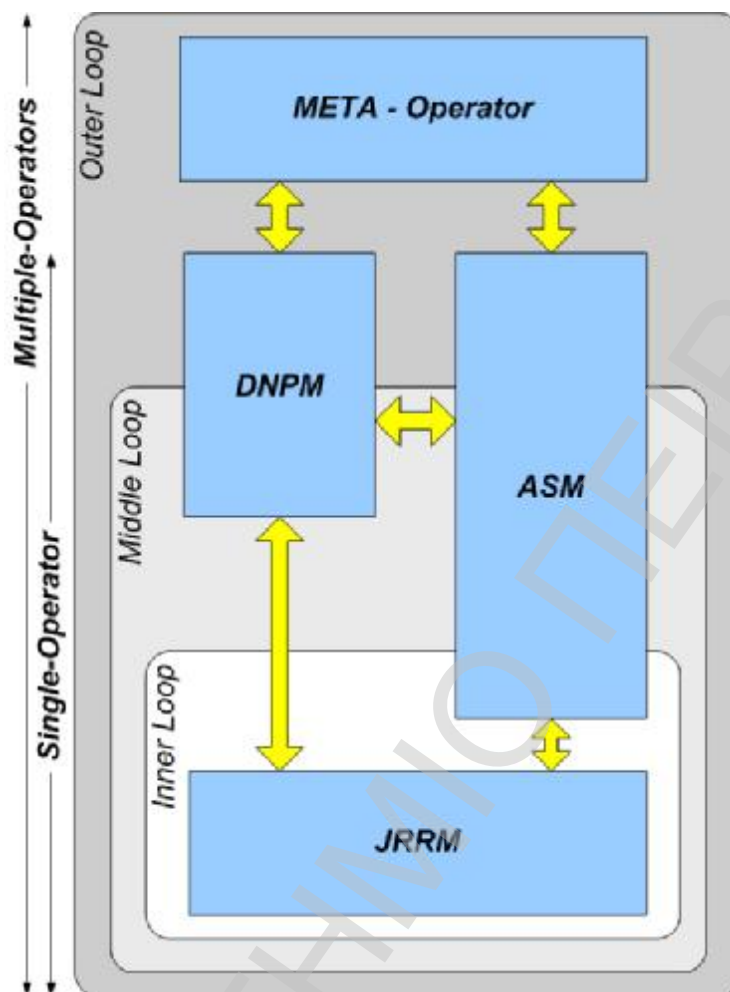
2.2 Αρχιτεκτονική Λειτουργίας Αλγορίθμων Διαχείρισης Πόρων (Functional Architecture)

Κοινό τόπο αποτελεί το ότι η συμπαρουσία διαφορετικής φύσης τεχνολογιών, των οποίων επιζητούμε τη συνεργασία, απαιτεί ευφυείς μεθόδους για την αποτελεσματική διαχείριση των διαθέσιμων πόρων. Μάλιστα, οι NOs δείχνουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον προς αυτή την κατεύθυνση, δεδομένου ότι συνδέεται άμεσα με το πώς αυτοί εκμεταλλεύονται το διαθέσιμο φάσμα τους, για την αγορά του οποίου έχουν επενδύσει τεράστια ποσά. Συγκεκριμένα, αναφορικά με το φάσμα, απαιτούνται περισσότερο ευέλικτες πολιτικές από τις ρυθμιστικές αρχές, ώστε να απλοποιηθεί η διαχείριση αδειοδοτούμενου (licensed) και μη αδειοδοτούμενου (unlicensed) φάσματος και να υποστηρίξει πλέον συνεργασίες και αλλαγές στη χρήση του. Σήμερα ήδη παρατηρείται και κάποια πρόοδος προς αυτή την κατεύθυνση [5]. Προκλήσεις βέβαια δεν υπάρχουν μόνο για τις ρυθμιστικές αρχές, αλλά και για όλους τους εμπλεκόμενους φορείς στην εισαγωγή της νέας γενιάς δικτύων, όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 1.4.

Το γενικό πλαίσιο της αρχιτεκτονικής των αλγορίθμων διαχείρισης πόρων που παρουσιάζεται εδώ απευθύνεται κυρίως στις ανάγκες βελτιστοποίησης που αναφέρονται σε ένα σύνθετο περιβάλλον, σαν το προδιαγεγραμμένο. Οι ομάδες αλγορίθμων που λειτουργούν σε ένα τέτοιο πλαίσιο είναι όπως αναφέρθηκε (α) η δυναμική σχεδίαση και διαχείριση τμημάτων δικτύου με δυνατότητα δυναμικής αναδιάρθρωσης (DNPM), (β) οι εξελιγμένες μέθοδοι δυναμικής διαχείρισης / ανάθεσης φάσματος (ASM) και (γ) η ταυτόχρονη για πολλά RATs διαχείριση των πόρων (JRMM). Οι ανωτέρω ομάδες αλγορίθμων (μηχανισμοί) συνεργάζονται διαμέσου ανταλλαγής πληροφοριών.

Για το σκοπό αυτό, προτείνεται μια μορφή αρχιτεκτονικής της λειτουργίας τους, όπως αυτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-3.

Καθένας μηχανισμός από τους διαφαινόμενους επιτελεί λειτουργίες που εξαρτώνται από το διαθέσιμο φάσμα, τη ζήτηση, τη χρονική στιγμή και τη γεωγραφική κλίμακα. Με αυτό το σκεπτικό, η αρχιτεκτονική χωρίζεται σε 3 βρόχους: τον εσωτερικό (inner loop), το μεσαίο (middle loop) και τον εξωτερικό (outer loop). Οι βρόχοι αυτοί σχετίζονται με τη λειτουργία των μηχανισμών DNPM, ASM και JRMM. Συγκεκριμένα, οι ASM και JRMM λειτουργούν σε πολύ μικρή και μικρή χρονική κλίμακα, για μικρές (ως προς ένα χρήστη), τοπικές (επίπεδο στοιχείου δικτύου - κυψέλης) και μεσαίες (επίπεδο ενός τμήματος δικτύου - συνόλου κυψελών) γεωγραφικές περιοχές.



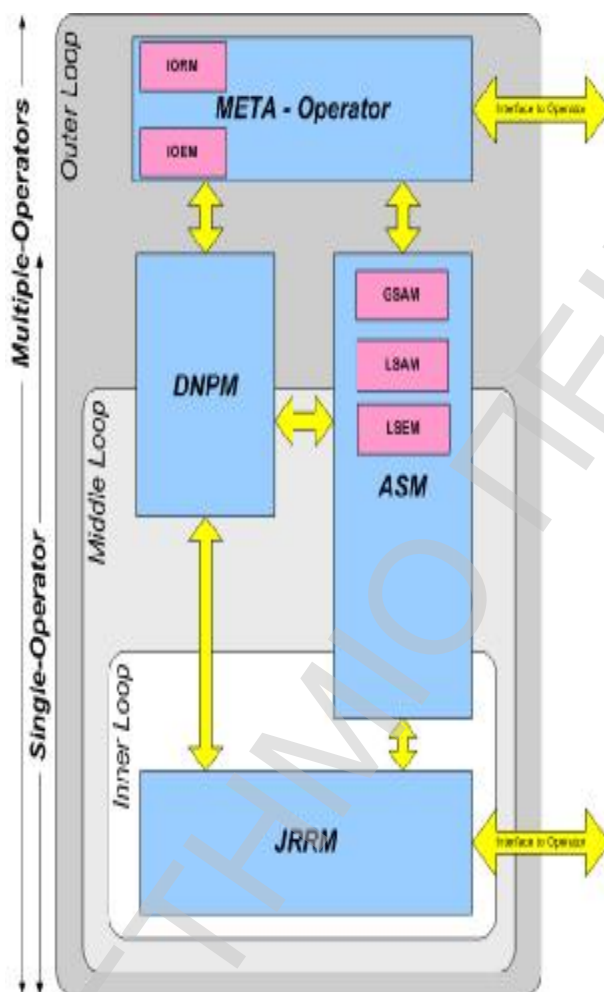
Σχήμα 2-3: Γενική εικόνα αρχιτεκτονικής λειτουργίας αλγορίθμων διαχείρισης πόρων

Αυτές λοιπόν οι λειτουργίες εξυπηρετούνται κάλλιστα από τον εσωτερικό και το μεσαίο βρόχο. Αντίστοιχα, ο μηχανισμός DNPM σχετίζεται με τη μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη διαχείριση πόρων σε διάφορα RATs, οπότε και τοποθετείται στο μεσαίο και στον εξωτερικό βρόχο.

Το μοντέλο αυτής της αρχιτεκτονικής, το οποίο περιγράφεται και στα [6],[9], μπορεί να αναλυθεί περαιτέρω, ιδωμένο από μια οπτική γωνιά περισσότερο λεπτομερή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-4. Η λειτουργία της περιγράφεται ευθύς αμέσως σε γενικές γραμμές, προκειμένου να γίνει κατανοητή η συνεργασία μεταξύ των διαφόρων οικογενειών αλγορίθμων και κατόπιν να δοθεί έμφαση στο DNPM.

Στον εξωτερικό βρόχο, ο μηχανισμός DNPM σχεδιάζει και διαχειρίζεται το δίκτυο και πληροφορεί τον NO σχετικά με τους απαιτούμενους πόρους που πηγάζουν από τη ζήτηση.

Στην πληροφορία αυτή συμπεριλαμβάνεται και το αναγκαίο φάσμα που εκτιμάται ότι χρειάζεται, οπότε και απαιτείται ανταλλαγή πληροφορίας με το μηχανισμό ASM.



Σχήμα 2-4: Αναλυτική προσέγγιση αρχιτεκτονικής λειτουργίας αλγορίθμων

Επιπλέον, λόγω του ότι οι NOs διαθέτουν και επιχειρηματικά ενδιαφέροντα και όχι μόνο τεχνικά, η οντότητα (βλέπε Σχήμα 2-4) Inter Operator Economic Manager (IOEM) που ανήκει στον «μετα-πάροχο» (ο οποίος αντιστοιχεί σε ένα σύνολο παρόχων ή / και στη ρυθμιστική αρχή), αποφασίζει για τον τρόπο διαπραγμάτευσης του φάσματος (πράγμα που εξαρτάται από την αναμενόμενη κίνηση και το τι λέει ο DNPM) και συμβουλεύει αντίστοιχα την οντότητα Inter Operator Resource Manager (IORM). Ο μηχανισμός Global Spectrum Allocation Manager (GSAM) υπολογίζει τα πιθανά αποτελέσματα της χρήσης του φάσματος που έχει αποφασιστεί και τέλος όλα τα ανωτέρω ως προς το αναγκαίο φάσμα χρησιμοποιούνται από το DNPM για την κατανομή του φάσματος στα διάφορα διαθέσιμα

RATs. Η διαδικασία αυτή προσφέρει μακροπρόθεσμες αναθέσεις φάσματος, ωστόσο βασίζεται σε αλληλεπιδράσεις και σε λήψη πληροφορίας από το μεσαίο βρόχο.

Στο μεσαίο βρόχο, η οντότητα Local Spectrum Economic Manager (LSEM) υπολογίζει τα πιθανά οφέλη (για τον NO) που θα προκύψουν από την εμπόρευση του φάσματος κάθε σταθμού βάσης με στόχο τη χρήση του από τους τελικούς χρήστες και εφαρμόζοντας κατάλληλη τιμολογιακή πολιτική. Βάσει των αποτελεσμάτων των υπολογισμών αυτών (αναμενόμενα κέρδη), η οντότητα Local Spectrum Allocation Management (LSAM) αναθέτει σε κάθε χρήστη την κατάλληλη ποσότητα φάσματος.

Τέλος, ο μηχανισμός JRRM δρα ταχέως στον εσωτερικό βρόχο, ανταποκρινόμενος στις συνεχείς αλλαγές του φορτίου (ζήτησης). Έτσι, πολλές φορές η λειτουργία του JRRM οδηγεί σε αναθεωρήσεις των αποφάσεων που έχουν ληφθεί σε πιο εξωτερικούς βρόχους, χωρίς βέβαια αυτές να αναιρούνται. Αντίθετα, στόχο έχουν πάντα τη βελτιστοποίηση τόσο της χρήσης του φάσματος όσο και τελικά των παρεχομένων υπηρεσιών.

Η επόμενη παράγραφος (2.3) περιγράφει κάποια επιχειρησιακά μοντέλα που σκοπό έχουν να καταδείξουν την ανάγκη χρησιμοποίησης πολλαπλών μηχανισμών για τη διαχείριση των πόρων σε ένα δίκτυο και τα ταξινομεί στο πεδίο του χρόνου, ως προς τη χρήση τους.

Σημειωτέον δε και πάλι ότι στα πλαίσια της διατριβής θα επικεντρώσουμε την προσοχή μας στους μηχανισμούς που βρίσκονται υπό τη σκέπη της οικογένειας DNPM. Έτσι, η παράγραφος (2.4) παραθέτει μια γενική άποψη της DNPM και του τρόπου με τον οποίο διαλειτουργούν οι διάφοροι αλγόριθμοι διαχείρισης DNPM σε ένα B3G (cognitive) δίκτυο.

2.3 Επιχειρησιακά μοντέλα και ταξινόμηση στα πεδία του χρόνου

Η βελτιστοποίηση της χρήσης των πόρων σε ένα cognitive τμήμα δικτύου συνιστά μια διαδικασία τόσο τεχνική όσο και οικονομική. Με αυτό το σκεπτικό κρίνεται σκόπιμη η υιοθέτηση μιας σειράς από επιχειρησιακά (οικονομικά) μοντέλα για την αρχιτεκτονική λειτουργίας των μηχανισμών διαχείρισης. Τα μοντέλα αυτά θεωρούν τους πόρους σαν εμπορεύσιμο αγαθό και εφαρμόζονται όταν οι πόροι διαμοιράζονται στους χρήστες τους. Σε γενικές γραμμές θεωρούμε 2 σύνολα από μοντέλα αναφορικά με τις οντότητες που αλληλεπιδρούν σε αυτά, ήτοι (α) χρήστης με NO και (β) NO με NO.

Χρήστης με NO: οι διάφορες λειτουργίες επιτελούνται μεταξύ ενός χρήστη και ενός ή περισσότερων σταθμών βάσης (base station – BS) ή σημείων πρόσβασης (Access Point -

AP), δηλαδή μεταξύ ενός χρήστη και μιας ή περισσότερων κυψελών. Κάθε χρήστης διαπραγματεύεται απευθείας με το BS/AP. Το BS/AP επομένως καθίσταται υπεύθυνο για την παροχή των πόρων στους χρήστες με τους οποίους θα καταλήξει σε συμφωνία.

NO με NO: οι διάφορες λειτουργίες επιτελούνται μεταξύ 2 NOs που μοιράζονται τους διαθέσιμους πόρους τους υπό μορφή συνεργασίας. Συγκεκριμένα θεωρούμε προς τούτο 2 υποπεριπτώσεις:

- NO με NO μέσω μετα-παρόχου (meta-operator - MOP): ο MOP είναι υπεύθυνος για τη συγκέντρωση των πόρων όλων των συνεργαζόμενων παρόχων καθώς επίσης και των οικονομικών προσφορών τους και ακόμα για την τελική κατανομή των πόρων στους παρόχους.
- NO με NO σε peer to peer: οι διαπραγματεύσεις για την κατανομή των πόρων πραγματοποιούνται απευθείας μεταξύ παρόχων, χωρίς κάποιο διαμεσολαβητή (MOP).

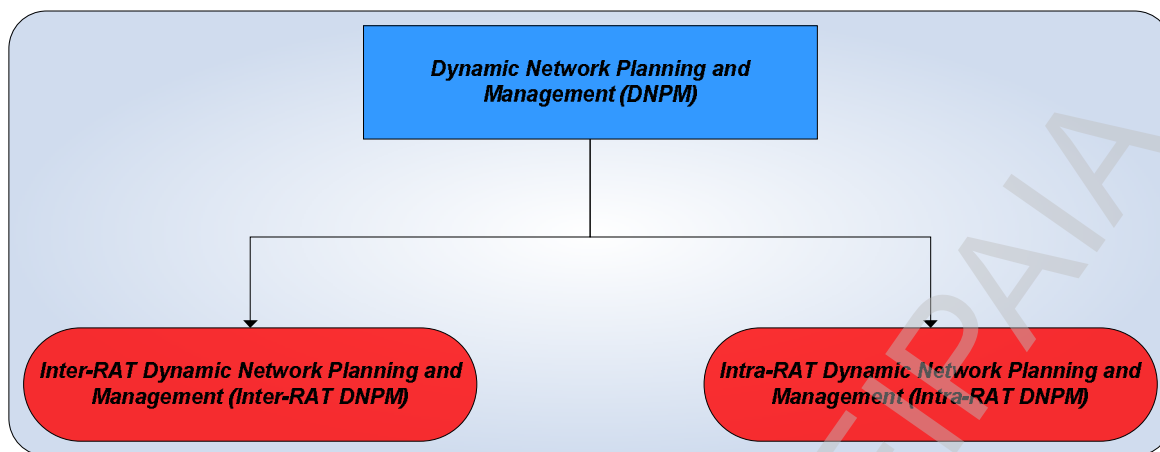
2.4 Η οικογένεια αλγορίθμων διαχείρισης DNPM

2.4.1 Γενική παρουσίαση

Η παράγραφος αυτή παρουσιάζει, σε γενικές γραμμές, το σύνολο των αλγορίθμων που περιλαμβάνει η οικογένεια DNPM, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο αυτοί συνεργάζονται. Ορισμένοι από τους εν λόγω αλγορίθμους θα αποτελέσουν και σημεία-κλειδιά της παρούσας εργασίας και θα αναλυθούν διεξοδικά εν συνεχεία.

Στην παράγραφο 1.5.1 προτάθηκε η διαίρεση της μεθόδου διαχείρισης πόρων σε οποιοδήποτε B3G σύστημα σε (α) μια οικογένεια αλγορίθμων που καλείται inter-RAT και λειτουργεί σε υψηλό επίπεδο, διαχειριζόμενη τους πόρους πολλών τεχνολογιών ταυτόχρονα και (β) την intra-RAT οικογένεια, η οποία απασχολείται με τα τεκταινόμενα μόνο εντός μίας συγκεκριμένης τεχνολογίας. Τα παραπάνω φαίνονται στην περίπτωση της οικογένειας DNPM και στο Σχήμα 2-5.

Σημειώνουμε ότι όχι μόνο δεν αποκλείεται η ταυτόχρονη λειτουργία αλγορίθμων και των 2 τύπων, εντός ενός συστήματος DNPM, αλλά αυτή είναι και η συνηθέστερη περίπτωση. Με άλλα λόγια, η ταυτόχρονη λειτουργία του Inter-RAT DNPM με το Intra-RAT DNPM διευκολύνει την επίτευξη των όποιων στόχων έχουν τεθεί από τον NO.

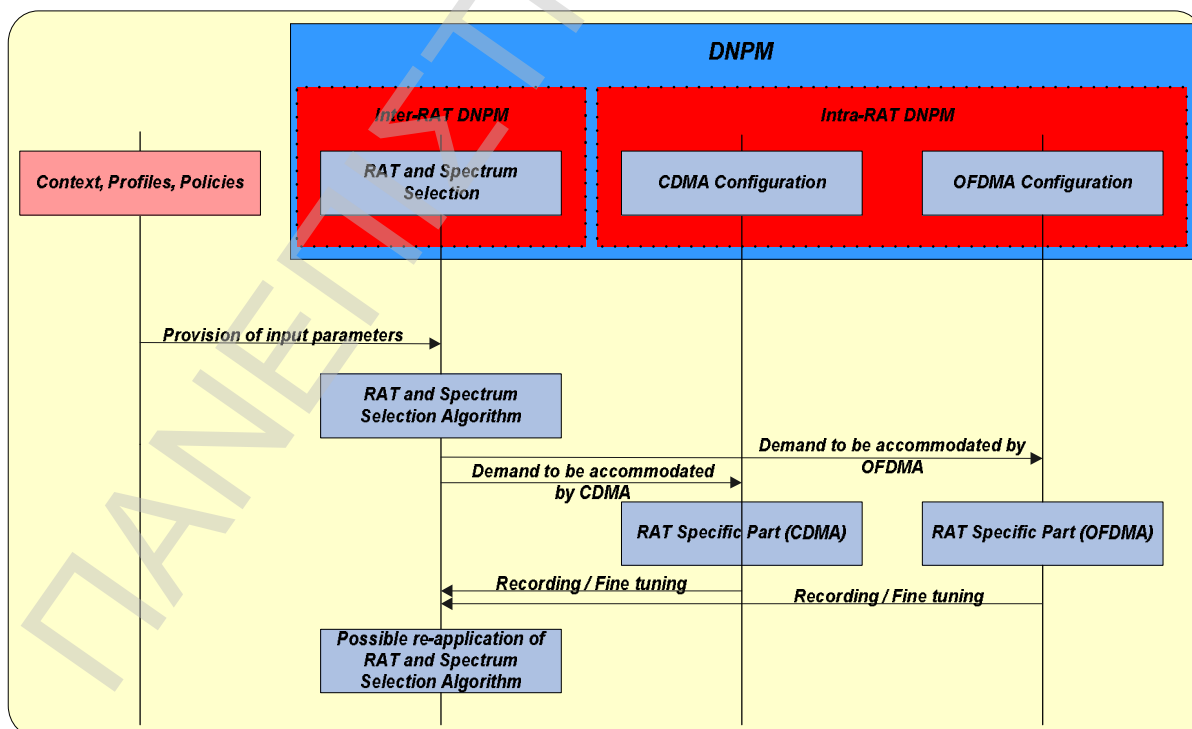


Σχήμα 2-5: Διάσπαση DNPM

Σημειώνουμε δε και πάλι ότι ο πάροχος είτε έχει στη διάθεσή του ένα σύστημα MCgAP είτε ένα σύστημα MCgWNS (τμήμα των οποίων αποτελεί το DNPM).

2.4.2 Λειτουργία και Αλληλεπίδραση Οντοτήτων DNPM

Ας δούμε τώρα ποιές είναι ακριβώς οι οντότητες που απαρτίζουν το μηχανισμό DNPM (με άλλα λόγια, ποιοί είναι οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται) και πώς αλληλεπιδρούν.



Σχήμα 2-6: Λειτουργία οντοτήτων DNPM

Παρατηρούμε στο Σχήμα 2-5 ότι οι βασικές οντότητες είναι:

- Η οντότητα που είναι υπεύθυνη για την επιλογή τεχνολογίας και φάσματος (RAT and Spectrum Selection), η οποία λειτουργεί (προφανώς) σε επίπεδο inter-RAT.
- Η οντότητα που είναι υπεύθυνη για τη διαχείριση πόρων σε συστήματα CDMA, η οποία ασχολείται μόνο με τα εν λόγω συστήματα (και άρα λειτουργεί σε επίπεδο intra-RAT).
- Η οντότητα που είναι υπεύθυνη για τη διαχείριση πόρων σε συστήματα OFDMA, η οποία ασχολείται επίσης μόνο με τα εν λόγω συστήματα (και άρα λειτουργεί επίσης σε επίπεδο intra-RAT).

Η πρώτη (χρονικά) οντότητα που λειτουργεί είναι αυτή της επιλογής τεχνολογίας και φάσματος (RAT and Spectrum Selection), η οποία αναλαμβάνει την ευθύνη να προσδιορίσει ποιά τεχνολογία (ποιές τεχνολογίες) και ποιά ζώνη φάσματος (ποιές φέρουσες) θα χρησιμοποιηθούν εντός του σημείου πρόσβασης (τμήματος δικτύου), με στόχο τη βέλτιστη εξυπηρέτηση της ζήτησης.

Η ληφθείσα απόφαση μεταβιβάζεται άμεσα στις οντότητες “CDMA Configuration” και “OFDMA Configuration”, οι οποίες πληροφορούνται το ποσοστό της ζήτησης που καλούνται πλέον να εξυπηρετήσουν.

Εν συνεχεία, καθεμιά εκ των 2 αυτών οντοτήτων (“CDMA Configuration” και “OFDMA Configuration”) τρέχει μια διαδικασία η οποία στόχο έχει να βελτιστοποιήσει τη χρήση των αντιστοιχών τεχνολογιών (CDMA ή OFDMA), προσδιορίζοντας την τιμή διαφόρων λειτουργικών παραμέτρων.

Επιπροσθέτως, παρέχει στην οντότητα “RAT and spectrum selection” μια απάντηση σχετικά με το αν η απόφασή της είναι αποδεκτή ή όχι, αναφορικά με τη δυνατότητα βελτιστοποίησης των παραμέτρων CDMA και/ή OFDMA. Αν η εν λόγω απόφαση δεν είναι αποδεκτή, ίσως απαιτείται η επαναλειτουργία των αλγορίθμων που απαρτίζουν την οντότητα “RAT and Spectrum Selection”.

Στα πλαίσια της διατριβής, τα κεφάλαια 3 και 4 αναφέρονται στην οντότητα “RAT and Spectrum Selection” και παρουσιάζουν αναλυτικά τον τρόπο λειτουργίας της και τους στόχους της. Επιπλέον, το κεφάλαιο 5 αναφέρεται στην οντότητα “CDMA Configuration” και στο με ποιά τρόπο τεχνικά επιτυγχάνει τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των εν λόγω συστημάτων. Τέλος, το κεφάλαιο 6 αναφέρεται στην οντότητα

“OFDMA Configuration”, δίνοντας έμφαση στις οικονομικές επιπτώσεις της χρησιμοποίησής της.

2.5 Μελλοντικές Κατευθύνσεις Αρχιτεκτονικής Διαχείρισης Δικτύων – Ο Χαρακτηρισμός “cognitive”

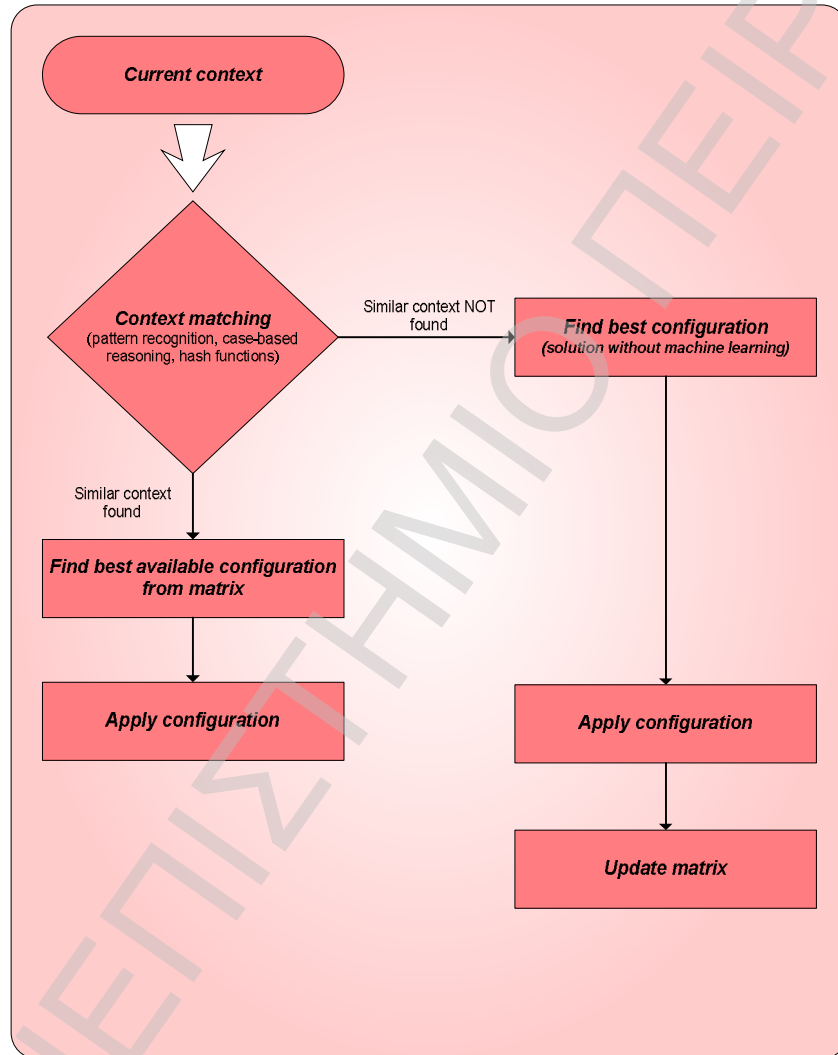
Αναμφίβολα οι αλγόριθμοι διαχείρισης μελλοντικών γενιών δικτύων επικοινωνιών θα ακολουθήσουν μια κατεύθυνση κατά το δυνατόν κατανεμημένης μορφής, η οποία θα πρέπει τόσο να σέβεται τις ιδιομορφίες του κάθε συμμετέχοντος συστήματος (RAT), όσο και να βελτιώνει τη συνύπαρξη και συλλειτουργία όλων. Το επίπεδο του «κατανεμημένου» της μορφής των αλγορίθμων είναι βεβαίως προς εξέταση, υπό την έννοια της μελέτης των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της κάθε μορφής, δηλαδή της πλήρως κατανεμημένης (αυτόνομης) και της λιγότερο κατανεμημένης.

Θυμίζουμε εδώ την ανάλυση που προτάθηκε στο Σχήμα 2-1 σχετικά με τις περιπτώσεις χρήσης των συστημάτων διαχείρισης σε γνωσιακά δίκτυα.

Η βελτιστοποίηση επιτυγχάνεται μέσω της διάθεσης των καταλλήλων πολιτικών στις προαναφερθείσες οντότητες, οι οποίες και καθοδηγούν την αυτόνομη διαχείριση ενός στοιχείου δικτύου, ώστε να ικανοποιηθούν κάποιοι στόχοι που έχουν εξαρχής τεθεί. Ιδανικά οι οντότητες έχουν πλήρη γνώση του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο χρειάζεται να δράσουν, χάρη στα χαρακτηριστικά λειτουργίας αυτών καθαυτών των γνωσιακών δικτύων. Αυτό έχει περιγραφεί και στο Σχήμα 1-4, όπου η διαδικασία πρόσδωσης του χαρακτηρισμού “cognitive” σε ένα δίκτυο αντανakλάται σε ένα βρόχο ανάδρασης, εμπλουτισμένο με τη δυνατότητα μάθησης. Σύμφωνα με το βρόχο αυτό, ένα σύστημα διαχείρισης θα πρέπει να εκμεταλλεύεται λύσεις παρελθόντων προβλημάτων, για να αντιμετωπίσει αποτελεσματικότερα τα μελλοντικά. Για να το επιτύχει αυτό, θα πρέπει να διατηρεί ένα αρχείο του τρόπου με τον οποίο αντιμετωπίστηκαν παρελθόντα προβλήματα και της αποτελεσματικότητας αυτού. Έτσι, θα μπορεί να βρει παρόμοιες λύσεις για το μέλλον. Η συνολική διαδικασία που αντανakλά τα παραπάνω απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 2-7 και αναλύεται κατωτέρω.

Το πρώτο βήμα είναι η ανάγνωση της παρούσας κατάστασης (current context) και του προβλήματος που επιβάλλει κάποιας μορφής «εκ νέου προσαρμογής». Η κατάσταση συγκρίνεται με κάποιες διαθέσιμες καταστάσεις, αρχειοθετημένες στη μορφή ενός πίνακα. Ο

πίνακας περιγράφει την απόδοση των διαφόρων πιθανών διαρθρώσεων του δικτύου (και άρα της συμπεριφοράς του) σε δεδομένες παρελθούσες καταστάσεις. Η όλη διαδικασία σύγκρισης προκειμένου να ευρεθεί μια παρόμοια παρελθούσα κατάσταση και το πώς έχει αυτή αντιμετωπιστεί (context matching), δύναται να βασιστεί σε τεχνικές που διεθνώς είναι γνωστές με τους όρους “case-based reasoning” ή “pattern recognition” και αποτελούν αντικείμενο μελέτης διεθνώς.



Σχήμα 2-7: Διαδικασία μάθησης

Εάν η παρούσα κατάσταση ΔΕΝ περιλαμβάνει στοιχεία που ομοιάζουν με κάποια από παρελθούσες (προβληματικές) καταστάσεις, το δίκτυο πρέπει να αντιμετωπίσει κάποιο πρωτόγνωρο πρόβλημα και άρα δεν μπορεί να βασιστεί σε οποιαδήποτε γνώση από πρότερη εμπειρία. Τρόποι αντιμετώπισης τέτοιων προβλημάτων και άρα μηχανισμοί διαχείρισης θα

προταθούν στη συνέχεια της διατριβής. Τελικά, αφού ευρεθεί (με το ελάχιστο δυνατό κόστος σε πολυπλοκότητα) η βέλτιστη λύση (διάρθρωση του δικτύου προκειμένου να ανταποκριθεί στις συνθήκες), μπορεί να πραγματοποιηθεί η αναδιάρθρωση (reconfiguration implementation). Παράλληλα ενημερώνεται και ο πίνακας με τα στοιχεία του προβλήματος και του τρόπου επίλυσής του (update matrix), ώστε να καταστεί το πρόβλημα εκμεταλλεύσιμο μελλοντικά.

Από την άλλη πλευρά, εάν η παρούσα κατάσταση (ή κάποια παρόμοια με αυτή) έχει αντιμετωπιστεί και στο παρελθόν, η σχετική πληροφορία έχει κρατηθεί και στον προαναφερθέντα πίνακα, μια μορφή του οποίου φαίνεται τώρα στο Σχήμα 2-8.

Configurations Reference Context Situations	Configuration ₁	Configuration ₂	...	Configuration _n
	Context ₁	<i>Performance level-x</i>
Context ₂	<i>Performance level-y</i>
...
Context _n	<i>Performance level-z</i>

Σχήμα 2-8: Πίνακας διατήρησης πληροφοριών

Έτσι, πραγματοποιείται το εν λόγω ταίριασμα των καταστάσεων και το δίκτυο προσαρμόζεται στη νέα κατάσταση εφαρμόζοντας τη λύση που έχει εφαρμοστεί και στο παρελθόν. Πρέπει δε να σημειωθεί ότι η προς επιλογή λύση (διάρθρωση του δικτύου) μπορεί

να μην είναι η βέλτιστη συνολικά από άποψη απόδοσης, λόγω είτε κόστους τη δεδομένη στιγμή και με βάση τη δεδομένη διάρθρωση του δικτύου, είτε αποτυχίας 100% ταιριάσματος μεταξύ των καταστάσεων. Τέλος, η επιλεχθείσα λύση εφαρμόζεται.

Σε γενικές γραμμές, τέτοιες τεχνικές μάθησης βοηθούν το δίκτυο να αποκτά σταδιακά γνώση που το βοηθά να λαμβάνει αποτελεσματικότερες αποφάσεις. Για αυτό το λόγο αναμένεται ότι θα ενταθεί η μελέτη πάνω σε αυτές και ότι θα βελτιωθούν σημαντικά. Στα επόμενα κεφάλαια θα δοθεί έμφαση στην πληροφορία γενικά που δύναται να διατηρεί ένα σύστημα διαχείρισης που θα το βοηθήσει στο να προσαρμόζεται σε αναφαινόμενα προβλήματα. □

□ □ □ □ □ □ □□□□□□□□□□□□□□ □ □ □ □

2.6 Βιβλιογραφία

- [1] G.Dimitrakopoulos, K.Moessner, C.Kloeck, D.Grandblaise, Sophie Gault, O.Sallent, K.Tsagkaris, P. Demestichas, "Adaptive Resource Management Platform for Reconfigurable Networks", ACM/Springer Mobile Networks and Applications journal, Vol. 11, N° 6, December 2006, pp. 799-811.
- [2] P.Demestichas, G.Dimitrakopoulos, J.Luo, R.Agusti, E.Mohyledin, O.Sallent, D.Grandblaise, R.Pintenet, P.Leaves, K.Moessner, "Radio Resource Management and Network Planning in a Reconfigurability Context", in Proc. 2004 IST Mobile Summit, Lyon June 2004.
- [3] P.Demestichas, T.Dodgson, D.Bourse, G.Dimitrakopoulos, V.Stavroulaki, "Issues in the introduction of Reconfigurability in B3G environments", in Proc. SDR '04 Technical Conference and Product Exposition / 41st General Meeting, Phoenix, USA, November 2004.
- [4] P.Demestichas, G.Dimitrakopoulos, D.Bourse, K.El-Khazen, "Dynamic planning and management of reconfigurable networks", in Proc. 1st IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2005), Baltimore, USA, November 2005.
- [5] Ofcom – "Spectrum Framework Review" <http://www.ofcom.org.uk/consult/condocs/sfr/> - link valid as of December 2005.
- [6] K.Moessner, et al, "Dynamic radio resource allocation strategies and timescales", SDR Forum technical Conference 2005, Anaheim, CA, USA, November 2005.
- [7] J. Strassner, "Autonomic networking – theory and practice", In Proc. 9th IFIP/IEEE International Symposium on Network Management (IM'2005), Nice, France, May 2005.
- [8] J. Kephart, D. Chess, "The vision of autonomic computing", IEEE Computer, Vol. 36, No.1, pp. 41-50, January 2003.
- [9] Moessner K, Leaves P, Grandblaise D, Capar F, Mohyeldin E, Demestichas P, Dimitrakopoulos G, Luo J, Tafazolli R "Reconfiguration Techniques to Enhance Network Efficiency", Frequenz (Journal of Telecommunications), ISSN 0016-1136, vol.58, 5-6/2004, pp.132-135.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ

3. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΑΝΑΔΙΑΡΘΡΩΣΕΩΝ (RAT AND SPECTRUM SELECTION)

Περίληψη

Το παρόν κεφάλαιο εξετάζει τους αλγόριθμους που ανήκουν στην κατηγορία "RAT and Spectrum Selection". Οι αλγόριθμοι αυτοί, εφαρμόζοντας μεθόδους inter-RAT management (όπως περιγράφηκαν), αποσκοπούν στην επιλογή RAT και φάσματος σε ένα τμήμα B3G δικτύου. Τμήματα του κεφαλαίου έχουν δημοσιευτεί στα άρθρα [1][2][3].

3.1 Εισαγωγή

Τα cognitive δίκτυα επικοινωνιών έχουν εισαχθεί στον κόσμο των τηλεπικοινωνιών, όπως έχει αναφερθεί, με στόχο να προσφέρουν σε χρήστες, κατασκευαστές, ΝΟs, παρόχους τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών και παρόχους λογισμικού, τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν /προσφέρουν μια πληθώρα επαναστατικών υπηρεσιών, σε πολύ υψηλές ταχύτητες και με τρόπο οικονομικά συμφέροντα. Αυτό επιτυγχάνεται (όπως έχει περιγραφεί λεπτομερώς στο κεφ.1) με την προσαρμογή των δικτύων στις απαιτήσεις του περιβάλλοντος, με στόχο τη βέλτιστη αντιμετώπιση των επικρατουσών συνθηκών φορτίου. Αυτό το όραμα μάλιστα θα μπορεί να επιτευχθεί σε πολλά ετερογενή (δηλαδή με ταυτόχρονη παρουσία πολλών τεχνολογιών) περιβάλλοντα, κάνοντας χρήση των καταλλήλων συσκευών.

Ωστόσο, τα δίκτυα πρόσβασης μέχρι τούδε σχεδιάζονταν και εγκαθιστούνταν με τρόπο παραδοσιακό, ήτοι σχεδιάζονταν εκ των προτέρων με τρόπο στατικό και αποσκοπούσαν στο να διαθέτουν τη δυνατότητα να εξυπηρετούν τη ζήτηση σε περιόδους μεγάλης κίνησης (rush hours) μέσα στα όρια κάποιας δεδομένης γεωγραφικής περιοχής, οπότε και οι πάροχοι ήταν βέβαιοι για τη δυνατότητα εξυπηρέτησης οποιουδήποτε άλλου (λογικά χαμηλότερου) φορτίου.

Αυτό προφανώς είναι ανεφάρμοστο σε reconfigurable (και cognitive) δίκτυα επικοινωνιών, όπου τα πολλά διαθέσιμα RATs επιβάλλεται να αντιμετωπίζουν διαρκώς μεταβαλλόμενες καταστάσεις φορτίου – κίνησης. Οι απαιτήσεις αυτές καθιστούν αναγκαίο το σχεδιασμό και ανάπτυξη νέων μεθόδων σχεδίασης και διαχείρισης των εν λόγω δικτύων, που να αποστασιοποιούνται από τις μέχρι πρότινος εφαρμοζόμενες μεθόδους, ήτοι να συνδυάζουν ταυτόχρονα τη σχεδίαση και διαχείριση με τρόπο δυναμικό, που να ανταποκρίνεται σε χωροχρονικά πλαίσια στις απαιτήσεις φορτίου. Παράλληλα όμως, είναι θεμιτή η βελτιστοποίηση χρήσης υπαρχόντων τεχνολογιών, εκτός από τη μελέτη για νέες τεχνολογίες.

Με αυτό το σκεπτικό και θέλοντας να εμβαθύνουμε αρχικά στο τμήμα εκείνο των συστημάτων διαχείρισης που είναι ανεξάρτητο των χρησιμοποιούμενων τεχνολογιών (inter-RAT, όπως ονομάστηκε), το παρόν κεφάλαιο ασχολείται με τη στήριξη αποφάσεων για αναδιάρθρωση σε ένα στοιχείο δικτύου (network element), το οποίο λειτουργεί εν παραλλήλω με άλλα στοιχεία. Η εργασία αυτή απαντά σε δύο βασικές τεχνολογικές προκλήσεις:

- Την παροχή εύρωστων (έμπιστων και σταθερών) στρατηγικών μάθησης και προσαρμογής, για την εκ των προτέρων αναγνώριση των δυνατοτήτων (και άρα

επιθερομένων αποτελεσμάτων) κάθε πιθανού τρόπου αναδιάρθρωσης, μέσω μιας μεθόδου πλήρως κατανεμημένης. Η προτεινόμενη μέθοδος λειτουργεί συμπληρωματικά ως προς άλλες σχετικές εργασίες [4],[5], βασιζόμενη σε Bayesian δίκτυα [6], τα οποία συνηθισμένα αποτελούν πολύτιμα εργαλεία για την κατανόηση πιθανοτικών σχέσεων.

- Την παροχή μιας (υπολογιστικά ευφυούς και αποτελεσματικής) λύσης στο πρόβλημα της εκμετάλλευσης των δυνατοτήτων κάθε πιθανής περίπτωσης αναδιάρθρωσης. Ο όρος «δυνατότητες» σχετίζεται με την παροχή των βέλτιστων δυνατών επιπέδων QoS, λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική χωρητικότητα. Μια τέτοια εκμετάλλευση οδηγεί σε κατάταξη των πιθανών αναδιαρθρώσεων ως προς την αποτελεσματικότητά τους και άρα στην επιλογή της καταλληλότερης ανά περίπτωση.

Συγκεκριμένα, αν θυμηθούμε την οικογένεια αλγορίθμων DNPM και τους αλγορίθμους που αυτή περιλαμβάνει, στο παρόν κεφάλαιο θα επικεντρώσουμε στο “RAT and Spectrum Selection” κομμάτι, που στόχο έχει τη λήψη αποφάσεων σχετικά με το βέλτιστο σχήμα αναδιάρθρωσης που δύναται να ανταπεξέλθει καλύτερα στις επιταγές του περιβάλλοντος, κυρίως όσον αφορά την επιλογή RAT και φάσματος προς λειτουργία.

Η προσοχή μας επικεντρώνεται σε μια πλήρως κατανεμημένη εκδοχή του προβλήματος και συγκεκριμένα σε ένα στοιχείο δικτύου, απαιτώντας τις ελάχιστες δυνατές αλληλεπιδράσεις με άλλα στοιχεία δικτύου και συμβάλλοντας έτσι στην πόρευση των B3G υποδομών προς τις αρχές της αυτόνομης υπολογιστικής όπως έχει ήδη αναφερθεί (βλέπε επίσης [7][8][9][10]), με απώτερο στόχο πάντα την προσφορά αφεγάδιαστης συνδεσιμότητας στους χρήστες. Ακόμα, η εργασία αυτή είναι συμπληρωματική ως προς άλλες περιοχές εργασίας, όπως το Software Defined Radio (SDR) [11],[12] και η διαχείριση φάσματος [13], οι οποίες παρέχουν μια σειρά ενισχυτικών και χρήσιμων αποτελεσμάτων για πιθανές αποφάσεις αναδιάρθρωσης.

Σε γενικές γραμμές, το κεφάλαιο ακολουθεί την εξής διάρθρωση:

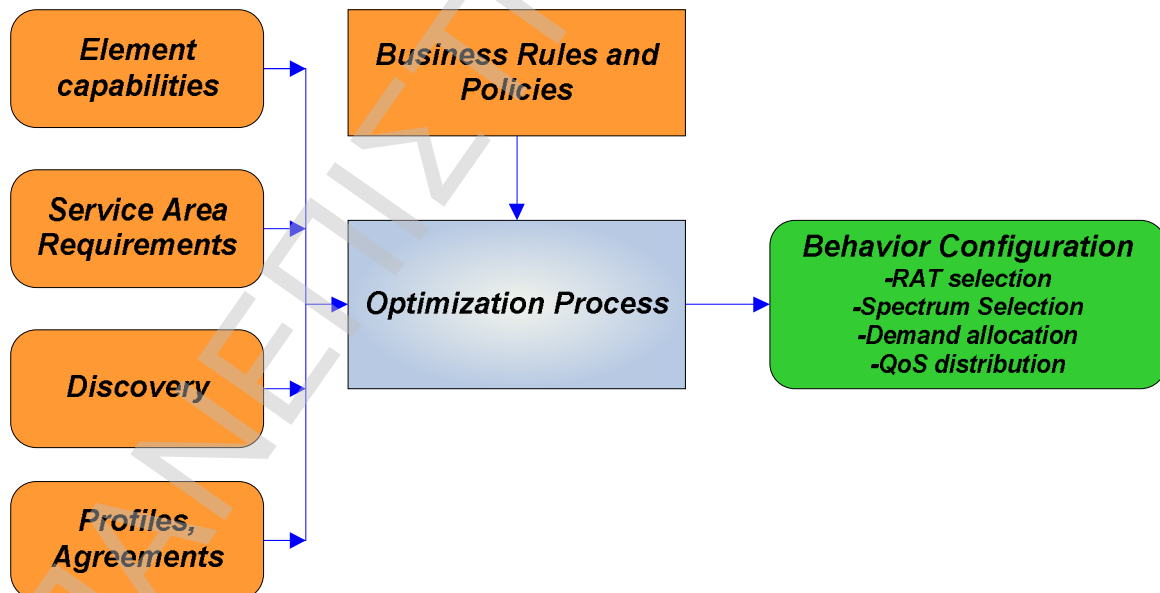
Η επόμενη παράγραφος (3.2) καθορίζει τα γενικά πλαίσια του υπό εξέταση προβλήματος που καλείται να αντιμετωπίσει ο “RAT and Spectrum Selection” αλγόριθμος. Εν συνεχεία, στην παράγραφο 3.3 το γενικό πρόβλημα, αναλύεται διεξοδικά και μοντελοποιείται μαθηματικά. Έτσι, αμέσως μετά παρουσιάζεται σε γενικές γραμμές το τμήμα της λύσης του προβλήματος σχετικά με την εκτίμηση των δυνατοτήτων που προσφέρει κάθε πιθανή αναδιάρθρωση (3.4) και κατόπιν ακολουθεί η παρουσίαση της μεθόδου επίλυσης του προβλήματος. Προς τούτο, θεωρούμε ότι αντικρύζουμε την έννοια της «διάρθρωσης» κάτω από 2 οπτικές γωνίες:

- η πρώτη βλέπει ως διάρθρωση το ζεύγος (RAT, φάσμα) και έτσι διαθέτει μια γενικευμένη μορφή, η οποία είναι εφαρμόσιμη σε τυχούσες τεχνολογίες, σημερινές ή μελλοντικές, ενώ
- η δεύτερη εξετάζει (και επιλέγει) μόνο το RAT ως διάρθρωση του δικτύου και δύναται έτσι περισσότερο εύκολα και ταχέως να εφαρμοστεί σε σημερινές συμβατικές τεχνολογίες, οι οποίες λειτουργούν σε δεδομένες φασματικές περιοχές.

Έτσι, στην παράγραφο (3.5) αναλύεται το βασικό κομμάτι της λύσης σχετικά με την επιλογή των βέλτιστων αναδιάρθρωτικών κινήσεων της γενικευμένης κατηγορίας, ήτοι της επιλογής RAT και φάσματος ταυτόχρονα. Η παράγραφος (3.6), αντίστοιχα, παρουσιάζει αναλυτικά την μέθοδο επίλυσης. Τα προκύπτοντα συμπεράσματα από την ανάλυση περιλαμβάνονται στην παράγραφο (3.7).

3.2 RAT and Spectrum Selection – Γενική Περιγραφή

Η λύση του προβλήματος που καλείται να αντιμετωπίσει ο αλγόριθμος RAT and Spectrum Selection είναι ζωτικής σημασίας για τη λήψη των βέλτιστων δυνατών αποφάσεων αναδιάρθρωσης, σε περιβάλλοντα cognitive δικτύων.



Σχήμα 3-1: Γενική Περιγραφή RAT and Spectrum Selection

Η γενική διάρθρωση του προβλήματος απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 3-1, όπου παρατηρούμε τις δομές δεδομένων του προβλήματος, με έμφαση στην παρουσία της επιχειρησιακής πολιτικής, η οποία χρησιμεύει ως αποφασιστικός παράγοντας, εφόσον πιθανή παραβίασή της απαγορεύει οποιαδήποτε αναδιάρθρωση. Οι επόμενες παράγραφοι περιγράφουν λεπτομερώς τις εισόδους και εξόδους του προβλήματος, καθώς και τη μέθοδο επίλυσής του που προτείνεται στα πλαίσια του παρόντος.

3.3 RAT and Spectrum Selection – Αναλυτική Περιγραφή

3.3.1 Είσοδος του προβλήματος

Η είσοδος του προβλήματος μπορεί να ταξινομηθεί σε 4 κατηγορίες:

- δυνατότητες του υπό εξέταση στοιχείου δικτύου (element capabilities);
- απαιτήσεις της περιοχής εξυπηρέτησης (service area requirements);
- αναγνώριση δυνατοτήτων των επιλογών αναδιάρθρωσης (discovery);
- προφίλ και συμφωνίες (profiles - agreements).

Δυνατότητες στοιχείου δικτύου

Αυτό το τμήμα της εισόδου παρέχει πληροφορίες για τις πιθανές διαρθρώσεις του υπό εξέταση στοιχείου δικτύου. Σε γενικές γραμμές, ένα τυχόν στοιχείο δικτύου, e , με ικανότητα δυναμικής αναδιάρθρωσης, θα διαθέτει ένα σύνολο πομποδεκτών, T_e . Κάθε πομποδέκτης, $t \in T_e$, θα είναι ικανός να λειτουργεί με ένα σύνολο RATs, $R_e(t)$. Επιπλέον, υπάρχει ένα σύνολο φερόντων φάσματος, $F_e(t, r)$, με τα οποία ο πομποδέκτης t δύναται να λειτουργήσει με το RAT r . Εν γένει, για όλους τους $t \in T_e$, $F_e(t, r) \subseteq F_r$, όπου ο όρος F_r δηλώνει το σύνολο των φερόντων φάσματος με τα οποία είναι συμβατή η λειτουργία του RAT r , εξαιτίας περιορισμών, είτε τεχνικών, είτε σχετιζόμενων με τις ρυθμιστικές αρχές φάσματος. Έτσι, κάθε πομποδέκτης t , συνοδεύεται από ένα σύνολο από πιθανές διαρθρώσεις του, $C_e(t)$. Κάθε στοιχείο του συνόλου, $c \in C_e(t)$, είναι ένα άλλο σύνολο (r, f) (στη γενική περίπτωση), όπου $r \in R_e(t)$ και $f \in F_e(t, r)$, όπως περιγράφηκε. Τέλος, η

ένωση των ανωτέρω συνόλων οδηγεί στη δημιουργία των ενοποιημένων συνόλων RATs R_e , φερόντων F_e , και διαρθρώσεων C_e , που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο e .

Απαιτήσεις περιοχής εξυπηρέτησης

Το τμήμα αυτό κάνει χρήση βασικών πληροφοριών παρακολούθησης (monitoring) για την εκτίμηση των απαιτήσεων της κίνησης και της κινητικότητας του φορτίου μέσα στην περιοχή εξυπηρέτησης. Το σύνολο U_e δηλώνει το σύνολο των χρηστών στην περιοχή εξυπηρέτησης του στοιχείου e . Το σύνολο των ζητούμενων υπηρεσιών δηλώνεται ως S_e . Υποτίθεται ότι κάθε χρήστης $u \in U_e$ ζητά κάποια υπηρεσία, $s(u) \in S_e$. Το μοντέλο αυτό καλύπτει και την περίπτωση που κάθε φυσικός χρήστης ζητά περισσότερες της μίας, υπηρεσίες. Σχετικά με την κινητικότητα, υποθέτοντας ότι έχουμε φτάσει σε μία ημι-στατική κατάσταση, μπορούμε να συσχετίσουμε κάθε χρήστη u με μια τοποθεσία $l(u)$, σε ένα υποσύνολο της περιοχής εξυπηρέτησης του στοιχείου e , όπου βρίσκεται ο χρήστης u .

Εκτίμηση δυνατοτήτων επιλογών αναδιάρθρωσης

Αυτό το μέρος της εισόδου εκμεταλλεύεται πληροφορίες (από τη λειτουργία monitoring) για την εκτίμηση των δυνατοτήτων (ως προς το μέγιστο δυνατό ρυθμό μετάδοσης και την ακτίνα κάλυψης) των υποψηφίων διαρθρώσεων. Οι δυνατότητες αυτές μεταβάλλονται χρονικά, εφόσον επηρεάζονται από περιβαλλοντικές αλλαγές και δη από τη συμπεριφορά των παρακειμένων στοιχείων. Όλα τα στοιχεία δρουν με τρόπο πλήρως κατανοημένο (αυτόνομο). Τούτο θέτει μια αξιοσημείωτη πρόκληση: πώς να αυξηθεί ο βαθμός της διασφάλισης ότι η ανάθεση μιας συγκεκριμένης διάρθρωσης, $c = (r, f)$ στον πομποδέκτη t του e , θα καταλήξει σε ένα μέγιστο ρυθμό μετάδοσης (achievable bit rate), $abr_e(c)$, και κάλυψη, $cv_e(c)$, που θα είναι αντίστοιχα, x Mbps και y km. Φαίνεται λοιπόν πως θα πρέπει να υιοθετηθεί ένα πιθανοτικό μοντέλο, για την επίλυση του ακόλουθου προβλήματος:

Δεδομένης μιας υποψήφιας διάρθρωσης $c = (r, f)$, πώς μπορούμε να προβλέψουμε τις πιθανότερες τιμές των τυχαίων μεταβλητών «μέγιστος δυνατός ρυθμός μετάδοσης» και «κάλυψη»:

Η παράγραφος 3.4 επιλύει (συνοπτικά) το πρόβλημα αυτό μέσω μιας εύρωστης στρατηγικής μάθησης που βασίζεται σε Bayesian δίκτυα [6]. Πρέπει δε να σημειωθεί ότι η λύση που θα περιγραφεί δεν παραβιάζει την αυτονομία των στοιχείων δικτύου, εφόσον καμίας μορφής συνεργασία (ανταλλαγή μηνυμάτων) δεν απαιτείται.

Προφίλ - Συμφωνίες

Το τελευταίο τμήμα της εισόδου περιγράφει τα προφίλ (προτιμήσεις, απαιτήσεις, περιορισμούς) των διαφόρων κατηγοριών χρηστών, τις αιτήσεις τους, καθώς επίσης και τις πολιτικές και συμφωνίες του NO. Το σύνολο $Q(s,u)$ εκφράζει τα επιθυμητά επίπεδα QoS στα οποία θα πρέπει να προσφερθεί η υπηρεσία s ($s \in S_e$) στο χρήστη u ($u \in U_e$). Το σύνολο $R(s,u)$ προσδιορίζει το σύνολο των RATs, μέσω των οποίων μπορεί να προσφερθεί η υπηρεσία s στο χρήστη u . Τέλος, η παροχή της υπηρεσίας s , στο επίπεδο QoS q , στο χρήστη u , συσχετίζεται με το βαθμό ικανοποίησής του, που καλείται «χρησιμότητα» [14], [15] $uv(s,q,u)$.

3.3.2 Έξοδος του προβλήματος

Οι αποφάσεις αναδιάρθρωσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε:

- διάρθρωση πομποδέκτη (επιλογή RAT και φάσματος στη γενική περίπτωση),
- ανάθεση επιπέδων QoS,
- κατανομή της κίνησης.

Διάρθρωση πομποδέκτη

Οι δυνατές διαρθρώσεις ανήκουν στο σύνολο $A_{TC} = \{c_e(t) | t \in T_e\}$. Κάθε στοιχείο του συνόλου, $c_e(t)$, είναι η συνολική διάρθρωση του πομποδέκτη t , και αντιστοιχεί σε ένα ζεύγος $[r_e(t), f_e(t)]$. Οι συναρτήσεις $r_e(t)$ και $f_e(t)$ είναι το RAT και η ζώνη φάσματος (που ορίζει αντίστοιχα και τη χρησιμοποιούμενη φέρουσα συχνότητα), αντίστοιχα, που ανατίθενται στον πομποδέκτη t . Κάθε στοιχείο του συνόλου θα πρέπει να είναι σύμφωνο με

τη σχέση $c_e(t) \in C_e(t)$, ή ισοδύναμα, $r_e(t) \in R_e(t)$ και $f_e(t) \in F_e[t, r_e(t)]$. Αυτά εγγυώνται τη συμμόρφωση με τις δυνατότητες του στοιχείου δικτύου (επιτρεπτές κατανομές RATs και φάσματος στους πομποδέκτες).

Ανάθεση επιπέδων QoS

Αυτή εκφράζεται μέσω του συνόλου $A_{UQ} = \{q_e(u) \mid u \in U_e\}$. Η συνάρτηση $q_e(u)$ είναι το επίπεδο QoS που θα προσφερθεί στο χρήστη u , μέσω του αναδιραθρούμενου στοιχείου e . Κάθε συνάρτηση θα πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση $q_e(u) \in Q(s(u), u)$, ώστε να εξασφαλίζεται η συμβατότητα με τα προφίλ και τις συμφωνίες, όπως επί παραδείγματι για την παροχή των υπηρεσιών στα αποδεκτά (κατάλληλα) επίπεδα QoS.

Κατανομή κίνησης

Το σύνολο $A_{TU} = \{u_e(t) \mid t \in T_e\}$ εκφράζει τη νέα κατανομή της κίνησης, λόγω της αναδιάρθρωσης. Κάθε στοιχείο του A_{TU} , $u_e(t) \subseteq U_e$, περιλαμβάνει τους χρήστες που θα εξυπηρετηθούν από τον πομποδέκτη t του στοιχείου e . Για κάθε χρήστη $u \in u_e(t)$, θα πρέπει να ισχύει η σχέση $r_e(t) \in R(s(u), u)$. Αυτό εγγυάται την παροχή των υπηρεσιών μέσω των επιτρεπτών RATs, σε πλήρη συμφωνία με τα προφίλ των τερματικών, όπως επίσης και με τις πολιτικές/συμφωνίες του NO. Επιπλέον, η σχέση $nr(c_e(t), u_e(t), A_{UQ}) \leq abr_e(c_e(t))$ εγγυάται ότι δεν παραβιάζονται οι περιορισμοί της χωρητικότητας για κάθε πομποδέκτη. Μάλιστα, η συνάρτηση $nr(\dots)$ διατηρείται ευέλικτη, ώστε να διασφαλίζεται η δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου σε μια πληθώρα από RATs.

Αντικειμενική Συνάρτηση Βασισμένη στη Χρησιμότητα (Utility-Based Objective Function – OF)

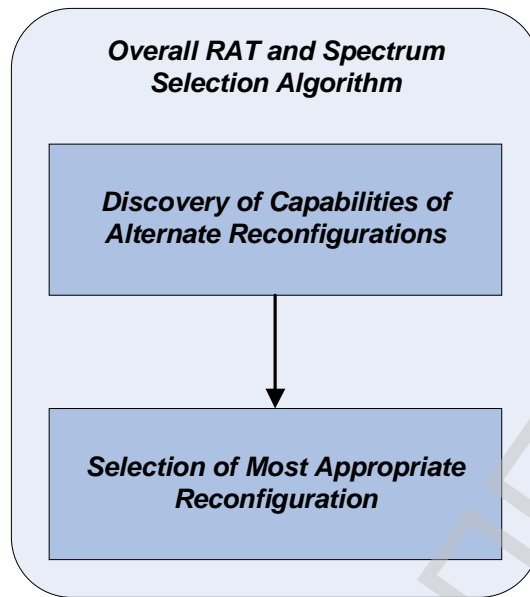
Οι αποφάσεις αναδιάρθρωσης πρέπει να βελτιστοποιούν μια αντικειμενική συνάρτηση (OF) που αποτελείται από δύο μέρη:

Το πρώτο μέρος στοχεύει στη μεγιστοποίηση της χρησιμότητας που πρικήπτει από την κατανομή A_{UQ} . Αυτό εκφράζεται μέσω της ποσότητας $\sum_{u \in U_e} uv[s(u), q_e(u), u]$. Η λογική αυτού είναι ότι πρέπει να ανατίθενται τα προτιμητέα επίπεδα QoS στους χρήστες, στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό.

Το δεύτερο μέρος αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση των απαραίτητων αλλαγών που απαρτίζουν την αναδιάρθρωση. Οι αλλαγές αυτές αντιμετωπίζονται ως κόστος αναδιάρθρωσης του στοιχείου που προκύπτει από την κατανομή A_{TC} . Η λογική αυτού είναι ότι μεταξύ δύο δυνατών διαρθρώσεων που αποδίδουν περίπου όμοια, πρέπει να επιλέγεται αυτή που απαιτεί τις λιγότερες μεταβολές (αλλαγές σε RAT ή / και φάσμα ανά πομποδέκτη). Άρα είναι επιθυμητή και η γνώση της πρότερης κατάστασης στην οποία ευρίσκεται το υπό εξέταση στοιχείο δικτύου. Αυτό ακριβώς συνάδει πλήρως και με τις δυνατότητες ενσωμάτωσης του στοιχείου της γνώσης στην παρούσα μέθοδο, όπως θα εξηγηθεί κατωτέρω.

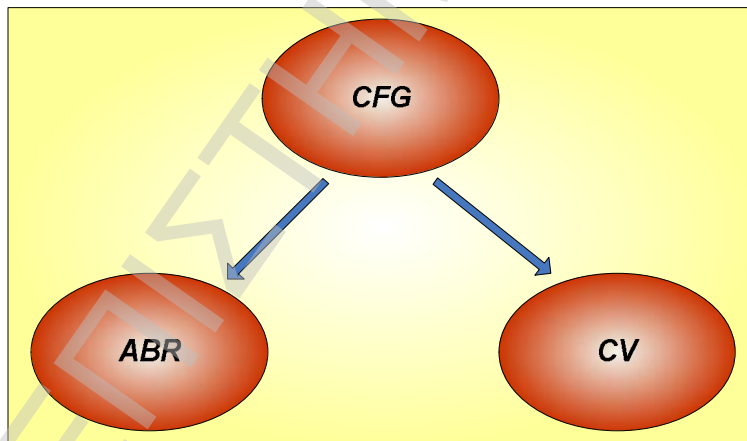
3.4 Εκτίμηση των δυνατοτήτων που προσφέρει κάθε πιθανή διάρθρωση

Αυτή η παράγραφος παρουσιάζει συνοπτικά τη μαθησιακή/προσαρμοστική μέθοδο εκτίμησης της πιθανότητας η επιλογή μιας συγκεκριμένης διάρθρωσης c να έπεται μιας χωρητικότητας $abr_e(c)$ και κάλυψης $cn_e(c)$. Μόνο μετά την εκτίμηση των δυνατοτήτων αυτών θα μπορέσει να συνεχιστεί η διαδικασία για την επιλογή της βέλτιστης διάρθρωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-2.



Σχήμα 3-2: Απεικόνιση διάσπασης αλγορίθμου RAT and Spectrum Selection

Η μέθοδος έγκειται στη μοντελοποίηση του προβλήματος με ένα Bayesian δίκτυο, όπως αυτό που εικονίζεται στο Σχήμα 3-3.



Σχήμα 3-3: Bayesian δίκτυο

Οι ABR και CV είναι τυχαίες μεταβλητές που αναπαριστούν τη χωρητικότητα και την κάλυψη, αντίστοιχα. Η CFG κατ' αναλογία αναπαριστά μια διάρθρωση ενός πομποδέκτη, ήτοι πχ. $CFG = c = (r, f)$. Η CFG αποτελεί την ιδιότητα πρόβλεψης (κόμβο) του Bayesian δικτύου, ενώ οι ABR και CV είναι οι ιδιότητες-στόχοι.

Ο σκοπός είναι ο υπολογισμός της μέγιστης τιμής της υπό συνθήκη πιθανότητας $\Pr[ABR, CV | CFG]$, δηλαδή της πιθανότητας η επιλογή μιας δεδομένης μορφής διάρθρωσης του στοιχείου δικτύου που εξετάζουμε να οδηγήσει σε συγκεκριμένες τιμές μέγιστου ρυθμού μετάδοσης και κάλυψης. Η επίλυση αυτού του προβλήματος γίνεται με τη χρήση τυποποιημένης Bayesian θεωρίας και ξεφεύγει από τους σκοπούς της παρούσης διατριβής. Οι σχετικές λεπτομέρειες του τρόπου επίλυσης καθώς και αποτελέσματα που πιστοποιούν την ορθότητα της επιλυσιακής τεχνικής εμπεριέχονται στο [1].

3.5 Μέθοδος επίλυσης RAT and Spectrum Selection – Γενικά

Αυτή η παράγραφος παρουσιάζει σε γενικές γραμμές τη μέθοδο επίλυσης που ακολουθείται από τον αλγόριθμο "RAT and Spectrum Selection". Η παρουσιαζόμενη γενική μέθοδος, θα εξειδικευθεί παρακάτω στην περίπτωση συγκεκριμένων (εμπορικών) τεχνολογιών και θα αναλυθεί λεπτομερώς.

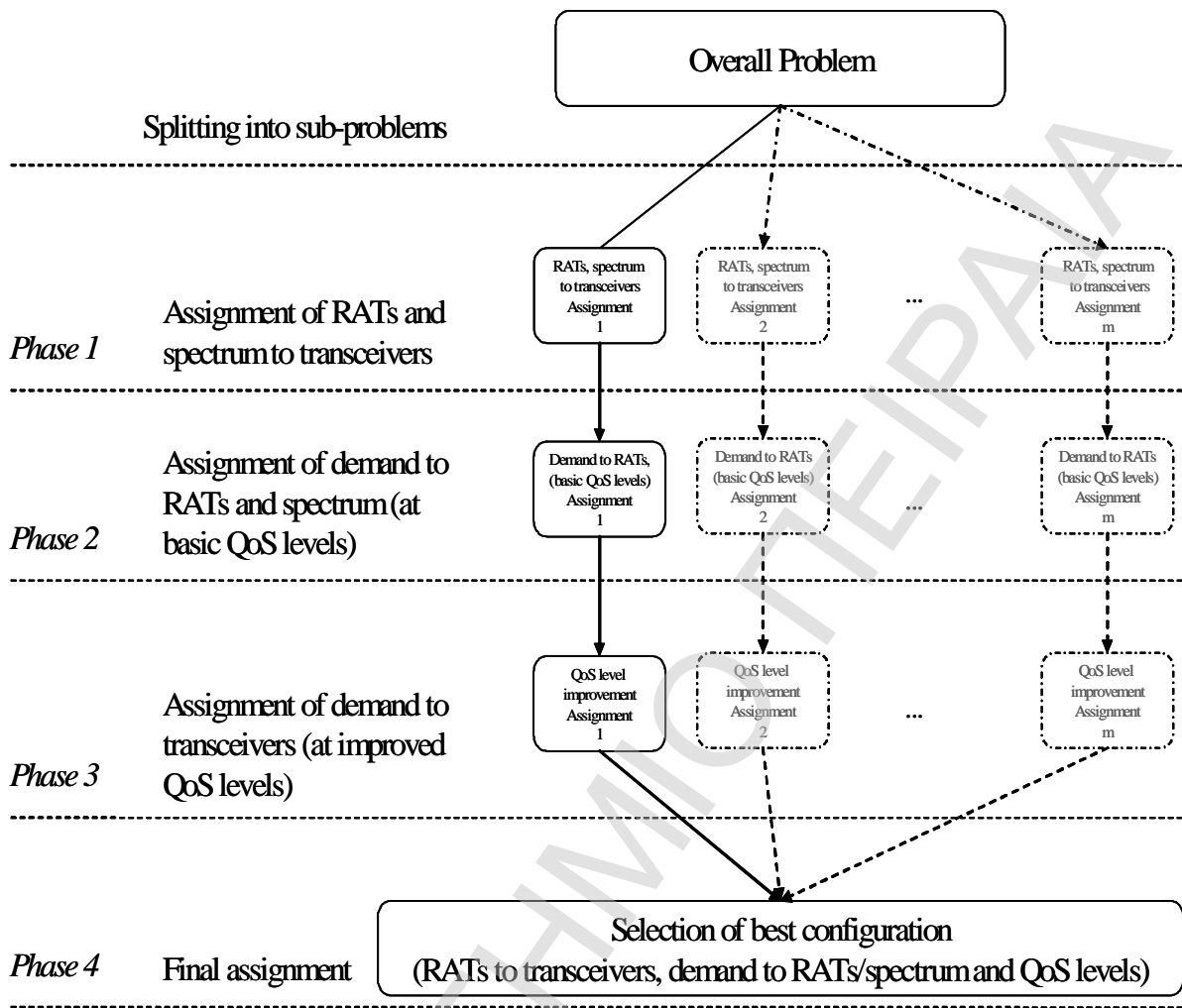
Σε γενικές γραμμές, η προτεινόμενη μέθοδος επίλυσης εκμεταλλεύεται τις πιθανές δυνατότητες των υποψηφίων αναδιαρθρώσεων και επιλέγει τις βέλτιστες.

3.5.1 Γενική προσέγγιση μεθόδου

Σε γενικές γραμμές το τμήμα αυτό της επίλυσης του προβλήματος μπορεί να διασπαστεί 4 φάσεις, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-4, προκειμένου να εξηγηθεί καλύτερα ο όλος τρόπος λειτουργίας του, αλλά και να ελαττωθεί (διασπαστεί) η συνολική πολυπλοκότητά του.

Η πρώτη φάση ευρίσκει τις αποδεκτές αναδιαρθρώσεις για τους πομποδέκτες. Κάθε διάρθρωση A_{TC} θα συνιστά και ένα υποπρόβλημα. Τα υποπροβλήματα υπόκεινται παράλληλη επεξεργασία.

Στη δεύτερη φάση, για κάθε υποπρόβλημα (με σταθερή κατανομή A_{TC}), υπολογίζεται η κατανομή της ζήτησης στους πομποδέκτες, A_{TU} . Σε αυτή τη φάση, τα επίπεδα QoS που παρέχονται στους χρήστες διατηρούνται στις ελάχιστες δυνατές (αποδεκτές) τιμές τους (A_{UQ}^{basic}).



Σχήμα 3-4: Γενική στρατηγική RAT and Spectrum Selection

Τονίζεται εδώ ότι τα βασικά επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας ορίζονται συνήθων από τον NO στη γενική περίπτωση, δηλαδή αποτελούν τμήμα των πολιτικών του. Αν μια λύση (κατανομή A_{TV}) δεν μπορεί να ικανοποιήσει αυτές τις προϋποθέσεις, η εν λόγω αναδιάρθρωση απορρίπτεται.

Στην τρίτη φάση, τα παρεχόμενα επίπεδα QoS βελτιώνονται σταδιακά, μέχρις ότου είτε φτάσουν στη μέγιστη τιμή τους, είτε δεν απομένει διαθέσιμη παραπάνω χωρητικότητα. Και η μέγιστη τιμή αντίστοιχα καθορίζεται από τον NO και την εκάστοτε στρατηγική που ακολουθεί. Αυτή η φάση καταλήγει στην τελική κατανομή A_{UQ} .

Ουσιαστικά οι προηγούμενες φάσεις καταδεικνύουν τη συμμετοχή κάθε πιθανής αναδιάρθρωσης στην OF. Έτσι, η τέταρτη και τελευταία φάση της μεθόδου επίλυσης επιλέγει τη βέλτιστη αναδιάρθρωση, ήτοι αυτή που επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη τιμή της OF.

Οι ανωτέρω περιγραφείσες φάσεις αναλύονται λεπτομερώς στις παρακάτω παραγράφους.

3.5.2 **Πρώτη φάση: υπολογισμός υποψηφίων διαρθρώσεων** A_{TC}

Η φάση αυτή ευρίσκει τις υποψήφιες διαρθρώσεις που θα υποστούν παράλληλη επεξεργασία στις επόμενες φάσεις, με τη μορφή υποπροβλημάτων. Ένας απλός αλγόριθμος είναι να απαριθμηθούν οι πιθανές διαρθρώσεις, απορρίπτοντας όσες βρίσκονται σε ασυμφωνία με την πολιτική του παρόχου (NO) ή ανεφάρμοστες τεχνικά, όπως επί παραδείγματι η ανάθεση σε όλους τους πομποδέκτες WLAN (μη δυνατότητα παροχής υπηρεσίας φωνής) ή η ανάθεση απαγορευτικών φερόντων φάσματος σε ένα RAT, καθώς επίσης και η χρήση γειτονικών συχνοτήτων στο ίδιο στοιχείο (η οποία δεν καταλήγει στη βέλτιστη απόδοση).

Σημειώνουμε ότι υπάρχει ένα άνω φράγμα του αριθμού υποπροβλημάτων. Παίρνοντας την τιμή $|F_e|$ ως το μέγιστο αριθμό συχνοτήτων που μπορούν να ανατεθούν σε οποιοδήποτε πομποδέκτη $t \in T_e$, το άνω φράγμα πολυπλοκότητας είναι $|F_e|! / (|T_e|!) \cdot (|F_e|! - |T_e|!)$. Αυτή η ποσότητα αναπαριστά το μέγιστο αριθμό συνδυασμών για την τοποθέτηση $|T_e|$ ίδιων αντικειμένων σε $|F_e|$ διαφορετικά κουτιά, όπου κάθε κουτί περιέχει ένα μόνο αντικείμενο. Πρακτικά, ο αριθμός των υποπροβλημάτων είναι σημαντικά μικρότερος, εφόσον κάποιες διαρθρώσεις απορρίπτονται. Συγκεκριμένα, υπό κατάλληλες προϋποθέσεις, μπορεί να επιτευχθεί μείωση του αριθμού των υποπροβλημάτων (που είναι επιθυμητή προς μείωση της πολυπλοκότητας του αλγορίθμου), αν εκμεταλλευτούμε συγκεκριμένα στοιχεία των τεχνολογιών καθαυτών, όπως το ότι όλοι οι πομποδέκτες έχουν τις ίδιες δυνατότητες όταν λειτουργούν με το ίδιο c . Επιπλέον, αποκλείεται από το χώρο των λύσεων της πρώτης φάσης η περίπτωση χρηστών, όπου δεν υπάρχει για κάποιο χρήστη i υποψήφιο σύνολο T_i ($T_i = \emptyset$), πιθανόν επειδή κανείς από τους διαθέσιμους πομποδέκτες δεν τον καλύπτει ή δεν μπορεί να του παρέξει τη ζητούμενη υπηρεσία. Εν τέλει τα ανωτέρω οδηγούν σε ένα μικρότερο αριθμό υποπροβλημάτων (κατανομών A_{TC}).

3.5.3 Δεύτερη φάση: κατανομή A_{TU} με A_{UQ}^{basic}

Η είσοδος αυτής της φάσης αποτελείται από:

- (i) τις απαιτήσεις της περιοχής εξυπηρέτησης,
- (ii) τα προφίλ/συμφωνίες, και
- (iii) την επιλεχθείσα από την προηγούμενη φάση αναδιάρθρωση / κατανομή

$$A_{TC} = \{c_e(t) \mid t \in T_e\}.$$

Η κατανομή A_{TC} , σε συνδυασμό με τις πληροφορίες από την αναγνώριση των δυνατοτήτων των αναδιαρθρώσεων, καταλήγει στον αναμενόμενο μέγιστο δυνατό ρυθμό μετάδοσης, $abr_e(c_e(t))$, και κάλυψη, $cv_e(c_e(t))$, κάθε πομποδέκτη. Αυτές οι δυνατότητες πρέπει να καταστούν εκμεταλλεύσιμες κατά την κατανομή των χρηστών στους πομποδέκτες.

Αρχικά ο αλγόριθμος κάνει χρήση πληροφοριών κάλυψης. Κάθε χρήστης πέφτει στην περιοχή κάλυψης ενός αριθμού (από 0 έως $|T_e|$ πομποδεκτών). Με αυτό τον τρόπο οι χρήστες ταξινομούνται με βάση των αριθμό των υποψηφίων πομποδεκτών (με αύξουσα σειρά). Χρήστες εκτός κάλυψης θεωρούνται υπεράριθμοι.

Στη συνέχεια ο αλγόριθμος κάνει χρήση πληροφοριών χωρητικότητας (με την έννοια του διαθέσιμου ποσοστού από το μέγιστο δυνατό ρυθμό μετάδοσης), εξελισσόμενος σε φάσεις, όπου κάθε φάση στοχεύει σε ένα χρήστη, ευνοώντας την ανάθεση ενός χρήστη στον πομποδέκτη με τη μεγαλύτερη ελεύθερη χωρητικότητα και ταυτόχρονα χαμηλή πιθανή ζήτηση, η οποία πιθανή ζήτηση σχετίζεται με χρήστες των οποίων η ανάθεση σε πομποδέκτες δεν έχει ακόμα πραγματοποιηθεί. Επιπλέον, αν δεν υπάρχει πομποδέκτης με ελεύθερη χωρητικότητα, ο χρήστης θεωρείται υπεράριθμος. Ο αλγόριθμος τερματίζεται όταν όλοι οι χρήστες έχουν ανατεθεί σε πομποδέκτες, και ο όγκος των υπεράριθμων χρηστών μπορεί να εξυπηρετηθεί μέσω συνεργαζόμενων δικτύων [16][17][18].

Η τυπική περιγραφή του αλγορίθμου απαιτεί τον ορισμό κάποιων επιπροσθέτων δομών δεδομένων. Η πληροφορία που σχετίζεται με την κάλυψη είναι η εξής: κάθε χρήστης u μπορεί να εξυπηρετηθεί από ένα σύνολο υποψηφίων πομποδεκτών $Ct(u) = \{t \in T_e \mid l(u) \in cv_e(c_e(t))\}$. Το σύνολο $Ct(u) \subseteq T_e$ περιλαμβάνει πομποδέκτες που έχουν το χρήστη u εντός της περιοχής κάλυψής τους. Άρα, το σύνολο $Ct(u)$ δίνει το σύνολο των υποψηφίων χρηστών, $Cu(t)$ ($Cu(t) \subseteq U_e$), κάθε πομποδέκτη t . Βασιζόμενοι

στους ορισμούς αυτούς, μπορούμε να έχουμε για κάθε πομποδέκτη $t \in T_e$, την πιθανή ζήτηση, $pd(t) = nr(c_e(t), cu(t), A_{UQ}^{basic})$, καθώς και την παραμένουσα χωρητικότητα $rc(t) = abr_e(c_e(t)) - nr(c_e(t), cu(t), A_{UQ}^{basic})$. Τέλος, το σύνολο των υπεράριθμων χρηστών είναι το O_e .

Ο αλγόριθμος λειτουργεί ως ακολούθως:

Βήμα 1:

Υπολογίζονται τα σύνολα $Ct(u)$ και $Cu(t)$, για κάθε $u \in U_e$ και $t \in T_e$. Οι τιμές $pd(t)$ και $rc(t)$ αρχικοποιούνται, για κάθε $t \in T_e$. Οι χρήστες για τους οποίους $|Ct(u)|=0$ θεωρούνται ότι ανήκουν στο σύνολο O_e . Αν το $|O_e|$ ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο κατώφλι, πράγμα που σημαίνει ότι η ζήτηση αδυνατεί να εξυπηρετηθεί από συνεργαζόμενα δίκτυα, η αναδιάρθρωση A_{TC} απορρίπτεται και ο αλγόριθμος μεταβαίνει στο βήμα 5.

Βήμα 2:

Χρήστες για τους οποίους $|Ct(u)| \neq 0$ τοποθετούνται σε μία λίστα, την L . Οι χρήστες ταξινομούνται σε αύξουσα σειρά από την τιμή του $|Ct(u)|$ (στο ξεκίνημα υπάρχουν αυτοί με τις χαμηλότερες τιμές, στο τέλος αυτοί με τις υψηλότερες).

Βήμα 3:

Εξάγεται ο πρώτος χρήστης, u , από την L . Ο χρήστης u ανατίθεται στον πομποδέκτη t από το $Ct(u)$ που έχει επαρκή απομένουσα χωρητικότητα, $rc(t)$, καθώς και τη χαμηλότερη τιμή του $pd(t)/rc(t)$. Έτσι, ο αλγόριθμος ευνοεί πομποδέκτες που έχουν χαμηλή πιθανή ζήτηση και υψηλή απομένουσα χωρητικότητα. Αν βρεθεί ένας τέτοιος πομποδέκτης, ο, u προσαρτάται στο $u_e(t)$, αλλιώς προσαρτάται στο O_e . Αν το $|O_e|$ υπερβεί ένα συγκεκριμένο κατώφλι, η αναδιάρθρωση απορρίπτεται (εξαιτίας ανεπαρκούς κάλυψης και χωρητικότητας).

Βήμα 4:

Αν η L δεν είναι άδεια, υπάρχουν ακόμα χρήστες που δεν έχουν ανατεθεί σε πομποδέκτη. Απαιτούνται λοιπόν οι ακόλουθες ενέργειες: (i) ενημερώνεται η τιμή $rc(t)$ του πομποδέκτη που επιλέχθηκε στο προηγούμενο βήμα; (ii) για όλους τους πομποδέκτες του συνόλου

$Ct(u)$, ενημερώνονται τα σύνολα $Cu(t)$ και οι τιμές $pd(t)$, αφαιρώντας τη συμβολή του χρήστη u ; (iii) απορρίπτεται το σύνολο $Ct(u)$; (iv) ο αλγόριθμος μεταβαίνει στο βήμα 3.

Βήμα 5:

Τέλος.

3.5.4 Τρίτη φάση: τελική κατανομή A_{uQ} (με βελτιωμένα επίπεδα QoS)

Η είσοδος της φάσης αυτής αποτελείται από:

- (i) τις απαιτήσεις της περιοχής εξυπηρέτησης,
- (ii) τα προφίλ/συμφωνίες, και
- (iii) τις κατανομές A_{TC} και A_{TU} που επιλέχθηκαν στις προηγούμενες φάσεις.

Ο στόχος είναι να αυξηθούν (μεγιστοποιηθούν) τα παρεχόμενα επίπεδα QoS προς τους χρήστες. Με βάση το προφίλ, η αύξηση των επιπέδων QoS που παρέχονται σε ένα χρήστη, u , δύναται να αυξήσει την αντίστοιχη τιμή της χρησιμότητας, κατά ένα παράγοντα $d_{uv}(u)$. Αυτό βελτιώνει την OF. Ως εκ τούτου, μπορούμε να αποκτήσουμε ένα σύνολο πιθανών κινήσεων (βελτιώσεων των επιπέδων QoS), οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν ως προς την πιθανή συμβολή τους στην τιμή της OF. Σε κάθε φάση, ο αλγόριθμος επιλέγει την αποτελεσματικότερη κίνηση (ήτοι αυτή που βελτιώνει περισσότερο την τιμή της OF), με την προϋπόθεση να είναι σύμφωνη με τη διαθέσιμη χωρητικότητα του πομποδέκτη. Ο αλγόριθμος σταματά όταν δεν υπάρχει περιθώριο περαιτέρω βελτίωσης της OF, ή όταν δεν υπάρχει διαθέσιμη απομένουσα χωρητικότητα (σύμφωνα με το μέγιστο δυνατό ρυθμό μετάδοσης).

Ο αλγόριθμος λειτουργεί ως ακολούθως:

Βήμα 1:

Υπολογίζονται οι τιμές $d_{uv}(u)$ για κάθε χρήστη $u \in U_e$, προκύπτουσες από τη βελτίωση των τρεχόντων επιπέδων QoS ένα-ένα. Εάν $d_{uv}(u)=0$ για κάθε $u \in U_e$, τα επίπεδα QoS δεν μπορούν να βελτιωθούν και ο αλγόριθμος τερματίζεται (μεταβαίνει στο βήμα 6).

Βήμα 2:

Οι χρήστες για τους οποίους $d_{in}(u) > 0$ τοποθετούνται σε μια λίστα, L , σε φθίνουσα σειρά βάσει της τιμής της μεταβλητής $d_{in}(u)$.

Βήμα 3:

Εάν $L \neq \emptyset$, εξάγεται από τη λίστα ο πρώτος χρήστης u , αλλιώς ο αλγόριθμος τερματίζεται (μεταβαίνει στο βήμα 6).

Βήμα 4:

Ο χρήστης u απολαμβάνει υψηλότερο QoS (π.χ., $q_e(u) = q_e(u) + 1$) εάν η μετάβαση είναι εφικτή από άποψης χωρητικότητας. Εάν η μετάβαση είναι ανέφικτη, ο χρήστης u δε θα ληφθεί υπόψη περαιτέρω και θα πραγματοποιηθεί μια μετάβαση στο βήμα 3.

Βήμα 5:

Ο αλγόριθμος ευρίσκει τον αντίκτυπο μιας περαιτέρω βελτίωσης του επιπέδου QoS του χρήστη u . Υπολογίζεται η νέα τιμή, $d_{in}(u)$. Εν συνεχεία, ο u τοποθετείται καταλλήλως στη L και πραγματοποιείται μετάβαση στο βήμα 3.

Βήμα 6:

Τέλος.

3.5.5 **Τέταρτη φάση: επιλογή της καταλληλότερης αναδιάρθρωσης**

Η τελευταία φάση αποσκοπεί στην επιλογή της βέλτιστης αναδιάρθρωσης. Η επιλεχθείσα αναδιάρθρωση βελτιστοποιεί την τιμή της OF, καταλήγοντας στη μέγιστη συνολική χρησιμότητα με τις ελάχιστες δυνατές αλλαγές στους πομποδέκτες. Θα αναλυθεί διεξοδικά παρακάτω, με την αναλυτική περιγραφή των φάσεων στην περίπτωση χρήσης εμπορικών RATs.

3.6 Μέθοδος επίλυσης RAT and Spectrum Selection – Αναλυτική Περιγραφή RAT, Demand and QoS Assignment (RDQ-A)

3.6.1 Προκαταρκτική Ανάλυση

Η γενική μέθοδος RAT and Spectrum Selection που παρουσιάστηκε ανωτέρω δύναται να περιγραφεί περισσότερο αναλυτικά (προς καλύτερη κατανόηση), στην περίπτωση που μελετώνται RATs εμπορικά εκμεταλλεύσιμα στη σημερινή εποχή. Το προκύπτον πρόβλημα που θα επιλυθεί απλά θεωρεί ως διάρθρωση το r αντί του ζεύγους (r, f) και καλείται RAT, Demand and QoS Assignment (RDQ-A) πρόβλημα.

Στόχος της επίλυσης του RDQ-A είναι η βέλτιστη απόφαση για τους εκ νέου καθορισμούς των παραμέτρων του συστήματος, ήτοι εκ νέου κατανομές α) των RATs στους πομποδέκτες, β) της ζήτησης (χρηστών) σε πομποδέκτες / RATs, και γ) της ζήτησης σε επίπεδα QoS. Οι κατανομές εξόδου μπορούν να περιγραφούν ως ακολούθως:

- Η κατανομή των RATs σε πομποδέκτες περιγράφεται από το σύνολο $A_{TC} = \{r_t \mid \forall t \in T\}$. Κάθε στοιχείο του συνόλου r_t ($r_t \in R_t$) δηλώνει το RAT που ανατίθεται στον πομποδέκτη t .
- Η κατανομή της ζήτησης (χρηστών) σε πομποδέκτες δηλώνεται ως $A_{TU} = \{t_i \mid \forall i \in [1 N]\}$. Κάθε στοιχείο t_i αντιπροσωπεύει τον πομποδέκτη στον οποίο αποδίδεται ο χρήστης i .
- Τέλος, η κατανομή της ζήτησης (χρηστών) σε επίπεδα QoS περιγράφεται από το $A_{UQ} = \{q_i \mid \forall i \in [1 N]\}$. Κάθε στοιχείο q_i ($q_i \in Q_{s_i}$) είναι το επίπεδο ποιότητας που θα προσφερθεί στο χρήστη i (που χρησιμοποιεί την s_i μέσω του πομποδέκτη t_i).

Οι 3 ανωτέρω κατανομές συνιστούν την *τριπλέτα επίλυσης* του RDQ-A και πρέπει να μεγιστοποιούν τη χρησιμότητα που σχετίζεται με τα ανατιθέμενα επίπεδα QoS, με παράλληλη ελαχιστοποίηση του σχετιζόμενου κόστους από τις αναδιարθρώσεις, όπως έχει αναφερθεί.

Ας δούμε αναλυτικά πώς εφαρμόζεται ο αλγόριθμος για καθεμιά εκ των προαναφερθέντων φάσεων του συνολικού RAT and Spectrum Selection αλγορίθμου.

3.6.2 Πρώτη φάση: Κατανομή A_{TC}

Δεδομένων των συνόλων $|R|$ και $|T|$ που δηλώνουν τον αριθμό των διαθέσιμων RATs και πομποδεκτών αντιστοίχως, η φάση αυτή καταλήγει στην αναγνώριση του συνολικού αριθμού των κατανομών A_{RT} , ήτοι $|R|^{|T|}$ - στον αριθμό - υποπροβλήματα.

Από τη στιγμή που απομονώνεται μια συγκεκριμένη κατανομή A_{RT} , είναι γνωστό το RAT με το οποίο λειτουργεί ο πομποδέκτης t ($=r_t$) και ως εκ τούτου, ορισμένα χαρακτηριστικά όπως η κάλυψη του πομποδέκτη ($cv_t, t \in T$) και ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης ($abr_t, t \in T$) μπορούν να εξαχθούν. Τέλος, το σύνολο S_t ($t \in T$) αναπαριστά τις υπηρεσίες που προσφέρονται από τον πομποδέκτη t , ενώ το σύνολο των πομποδεκτών που είναι υποψήφιοι να εξυπηρετήσουν το χρήστη i μπορούν να εκφραστούν μέσω του συνόλου $T_i = \{t : l_i \in cv_t, s_i \in S_t\} \subseteq T$.

3.6.3 Δεύτερη φάση: Κατανομή A_{TU} με A_{UQ}^{basic}

Δεδομένων των εξαγομένων της προηγούμενης φάσης, η δεύτερη φάση αποσκοπεί στο να βρει τη βέλτιστη κατανομή A_{TU} , υποθέτοντας ότι τα επίπεδα QoS είναι τα χαμηλότερα δυνατά (βασική A_{UQ} , $q_i = 0, \forall i \in [1 N]$). Για το σκοπό αυτό έχει σχεδιαστεί ένας κατάλληλος αλγόριθμος, για την ανάλυση της λειτουργικότητας του οποίου είναι χρήσιμο να οριστούν κάποια νέα μεγέθη:

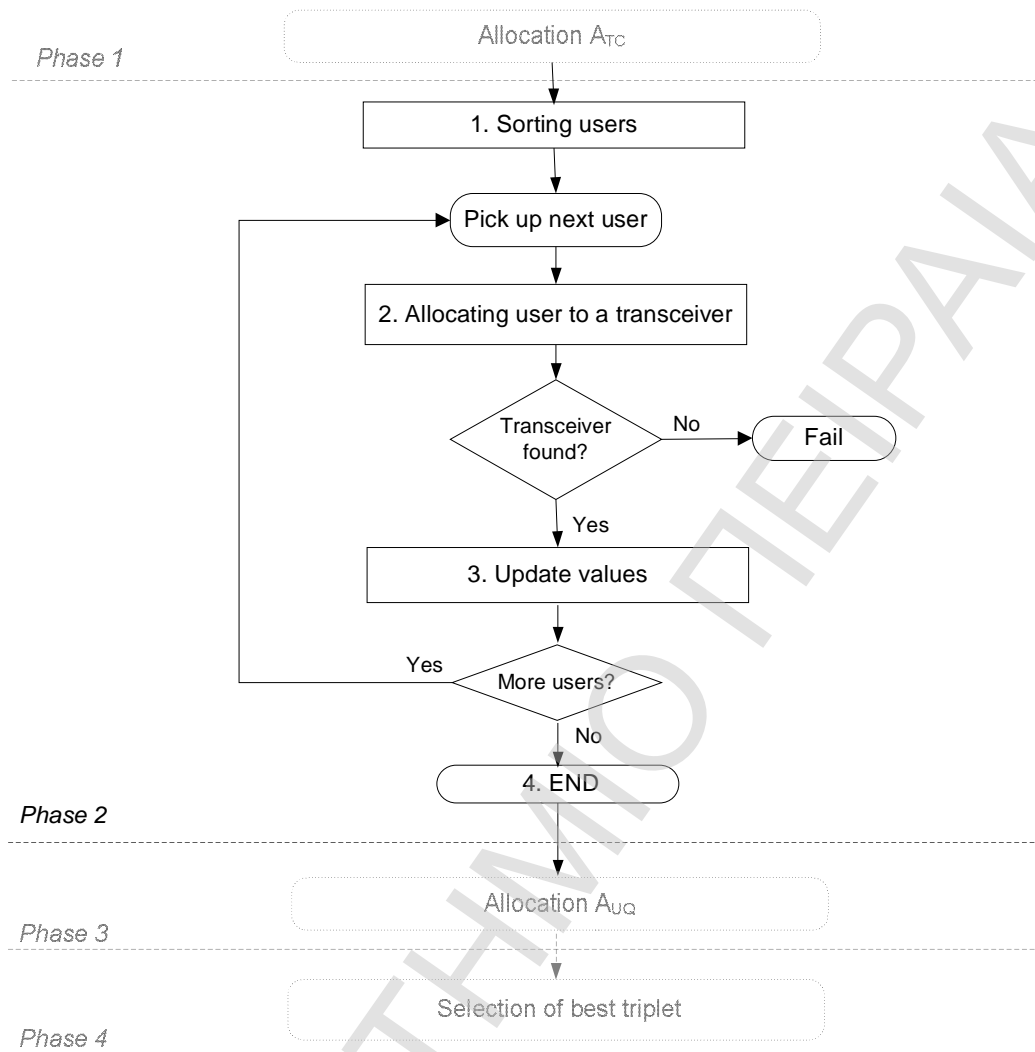
$U_i^{cs} = \{i : t \in T_i\}$: Το σύνολο χρηστών για τους οποίους ο πομποδέκτης t ανήκει στο σύνολο T_i .

pd_t : Η πιθανή ζήτηση για τον πομποδέκτη t , δηλαδή οι πόροι που θα αιτούνταν από τους χρήστες που ανήκουν στο σύνολο U_i^{cs} . Ισχύει επομένως ότι $pd_t = \sum_{i \in U_i^{cs}} b_{s_i, q_i}$, όπου το

άθροισμα εκφράζει το σύνολο των απαιτούμενων πόρων.

rc_t : Η παραμένουσα χωρητικότητα του πομποδέκτη t .

Ο αλγόριθμος που οδηγεί στην εξαγωγή της κατανομής A_{TU} υλοποιείται σε βήματα (βλέπε Σχήμα 3-5) ως εξής:



Σχήμα 3-5: Αλγόριθμος για την εξαγωγή της κατανομής A_{TU}

Βήμα 1: Ταξινόμηση χρηστών

Αρχικά, οι χρήστες ταξινομούνται ξεκινώντας από αυτούς που διαθέτουν το μικρότερο υποψήφιο σύνολο T_k προς αυτούς με το μεγαλύτερο σύνολο T_k . Στην περίπτωση όπου 2 ή παραπάνω χρήστες έχουν υποψήφια σύνολα του ίδιου μεγέθους, η προτεραιότητα ανατίθεται με τυχαίο τρόπο. Εν συνεχεία διαλέγουμε ένα χρήστη από την (ταξινομημένη πλέον) λίστα, πχ. Το χρήστη k .

Βήμα 2: Αναθέτοντας το χρήστη σε ένα πομποδέκτη

Ο πομποδέκτης που θα εξυπηρετήσει τον k επιλέγεται μεταξύ των $|T_k|$ υποψηφίων, με την προϋπόθεση να ικανοποιούνται ταυτόχρονα οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\left(\sum_{\{i:t_i=t, i \neq k\}} b_{s_i, q_i} \right) + b_{s_k, q_k} \leq abr_t \quad (3.1)$$

$$t_k = \underset{t \in T_k}{\operatorname{argmin}} \left(pd_t / rc_t \right) \quad (3.2)$$

Η σχέση (3.1) διαφαλίζει τη μη παραβίαση της μέγιστης χωρητικότητας για τον επιλεχθέντα πομποδέκτη. Παράλληλα, η (3.2) αποδίδει προτεραιότητα στους πομποδέκτες που διαθέτουν είτε χαμηλή πιθανή ζήτηση είτε υψηλή παραμένουσα χωρητικότητα¹. Αν κανένας πομποδέκτης δεν ικανοποιεί τις (3.1) και (3.2), ο αλγόριθμος αποτυγχάνει, αλλά μόνο για το συγκεκριμένο υποπρόβλημα.

Βήμα 3: Ενημέρωση τιμών

Για κάθε πομποδέκτη $t \in T_k$, ενημερώνονται οι τιμές του μεγέθους pd_t . Επιπλέον, ενημερώνεται και το μέγεθος rc_{t_k} του επιλεχθέντος πομποδέκτη t_k . Αν υπάρχουν περισσότεροι χρήστες προς ταξινόμηση, επιλέγουμε τον επόμενο και επιστρέφουμε Βήμα 2, ενώ σε διαφορετική περίπτωση πάμε στο Βήμα 4.

Βήμα 4: ΤΕΛΟΣ.

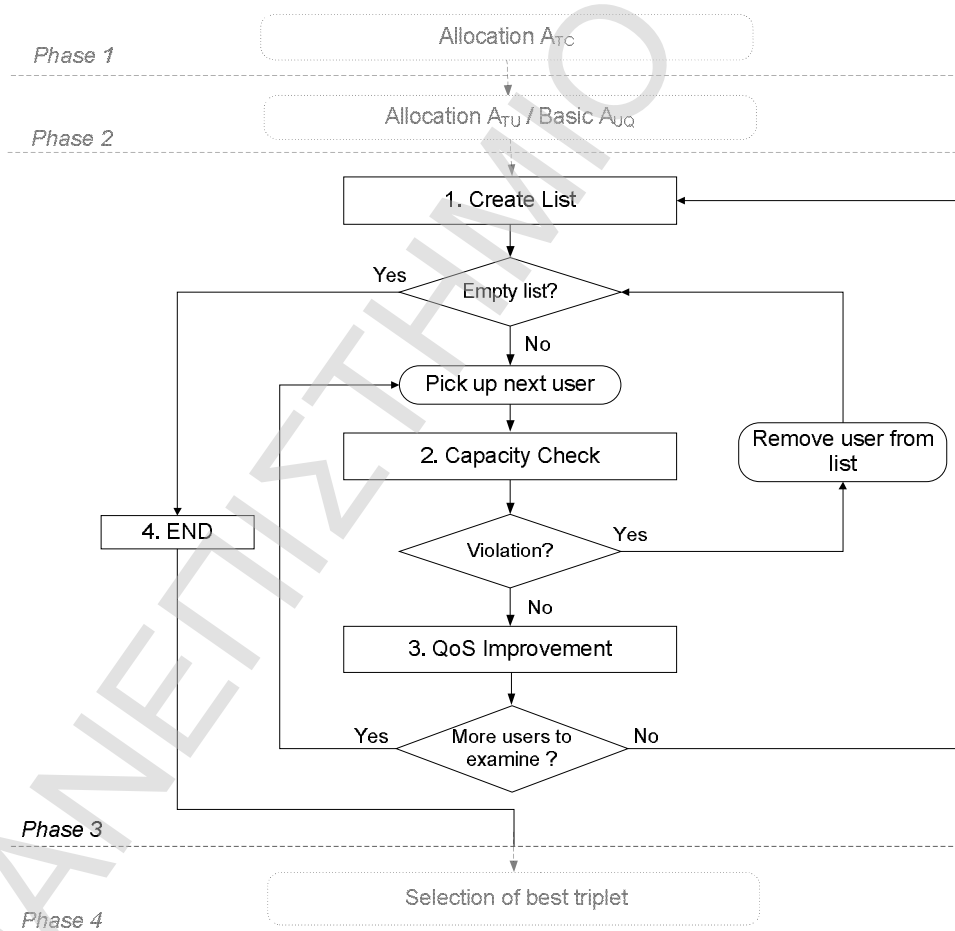
Με το τέλος του αλγορίθμου, προτείνεται μια κατανομή των χρηστών στους πομποδέκτες. Το σύνολο των χρηστών που αποδίδονται στον πομποδέκτη t is $U_t = \{i : t_i = t\}$.

3.6.4 Τρίτη φάση: Κατανομή A_{UQ} (με βελτιωμένα επίπεδα QoS)

Ήδη στην αρχή της τρίτης φάσης, γνωρίζουμε τη βασική κατανομή A_{TU} , καθώς και την παραμένουσα χωρητικότητα κάθε πομποδέκτη (rc_t). Στη φάση αυτή, τα επίπεδα QoS που προσφέρονται από κάθε πομποδέκτη στους χρήστες του αυξάνονται σταδιακά, με στόχο την ικανοποίηση του κριτηρίου της μεγιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης - OF:

$$OF_t = \sum_{i \in U_t} of_i = \sum_{i \in U_t} [uv_{s_i, q_i} - cs_{s_i, q_i}(l_i, c_{t_i})] \quad (3.3),$$

όπου η ποσότητα of_i εκφράζει τη συμβολή κάθε χρήστη στη μεγιστοποίηση της τιμής της OF για τον πομποδέκτη του.



Σχήμα 3-6: Αλγόριθμος για την εξαγωγή της τελικής κατανομής A_{UQ}

Η προς μεγιστοποίηση OF σχετίζεται με τη χρησιμότητα που προκύπτει από τα επίπεδα QoS που ανατίθενται τελικά και από το σχετικό κόστος που προκύπτει από το επίπεδο QoS που ανατίθεται στην υπηρεσία s_i , περιοχής l_i και τεχνολογίας λειτουργίας (RAT r_i), όπως έχει προκύψει από τη φάση 1. Ο σχετικός αλγόριθμος (βλέπε επίσης και Σχήμα 3-6) στοχεύει στο να βρει την τελική κατανομή A_{UQ} δίνοντας προτεραιότητα στους χρήστες που τείνουν να αυξήσουν την τιμή της OF και αναλύεται ως ακολούθως:

Για κάθε πομποδέκτη $t \in T$:

Βήμα 1: Δημιουργία Λίστας

Βήμα 1.1: Υπολογίζουμε την πιθανή συμβολή κάθε χρήστη (of_i) στην OF_t . Ο όρος «πιθανή» έχει να κάνει με το ότι τα επίπεδα QoS αυξάνονται σταδιακά (πχ. Από το 0 στο 1) και υπολογίζονται οι εκάστοτε τιμές of_i . Από τη λίστα αποκλείονται χρήστες που δεν βελτιώνονται περαιτέρω, πχ. χρήστες φωνής.

Βήμα 1.2: Οι υπόλοιποι χαρακτηρίζονται ως «μη εξετάσιμοι» και τοποθετούνται με φθίνουσα σειρά σύμφωνα με την υπολογισθείσα συμβολή τους.

Βήμα 1.3: Αν η λίστα είναι άδεια, ο αλγόριθμος αποτυγχάνει (Βήμα 4), διαφορετικά επιλέγουμε τον πρώτο χρήστη από την ταξινομημένη λίστα (πχ. τον k) και συνεχίζουμε με το επόμενο βήμα.

Βήμα 2: Έλεγχος χωρητικότητας

Βήμα 2.1: Αύξηση κατά ένα των επιπέδων QoS ($q_k := q_k + 1$).

Βήμα 2.2: Έλεγχος εάν παραβιάζεται η μέγιστη χωρητικότητα του εξυπηρετούντος πομποδέκτη, δηλαδή εάν

$$\left(\sum_{\{i:t_i=t, i \neq k\}} b_{s_i, q_i} \right) + b_{s_k, q_k} > abr_t .$$

Εάν ναι, επιστρέφουμε στο προηγούμενο επίπεδο QoS ($q_k := q_k$) και αφαιρούμε αυτόν τον χρήστη από τη λίστα. Αν η λίστα δεν είναι άδεια, επιλέγουμε τον επόμενο χρήστη και συνεχίζουμε με το βήμα 2, αλλιώς μεταφερόμαστε στο βήμα 4. Εάν όχι, συνεχίζουμε με το βήμα 3.

Βήμα 3: Βελτίωση (αύξηση) QoS

Βήμα 3.1: Αυξάνουμε κατά ένα το επίπεδο QoS ($q_k := q_k + 1$) του επιλεχθέντος χρήστη.

Βήμα 3.2: Ενημερώνουμε την ποσότητα of_k του χρήστη k και σημειώνουμε το χρήστη ως «εξετασθέντα».

Βήμα 3.3: Αν υπάρχουν μη εξετασθέντες χρήστες στη λίστα, επιλέγουμε τον επόμενο και συνεχίζουμε με το βήμα 2. Σε διαφορετική περίπτωση επιστρέφουμε στο βήμα 1 και δημιουργούμε τη νέα λίστα με τους χρήστες που χρήζουν περαιτέρω βελτίωσης.

Βήμα 4: ΤΕΛΟΣ.

Φάση 4 – Επιλογή της βέλτιστης τριπλέτας

Μετά την ολοκλήρωση των 3 πρώτων φάσεων, επίκειται η επιλογή της βέλτιστης τριπλέτας (A_{TC}, A_{TU}, A_{UQ}) , ανάμεσα στους δυνατούς $m \binom{|R|}{m}$ συνδυασμούς. Ένα λογικό κριτήριο επιλογής αποτελεί η μεγιστοποίηση της συνολικής OF, η οποία προκύπτει αν αθροίσουμε τις τιμές της (4.3) για όλους τους πομποδέκτες:

$$OF_{tot}(A_{TC}, A_{TU}, A_{UQ}) = \sum_{t \in T} OF_t \quad (3.4)$$

Επιπροσθέτως, είναι σημαντικό να ενσωματωθεί στη διαδικασία επιλογής, το κόστος των αναδιαρθρώσεων CS_{reconf} , που συνεπάγεται η επιλογή της τριπλέτας επίλυσης (A_{TC}, A_{TU}, A_{UQ}) . Συγκεκριμένα, όταν έχουμε να επιλέξουμε μεταξύ δύο λύσεων που έχουν την ίδια (περίπου) απόδοση ως προς την OF, προτιμητέα είναι η λύση που απαιτεί το μικρότερο δυνατό αριθμό αναδιαρθρώσεων. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι με αυτό τον τρόπο ελαχιστοποιούνται οι ανάγκες για κατέβαση κι εγκατάσταση λογισμικού, για σηματοδοσία μεταξύ των εμπλεκόμενων στοιχείων δικτύου, κλπ. Προφανώς απαιτείται η γνώση της προηγούμενης κατάστασης του δικτύου, για τη λήψη της σωστής απόφασης λαμβάνοντας υπόψη των αριθμό των αναδιαρθρώσεων.

Διαχωρίζουμε 3 τύπους κόστους που αντανakλούν τη μετάβαση (μέσω κάποιας ανταλλαγής μηνυμάτων με στόχο την αναδιάρθρωση) από μια κατάσταση του δικτύου n σε μια κατάσταση $n+1$. Μπορούμε να θεωρήσουμε επίσης ότι τα κόστη αυτά αφορούν είτε το

σταθμό βάσης είτε το τερματικό και προστίθενται για την εξαγωγή του ως ανωτέρω συνολικού κόστους:

- cs_T έχει να κάνει με τον αριθμό των πομποδεκτών ενός σταθμού βάσης που αλλάζουν το RAT τους κατά τη μετάβαση από την κατάσταση n στην κατάσταση $n+1$.
- cs_R σχετίζεται με τον αριθμό των τερματικών των χρηστών των οποίων το RAT αλλάζει κατά τη μετάβαση από την κατάσταση n στην κατάσταση $n+1$.
- cs_Q σχετίζεται με τον αριθμό των βημάτων αύξησης/ελάττωσης των επιπέδων QoS κατά τη μετάβαση από την κατάσταση n στην κατάσταση $n+1$.

Ομοίως, η σχέση (3.5) περιγράφει το συνολικό κόστος αναδιάρθρωσης, σαν το άθροισμα των ανωτέρω 3 συνιστωσών, με το συνυπολογισμό των καταλλήλων βαρών.

$$cs_{reconf}(n \rightarrow n+1) = w_1 \cdot cs_T + w_2 \cdot cs_R + w_3 \cdot cs_Q \quad (3.5)$$

όπου w_1 , w_2 και w_3 είναι τα βάρη που θα μπορούσαν να ρυθμιστούν καταλλήλως από τον εκάστοτε πάροχο, αναλόγως της στρατηγικής σημασίας που αποδίδει σε αυτά. Αυτός ο υπολογισμός των βαρών θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής ενασχόλησης, ενώ στη συνέχεια της παρούσης διατριβής θα τεθούν ίσα με τη μονάδα.

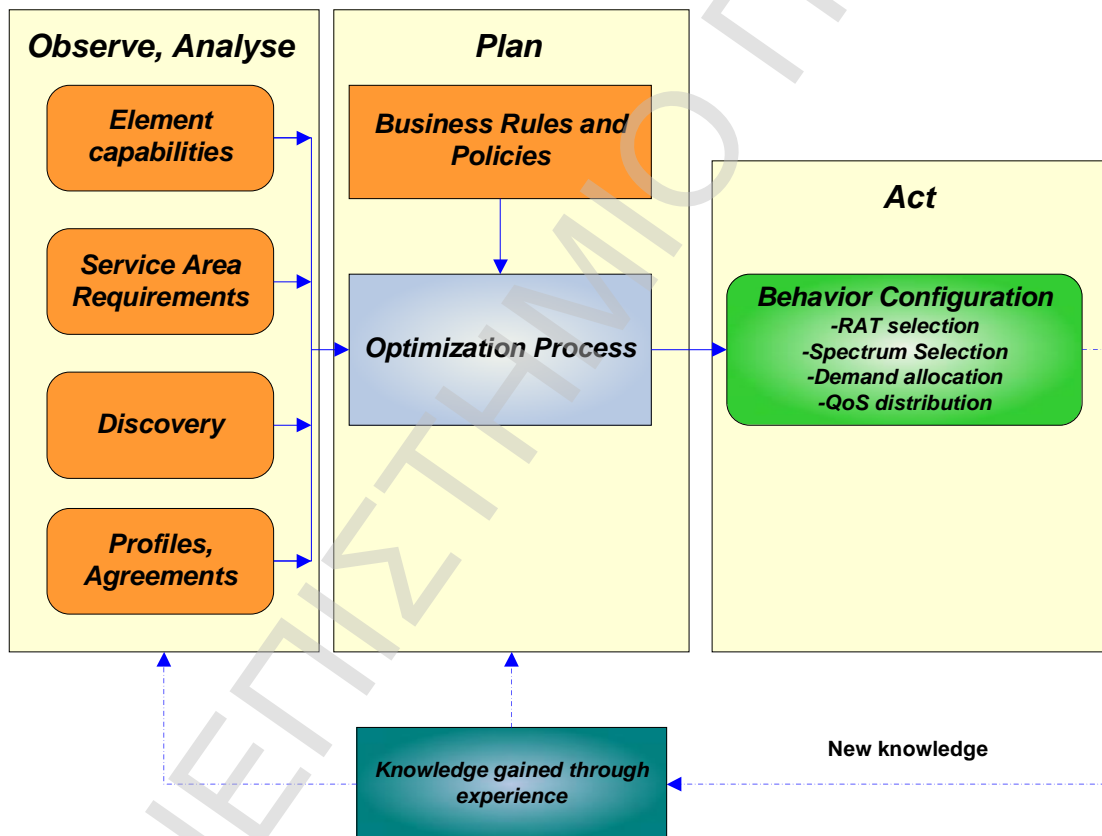
3.7 Δυνατότητες ενσωμάτωσης του στοιχείου της «γνώσης»

Η μέθοδος επίλυσης του προβλήματος που παρουσιάστηκε στο παρόν κεφάλαιο, ως προς την ικανότητα ενός δυναμικά αναδιαρθρούμενου στοιχείου δικτύου να προσαρμόζεται στις εκάστοτε συνθήκες / απαιτήσεις του περιβάλλοντος, μπορεί να εμπλουτιστεί με το στοιχείο της γνώσης. Αυτό θα επιτευχθεί με χρήση τεχνικών μάθησης, όπως αυτή που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.5, ωστόσο προκύπτει εύλογα το ερώτημα «ποιές πληροφορίες πρέπει να διατηρεί το δίκτυο ώστε να αποκτήσει γνώση εξ'αυτών».

Θυμίζουμε εδώ τον κύκλο λειτουργίας των cognitive δικτύων που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 1.5 και προσαρμόζουμε καταλλήλως το Σχήμα 3-1 στις εδώ ανάγκες, ώστε να ενσωματώσει το στοιχείο της γνώσης. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 3-7.

Πληροφορίες σχετικές με τις απαιτήσεις του περιβάλλοντος και της προβληματικής κατάστασης που αντιμετωπίζει το δίκτυο, μπορούν να αποκτηθούν από αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον (διαδικασία παρακολούθησης – monitoring). Επί παραδείγματι, το στοιχείο

δικτύου θα μπορούσε να γνωρίζει (από παρελθούσες καταστάσεις) ότι κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης ώρας της ημέρας, μια υπηρεσία θα ήταν καλύτερο να παρέχεται από ένα δεδομένο RAT (πχ, οι υπηρεσίες δεδομένων ζητούνται περισσότερο τις απογευματινές – βραδινές ώρες και γνωρίζουμε ότι παρέχονται αποτελεσματικότερα από κάποιες τεχνολογίες από ό,τι από άλλες). Εναλλακτικά, το δίκτυο θα μπορούσε να γνωρίζει ότι κάποιες απαιτήσεις της κίνησης μια δεδομένη στιγμή ή σε μια δεδομένη περιοχή (hot-spot) που παρατηρούνται συχνά, περιορίζουν τους ρυθμούς μετάδοσης ή τα μέγιστα επίπεδα ισχύος μέσα στο στοιχείο. Έτσι, το εν λόγω στοιχείο θα ενεργούσε τα δέοντα, εάν είχε στη διάθεσή του τέτοιες πληροφορίες.



Σχήμα 3-7: RAT and Spectrum Selection σε cognitive περιβάλλον

Σχετικά με τα προφίλ των χρηστών, η γνώση θα μπορούσε να προέρχεται από τον όγκο επαγγελματικής μορφής χρηστών που απαιτεί συνήθως εξειδικευμένες εφαρμογές με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, οι οποίοι παρέχονται καλύτερα από συγκεκριμένο. Αντίστοιχα, και τα προφίλ (δυνατότητας) των τερματικών συσκευών μπορούν να καταστούν ε των προτέρων

εκμεταλλεύσιμες, εάν τις γνωρίζουμε και να οδηγηθούμε ταχέως στον καθορισμό πολλών σχετικών παραμέτρων.

Τέλος, χαρακτηριστικά γνωσιακής φύσεως θα μπορούσαν να εκτείνονται μέχρι της περιοχής καθορισμού των πολιτικών. Για παράδειγμα, η μέθοδος που παρουσιάστηκε μπορεί να διατηρεί στοιχεία σχετικά με τις πολιτικές των ΝΟ, τις οποίες και θα ενημερώνει συχνά. Οι ενημερώσεις αυτές πραγματοποιούνται από τον ΝΟ, ο οποίος και είναι υπεύθυνος για την απόφαση σχετικά με την καταλληλότητα κάποιας πολιτικής για την αντιμετώπιση των εκάστοτε προβλημάτων.

3.8 Συμπεράσματα - Προοπτικές

Οι τηλεπικοινωνιακές υποδομές της επόμενης γενιάς θα δύνανται να αναδιαρθρώνονται, υπό τη μορφή της επιλογής (ίσως αλλαγής) των καταλληλότερων RATs και του απαιτούμενου φάσματος (RAT and Spectrum Selection), ώστε να προσαρμόζονται ταχέως, αποτελεσματικώς και με διαφάνεια στις επιταγές του περιβάλλοντος.

Οι αποφάσεις αναδιάρθρωσης απαιτούν το σχεδιασμό και υλοποίηση έξυπνων μεθόδων, μια από τις οποίες (που λειτουργεί ανεξαρτήτως RAT) παρουσιάστηκε στα πλαίσια του παρόντος κεφαλαίου, σαν κομμάτι της οικογένειας αλγορίθμων DNPM που μπορεί να σχεδιάσει και να διαχειριστεί ένα B3G δίκτυο. Η μέθοδος μοντελοποιήθηκε μαθηματικά, συσχετίστηκε με τις προταθείσες στρατηγικές μάθησης για την εκτίμηση των δυνατοτήτων των δυνατών διαρθρώσεων και επιλύθηκε με το σχεδιασμό του κατάλληλου αλγορίθμου.

Πρέπει να τονιστεί και πάλι η διττή φύση του αλγορίθμου RAT and Spectrum Selection, καθώς στη γενική του μορφή επιτρέπει την ενσωμάτωση τεχνολογιών που βρίσκονται υπό ανάπτυξη ή θα σχεδιαστούν τα επόμενα χρόνια, ενώ παράλληλα είναι πλήρως εφαρμόσιμος σε σημερινά εμπορικά δίκτυα.

Πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις για έρευνα μπορούν να περιλάβουν τα εξής:

- Η ενσωμάτωση αρχών αυτόνομης υπολογιστικής, με στόχο την πλήρη ανεξαρτητοποίηση του προβλήματος και από οποιονδήποτε παράγοντα συσχέτισης κυρίως ανάμεσα σε παρακείμενα στοιχεία δικτύου. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί με τη δημιουργία κάποιου αυτόνομου διαχειριστή που θα περιλαμβάνει πολιτικές, δυνατότητες κατανόησης των απαιτήσεων του περιβάλλοντος, εξελιγμένες στρατηγικές μάθησης και αλγορίθμους, κλπ.

- Η αντίθετη ακριβώς κατεύθυνση είναι επίσης επιθυμητή, δηλαδή ο εμπλουτισμός του κατανομημένου σχήματος με μια περισσότερο συγκεντρωτική βαθμίδα ελέγχου των διαρθρώσεων για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των διαρθρώσεων, μέσω προληπτικών ελέγχων των επιπτώσεων από μια πιθανή επιλογή τους.
- Η εκμετάλλευση του RAT and Spectrum Selection αλγορίθμου από μέρους των NOs για τη βελτίωση των προσφερομένων υπηρεσιών και την αύξηση της ευελιξίας τους, με στόχο πάντα τη βελτίωση της θέσης τους στην αγορά.

3.9 Βιβλιογραφία

- [1] K. Tsagkaris, G. Dimitrakopoulos, P. Demestichas, A. Saatsakis, "Distributed Radio Access Technology Selection for Adaptive Networks in High-Speed, B3G Infrastructures", *International Journal of Communication Systems*, October 2007.
- [2] G.Dimitrakopoulos, K.Tsagkaris, K.Demestichas, E.Adamopoulou, P.Demestichas, "Management Schemes for Distributed Cross-Layer Reconfigurations in the Context of Cognitive B3G Infrastructures", submitted for publication to Elsevier Computer Communications journal.
- [3] P. Demestichas, G. Dimitrakopoulos, K. Moessner, T. Dodgson, D. Bourse (editors), "Reconfigurability", *Technologies for the Wireless Future: Wireless World Research Forum (WWRF)*, Vol. 2, WILEY, 2006, ISBN: 0-470-02905-6.
- [4] Software Defined Radio Forum (SDRF) Web site, www.sdrforum.org, 2007.
- [5] M.Gandetto, A.Cattoni, C. Regazzoni, "A distributed approach to mode identification and spectrum monitoring for cognitive radios", in Proc. Software Defined Radio (SDR' 05) Technical Conference, Anaheim, USA, November 2005.
- [6] R.E.Neapolitan, "Learning Bayesian Networks – Series in Artificial Intelligence" , Prentice Hall, 2002.
- [7] J. Kephart, D. Chess, "The vision of autonomic computing", *IEEE Computer*, Vol. 36, No.1, pp. 41-50, January 2003
- [8] P.Demestichas, D.Bosovic, V.Stavroulaki, Al Lee, J.Strassner, "ATLAS: Autonomic management platform for seamless cognitive wireless connectivity", submitted for publication to the *IEEE Commun. Mag.*
- [9] J. Strassner, "Policy-based network management", Morgan Kaufmann Publishers. U.S.A., 2005.
- [10] J.Strassner, "Autonomics – A critical and innovative component of seamless mobility", Technical Report, http://www.motorola.com/mot/doc/5/5978_MotDoc.pdf, Motorola, Dec. 2005.
- [11] J. Mitola III, G. Maguire Jr. "Cognitive radio: making software radios more personal", *IEEE Personal Commun.*, Vol. 6, No 4 , pp13 -18, August 1999.
- [12] J.Mitola III, "Software radio architecture: a mathematical perspective", *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, Vol. 17, No. 4, pp. 514 – 538, April 1999.

- [13] P.Leaves, K.Moessner, R.Tafazolli, D.Grandblaise, D.Bourse, R.Tonjes, M.Breveglieri, "Dynamic spectrum allocation in composite reconfigurable wireless networks", IEEE Commun. Mag., Vol. 42, No. 5, pp. 72-81, May 2004.
- [14] A.Mas-Colell, "Microeconomics", Oxford University Press, U.K., 1995.
- [15] J.Tirole, "The Theory of industrial organization", MIT Press, Cambridge, Mass., U.S.A., 1998.
- [16] FP5/IST project MONASIDRE (Management of Networks and Services in a Diversified Radio Environment), www.monasidre.com, 2003.
- [17] P.Demestichas, G.Vivier, G.Martinez, L.Papadopoulou, V.Stavroulaki, F.Galliano, M.Theologou, "Wireless beyond 3G: managing services and network resources", IEEE Computer, Vol. 35, No. 8, pp. 96-98, 2002.
- [18] P.Demestichas, V.Stavroulaki, L.Papadopoulou, A.Vasilakos, M.Theologou, "Service configuration and traffic distribution in composite radio environments", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Journal, vol. 33, No. 4, pp. 69-81, Nov. 2003.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ "RAT AND SPECTRUM SELECTION" ΣΕ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΑ

Περίληψη:

Ύστερα από την παρουσίαση των αλγορίθμων RAT and Spectrum Selection, το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει διάφορα πιθανά σενάρια εφαρμογής τους σε καταστάσεις προσομοιωμένων δικτύων και τα προκύπτοντα αναλυτικά αποτελέσματα, που καταδεικνύουν την ορθότητα των ισχυρισμών του προηγούμενου κεφαλαίου. Τμήματα του παρόντος κεφαλαίου έχουν δημοσιευτεί στα άρθρα [1][2][3].

4.1 Εισαγωγή

Ύστερα από την παρουσίαση των αλγορίθμων που ανήκουν στην κατηγορία RAT and Spectrum Selection, το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει αναλυτικά αποτελέσματα από την εφαρμογή των αλγορίθμων για την επίλυση καθενός εκ των προαναφερθέντων προβλημάτων, ήτοι:

- Της γενικής μορφής του, που θεωρεί ως διάρθρωση του δικτύου γενικά το ζεύγος (r, f) και επιλύεται με τη γενικευμένη μορφή του αλγορίθμου που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.5. Πιθανά σενάρια εφαρμογής της μεθόδου και ενδεικτικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της περιέχονται στην παράγραφο 4.2
- Της εξειδικευμένης μορφής του που αποσκοπεί στην επίλυση του RDQ-A προβλήματος, που αναφέρεται απλά στην επιλογή του r ως διάρθρωση. Η επίλυση πραγματοποιείται με την αναλυτική μέθοδο που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.6. Διάφορα σενάρια εφαρμογής της μεθόδου σε σημερινά δίκτυα επικοινωνιών (UMTS/WLAN), αλλά και στις επερχόμενες γενιές τους (HSDPA/WiMAX), καθώς επίσης και αναλυτικά αποτελέσματα περιέχονται στην παράγραφο 4.3.

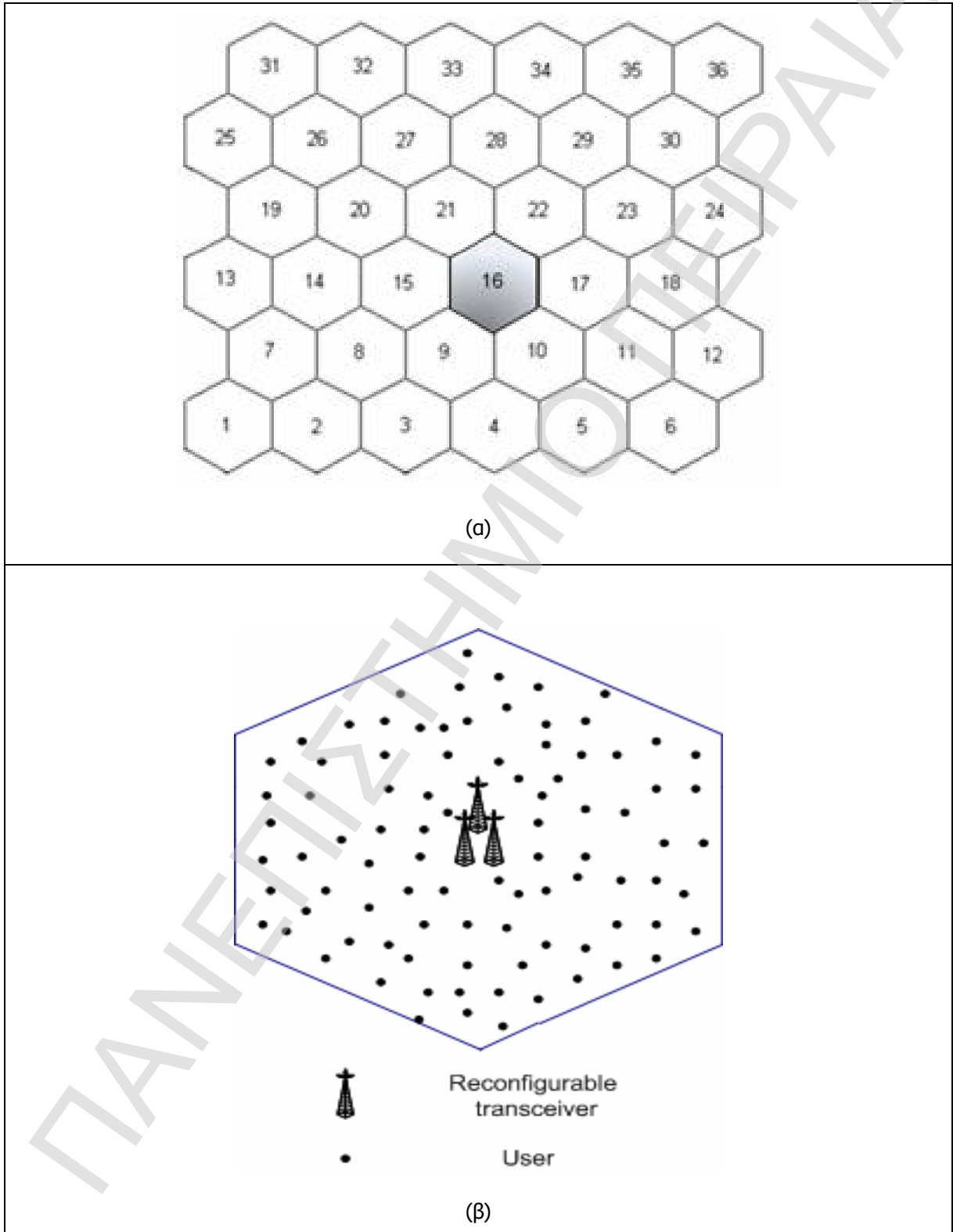
4.2 Γενική μέθοδος RAT and Spectrum Selection – Αποτελέσματα Εφαρμογής

Η παράγραφος αυτή περιέχει αποτελέσματα της εφαρμογής της γενικής μεθόδου επίλυσης που ακολουθεί ο αλγόριθμος RAT and Spectrum Selection, από προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν προς πιστοποίηση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου. Μάλιστα, στα πλαίσια της διατριβής δεν αναλίσκουμε σε παρουσίαση αποτελεσμάτων του πρώτου τμήματος της μεθόδου, αλλά θεωρούμε ότι εφαρμόζοντας αυτό μας είναι ήδη γνωστές οι εκτιμήσεις για τις δυνατότητες κάθε υποψήφιας διάρθρωσης του υπό εξέταση στοιχείου δικτύου και προχωρούμε στην επιλογή της βέλτιστης.

Για το σκοπό αυτό, εξετάζουμε 4 σενάρια, παρουσιάζοντας αρχικά τις εισόδους σε αυτή τη φάση του προβλήματος και εν συνεχεία τα αποτελέσματα των σεναρίων.

4.2.1 Είσοδοι

Απαιτήσεις Περιοχής Εξυπηρέτησης και Ζήτησης.



	<i>Data Sessions</i>		<i>Voice Sessions</i>	
	%	#	%	#
<i>Case1</i>	0	0	100	260
<i>Case2</i>	6	16	94	228
<i>Case3</i>	14	32	86	196
<i>Case4</i>	23	48	77	164
<i>Case5</i>	33	64	67	132
<i>Case6</i>	45	80	55	100
<i>Case7</i>	59	96	41	68
<i>Case8</i>	76	112	24	36
<i>Case9</i>	97	128	3	4

(γ)

	<i>Voice (c1)</i>		<i>Data (c1 or c2)</i>	
	<i>Bit Rate (kbps)</i>	<i>Utility Volume</i>	<i>Bit Rate (kbps)</i>	<i>Utility Volume</i>
<i>QoS levels</i>				
0	16	1	32	2
1			64	4
2			128	8
3			256	16

(δ)

Σχήμα 4-1: (α) Δομή περιοχής εξυπηρέτησης, (β) Περιοχή κάλυψης δυναμικά αναδιαρθρούμενου στοιχείου (τυχαίες τοποθετήσεις χρηστών), (γ) Απαιτήσεις περιοχής εξυπηρέτησης: περιπτώσεις εφαρμογής (cases) για 2 υπηρεσίες, (δ) Προφίλ και συμφωνίες: υπηρεσίες, επίπεδα QoS, χρησιμότητα

Το Σχήμα 4-1 (α) περιγράφει τη δομή μιας περιοχής εξυπηρέτησης που σχηματίζει ένα τμήμα δικτύου. Το τμήμα αυτό αποτελείται από έναν αριθμό reconfigurable στοιχείων, ένα από τα οποία φαίνεται στο Σχήμα 4-1 (β). Τα στοιχεία λειτουργούν εν παραλλήλω. Η συμπεριφορά των στοιχείων σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις της περιοχής εξυπηρέτησης επιτάσσουν

κάποια αναδιάρθρωση στο σκιασμένο στοιχείο, στο οποίο θα επικεντρωθούμε σε αυτή την παράγραφο.

Το Σχήμα 4-1 (γ) περιγράφει τη ζήτηση στην περιοχή του υπό εξέταση στοιχείου. Μελετώνται 9 περιπτώσεις (cases), σε καθεμιά από τις οποίες υπάρχει διαφορετικό φορτίο – συνδυασμός αιτήσεων φωνής και δεδομένων. Αρχικά η ζήτηση κυριαρχείται από την υπηρεσία φωνής, ενώ σταδιακά επέρχεται αύξηση της ζήτησης για δεδομένα και μείωση της ζήτησης για φωνή. Σημειώνουμε ότι οι χρήστες είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι στην περιοχή εξυπηρέτησης.

Δυνατότητες Στοιχείου

Κάθε στοιχείο αποτελείται από 3 δυναμικά αναδιαρθρούμενους πομποδέκτες (Σχήμα 4-1 (β)), καθένας από τους οποίους μπορεί να επιλέξει μεταξύ των διαρθρώσεων (c_1 και c_2), που έχουν προαναφερθεί. Έτσι, συνολικά η διάρθρωση για κάθε στοιχείο θα μπορούσε να είναι επί παραδείγματι (c_1, c_1, c_2), το οποίο υποδηλώνει ότι 2 από τους 3 πομποδέκτες λειτουργούν στην τεχνολογία – διάρθρωση c_1 , ενώ ο τρίτος λειτουργεί με τη c_2 κ.ό.κ. Επιπλέον, δε λαμβάνεται υπόψη η περίπτωση όπου η διάρθρωση c_2 αποδίδεται σε όλους τους πομποδέκτες, διότι θα οδηγούσε σε ακάλυπτες περιοχές μέσα στο στοιχείο.

Διαδικασία Εκτίμησης Δυνατοτήτων που προσφέρει κάθε διάρθρωση

Όπως προαναφέρθηκε, οι διαρθρώσεις c_1 και c_2 έχουν διαφορετικές δυνατότητες ως προς το μέγιστο δυνατό ρυθμό μετάδοσης, 1 ή 2Mbps για τη c_1 , και 4, 7 ή 10Mbps για τη c_2 . Επίσης, υποθέτουμε ότι η c_1 επιτυγχάνει μεγαλύτερη κάλυψη από τη c_2 , ήτοι όσο μεγαλύτερος είναι ο μέγιστος εφικτός ρυθμός μετάδοσης, τόσο μικρότερη είναι η κάλυψη.

Προφίλ και Συμφωνίες

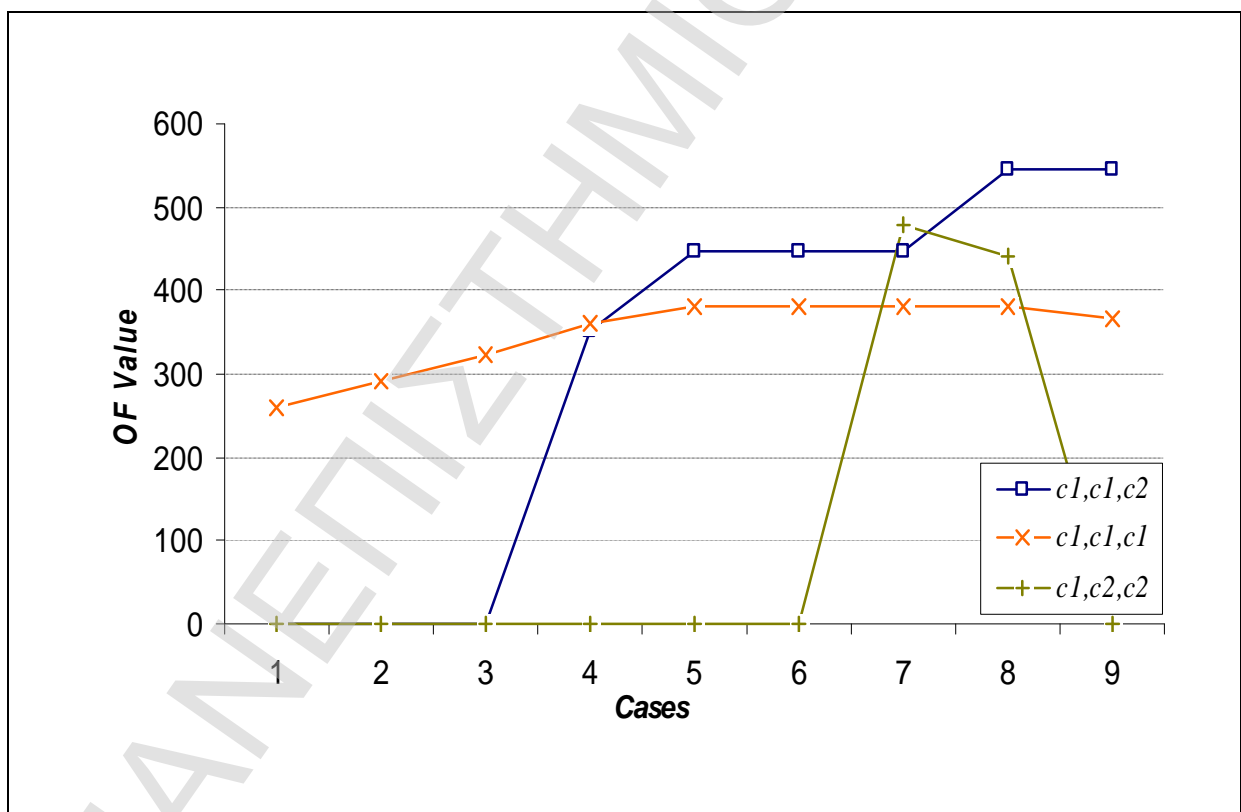
Το σύνολο S_e αποτελείται από 2 υπηρεσίες, μία φωνής (s1) και μία δεδομένων (s2). Για την υπηρεσία φωνής προβλέπεται ένα σταθερό επίπεδο ποιότητας, αλλά για τα δεδομένα

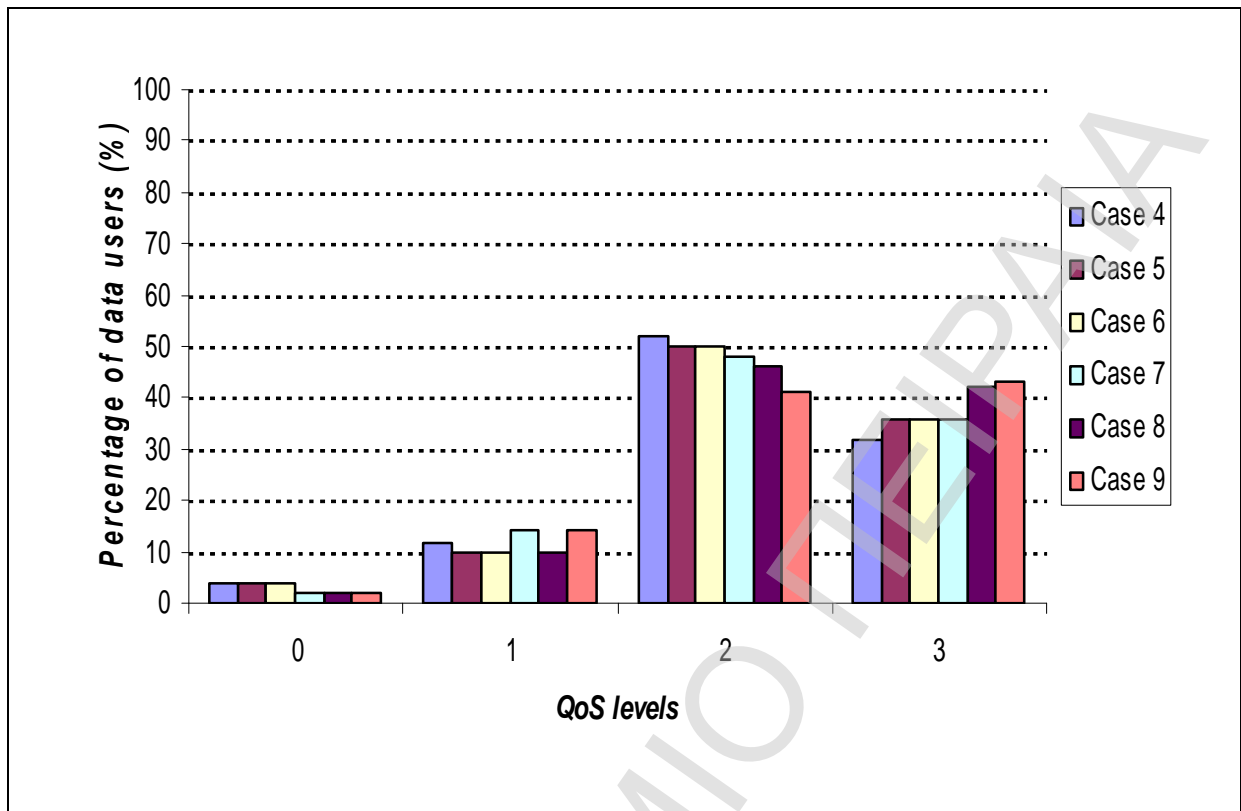
υπάρχουν πολλά δυνατά επίπεδα. Επιπλέον, η s_1 προσφέρεται μόνο μέσω της r_1 (άρα και της διάρθρωσης c_1). Το Σχήμα 4-1 (δ) περιέχει τα αποδεκτά επίπεδα QoS, την προκύπτουσα εξ' αυτών χρησιμότητα, καθώς επίσης και το εύρος ζώνης ανά υπηρεσία.

Εν γένει μπορούμε να κατασκευάσουμε διάφορα σενάρια, συνδυάζοντας τις δυνατότητες των διαφόρων διαρθρώσεων, ώστε να επιλέξουμε τη βέλτιστη διάρθρωση ανά περίπτωση (που να ικανοποιεί καλύτερα τις απαιτήσεις του υπάρχοντος φορτίου). Αυτό επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας τη μέθοδο στις περιπτώσεις (cases) που φαίνονται στο Σχήμα 4-1 (γ).

4.2.2 Σενάριο 1

Υποθέτουμε ότι $abr_e(c_1) = 1$ Mbps και $abr_e(c_2) = 4$ Mbps, τιμές που έχουν προκύψει από τη μέθοδο που περιγράφηκε σε γενικές γραμμές στην παράγραφο 3.4. Έτσι, η κάλυψη του c_1 είναι περίπου 1000m, ενώ του c_2 περίπου 500m.





Σχήμα 4-2: Σενάριο 1 - Αποτελέσματα

Το Σχήμα 4-2 απεικονίζει ενδεικτικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου.

Η διάρθρωση (c_1, c_1, c_1) οδηγεί σε αύξηση της τιμής της OF, με την αύξηση στην εισροή δεδομένων. Αυτό συμβαίνει διότι, παράλληλα μειώνεται το φορτίο φωνής και άρα υπάρχει διαθέσιμη χωρητικότητα για την παροχή υψηλότερων επιπέδων QoS στις επερχόμενες «συνόδους» (sessions) δεδομένων. Στις περιπτώσεις 5-8 η τιμή της OF παραμένει αμετάβλητη, λόγω του ότι η αύξηση που προκύπτει από τη ζήτηση για δεδομένα (και άρα παροχή υψηλών επιπέδων QoS) αντισταθμίζεται από τη μείωση που προκύπτει στη ζήτηση για φωνή. Τελικά, στην περίπτωση 9, η ζήτηση για δεδομένα έχει αυξηθεί τόσο πολύ, ώστε να υπάρχει η ανάγκη μείωσης επιπέδων QoS κάποιων χρηστών σε σύγκριση με την περίπτωση 8, οπότε η OF μειώνεται.

Η συμπεριφορά της (c_1, c_1, c_2) διάρθρωσης είναι παρόμοια. Αρχικά (περιπτώσεις 1-3), η διάρθρωση αυτή αδυνατεί να ικανοποιήσει τη ζήτηση, λόγω του ότι το φορτίο φωνής ξεπερνά τις δυνατότητες 2 c_1 πομποδεκτών. Στην περίπτωση 4 μόλις, η ζήτηση για φωνή

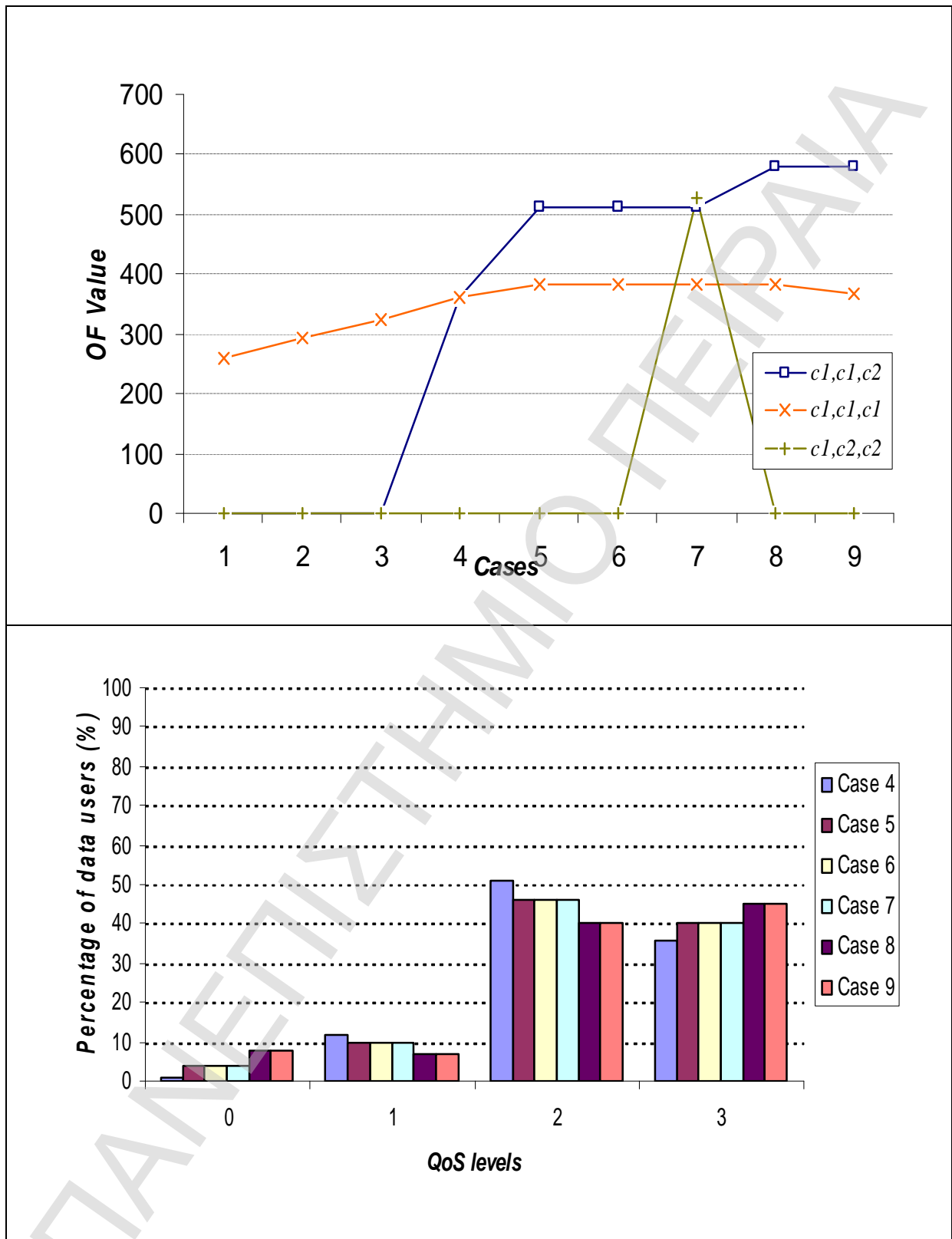
έχει μειωθεί αρκετά ώστε να εξυπηρετείται από 2 πομποδέκτες c_1 . Μάλιστα, η (c_1, c_1, c_2) οδηγεί στην υψηλότερη τιμή της OF εδώ, λόγω της μεγαλύτερης διαθέσιμης χωρητικότητας (από ό,τι στη (c_1, c_1, c_1)), που αρκεί για την παροχή υψηλότερων επιπέδων QoS στα επερχόμενα δεδομένα. Σε κάποιο σημείο η βελτίωση (αύξηση της OF) σταματά, ενώ εν συνεχεία υπάρχει και πάλι η ανάγκη υποβάθμισης κάποιων επιπέδων QoS λόγω της ύπαρξης υπερβολικής ζήτησης για δεδομένα. Στο κάτω τμήμα (στο Σχήμα 4-2) φαίνονται ενδεικτικά τα παρεχόμενα επίπεδα QoS για τη διάρθρωση (c_1, c_1, c_2) .

Τέλος, η (c_1, c_2, c_2) αποδεικνύεται αποδεκτή μόνο σε συγκεκριμένα «μίγματα» φορτίου. Συγκεκριμένα, η προκύπτουσα εξ' αυτής OF είναι «0» μέχρι να μπορούν να εξυπηρετηθούν οι φωνές από έναν πομποδέκτη c_1 . Αυτό πραγματοποιείται στην περίπτωση 7. Στη συνέχεια η (c_1, c_2, c_2) είναι αποδεκτή μόνο μέχρις ότου η ζήτηση για δεδομένα έχει γίνει τόσο μεγάλη που αδυνατεί να εξυπηρετηθεί από την, περιορισμένων δυνατοτήτων ως προς την κάλυψη, c_2 (σημειώνουμε και πάλι ότι υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή των χρηστών μέσα στο στοιχείο).

Συγκρίνοντας τώρα τις εναλλακτικές μας επιλογές, παρατηρούμε ότι στα αρχικά επίπεδα ζήτησης, υπερέχει η διάρθρωση (c_1, c_1, c_1) . Ωστόσο, η αύξηση των δεδομένων συνοδεύεται από μια υπεροχή της (c_1, c_1, c_2) , εξαιτίας της επιπλέον διαθέσιμης χωρητικότητας που επιτρέπει αύξηση των παρεχομένων επιπέδων QoS στα επερχόμενα δεδομένα. Η υπεροχή της (c_1, c_1, c_2) είναι ωστόσο οριακή ως προς τη (c_1, c_1, c_1) . Τέλος, σε συγκεκριμένα μίγματα φορτίου με μικρή ζήτηση για φωνή και μεγάλη για δεδομένα, υπερέχει η (c_1, c_2, c_2) , χάρη στη μεγάλη της διαθέσιμη χωρητικότητα.

4.2.3 **Σενάριο 2**

Σε αυτό το σενάριο υποθέτουμε $abr_e(c_1) = 1$ Mbps και $abr_e(c_2) = 7$ Mbps. Η κάλυψη που παρέχεται από τη c_1 είναι περίπου 1000m, ενώ για τη c_2 περίπου 250m. Το Σχήμα 4-3 περιέχει τα ενδεικτικά αποτελέσματα.



Σχήμα 4-3: Σενάριο 2 – Αποτελέσματα

Η μελέτη της καμπύλης που παρουσιάζει την απόδοση των διαφόρων διαρθρώσεων, οδηγεί σε παρόμοια συμπεράσματα με αυτά του σεναρίου 1.

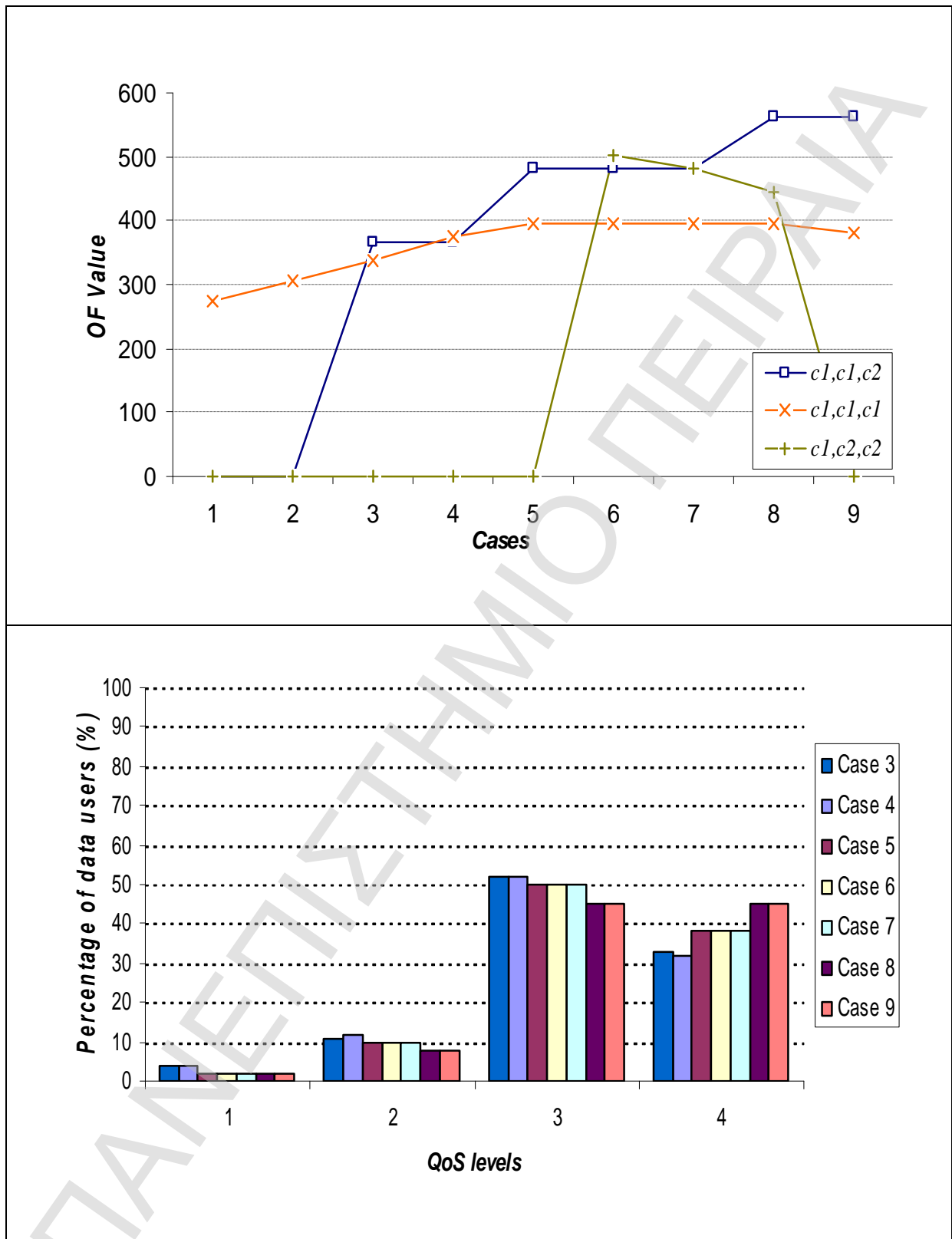
Αναφορικά με τη διάρθρωση (c_1, c_1, c_1) , έχουμε ακριβώς όμοια αποτελέσματα, εφόσον και πάλι $abr_e(c_1) = 1$.

Η (c_1, c_1, c_2) είναι αρχικά ακατάλληλη. Ξεκινώντας από την περίπτωση 4, η επίδοσή της βελτιώνεται, παράλληλα με την αύξηση της ζήτησης για δεδομένα, μέχρις ότου το σύστημα αγγίξει τα όρια της χωρητικότητάς του. Παρά ταύτα, πρέπει να σημειωθεί ότι η (c_1, c_1, c_2) οδηγεί τώρα σε υψηλότερες τιμές της OF σε σύγκριση με το σενάριο 1, λόγω του ότι $abr_e(c_2) = 7$ Mbps. Και πάλι, η διάρθρωση (c_1, c_2, c_2) δεν οδηγεί σε αποτελέσματα αρχικά και αποδεικνύεται γενικώς κατάλληλη μόνο εφόσον η ζήτηση για φωνή έχει μειωθεί αρκετά ώστε να εξυπηρετηθεί από 1 πομποδέκτη c_1 . Επίσης, η (c_1, c_2, c_2) αποδίδει τώρα καλύτερα (στην περίπτωση 7) από ο,τι στο σενάριο 1 (λόγω υψηλότερης $abr_e(c_2)$), αλλά αποδεικνύεται ακατάλληλη αμέσως μετά, λόγω της περιορισμένης δυνατότητας κάλυψης που αδυνατεί να εξυπηρετήσει την ομοιόμορφα κατανομημένη ζήτηση για δεδομένα.

Σε γενικές γραμμές, συγκρίνοντας τις διαθέσιμες σιαρθρώσεις, βλέπουμε ότι αρχικά η (c_1, c_1, c_1) υπερέχει. Με την αύξηση των δεδομένων αρχίζει να υπερέχει η (c_1, c_1, c_2) , με υπεροχή σημαντική ωστόσο σε σχέση με την (c_1, c_1, c_1) . Επιπλέον, η (c_1, c_2, c_2) υπερέχει έναντι των λοιπών διαρθρώσεων μόνο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις (case 7).

4.2.4 Σενάριο 3

Το σενάριο αυτό υποθέτει ότι $abr_e(c_1) = 2$ Mbps και $abr_e(c_2) = 4$ Mbps. Η κάλυψη έτσι της c_1 είναι περίπου διπλάσια της c_2 . Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου σε αυτό το σενάριο απεικονίζονται γραφικά στο Σχήμα 4-4.



Σχήμα 4-4: Σενάριο 3 – Αποτελέσματα

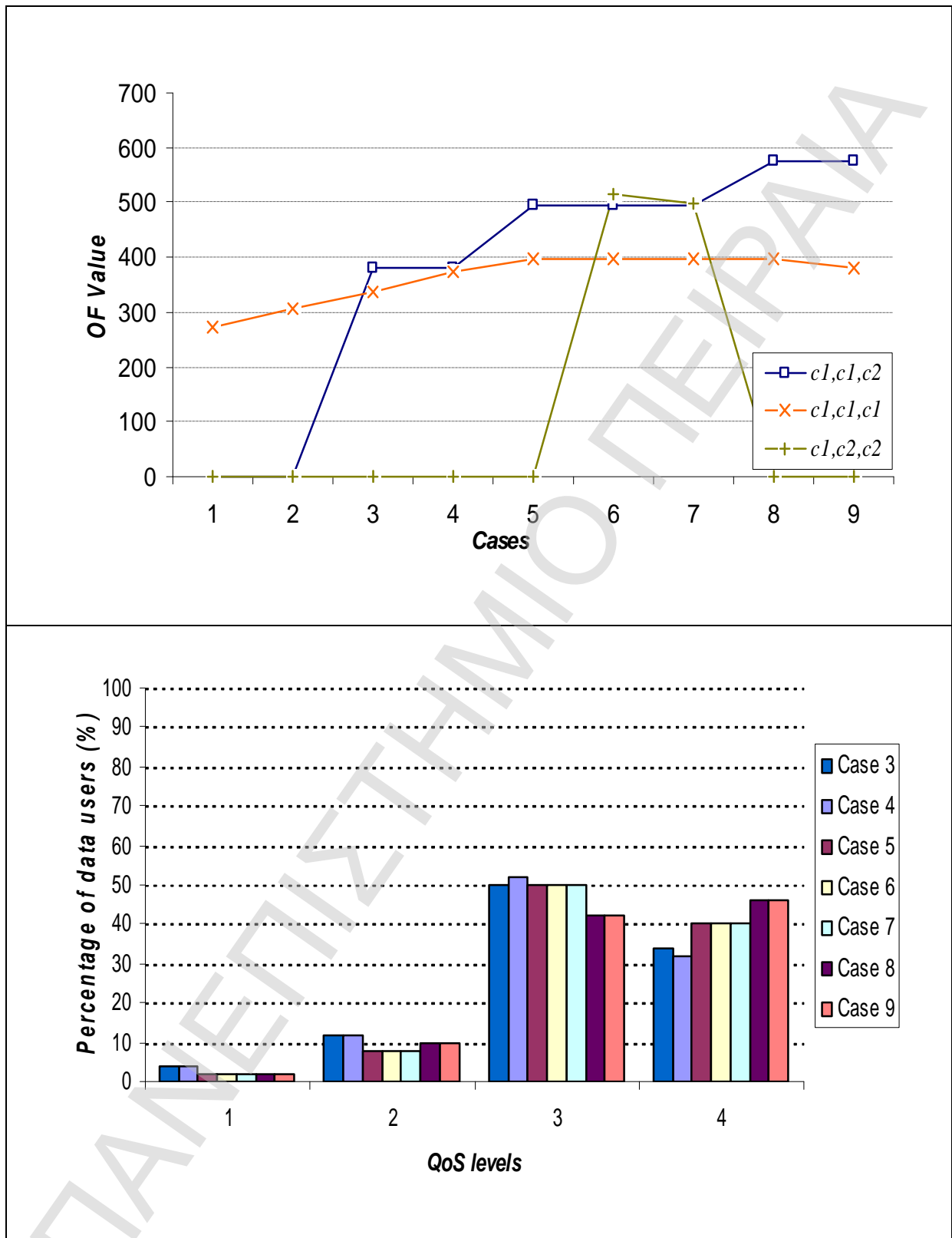
Εξετάζοντας την (c_1, c_1, c_1) αρχικά, παρατηρούμε αποτελέσματα παρόμοιας λογικής με τα προηγούμενα σενάρια, με την υποσημείωση ότι τώρα $abr_e(c_1) = 2$ Mbps, οπότε έχουμε υψηλότερες τιμές για την OF και άρα ικανοποίηση των αναγκών των χρηστών με αποτελεσματικότερο τρόπο. Σχετικά με την (c_1, c_1, c_2) , είναι επιλέξιμη μόνο μετά την περίπτωση 3, αφού η χωρητικότητα των 2 πομποδεκτών c_1 είναι τώρα μεγαλύτερη και καθίσταται ικανή να εξυπηρετήσει τη ζήτηση για φωνές νωρίτερα από ό,τι προηγουμένως.

Τέλος, η (c_1, c_2, c_2) είναι ακόμα κατάλληλη σε εξαιρετικά συγκεκριμένες περιπτώσεις, ήτοι στις περιπτώσεις 6, 7 και 8, όπου, από τη μία πλευρά η ζήτηση για φωνές μπορεί να εξυπηρετηθεί από 1 πομποδέκτη c_1 , ενώ η ζήτηση για δεδομένα πέφτει μέσα στην περιοχή κάλυψης κάθε πομποδέκτη c_2 . Όπως μάλιστα αναμέναμε, η καμπύλη μετακινείται προς τα αριστερά σε σύγκριση με τα σενάρια 1 και 2 (όπου $abr_e(c_1) = 1$ Mbps), δεδομένου ότι μόνο 1 πομποδέκτης c_1 δύναται να εξυπηρετήσει μεγαλύτερη ζήτηση για φωνή από ό,τι προηγουμένως.

Η σύγκριση ανάμεσα στις διαθέσιμες διαρθρώσεις δείχνει και πάλι μια υπεροχή της (c_1, c_1, c_1) στα αρχικά φορτία. Όσο όμως τα δεδομένα αυξάνονται, διαπιστώνουμε μια σημαντική υπεροχή της (c_1, c_1, c_2) και μάλιστα πιο έντονη από ό,τι στα πρώτα 2 σενάρια, λόγω μεγαλύτερης χωρητικότητας της c_1 . Τέλος, η (c_1, c_2, c_2) υπερισχύει έναντι των υπολοίπων μόνο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις (6 και 7).

4.2.5 **Σενάριο 4**

Το τελευταίο μας σενάριο υποθέτει ότι $abr_e(c_1) = 2$ Mbps και $abr_e(c_2) = 7$ Mbps. Έτσι, η κάλυψη της c_1 είναι περίπου τριπλάσια αυτής της c_2 . Τα αποτελέσματα του σεναρίου αυτού απεικονίζονται στο Σχήμα 4-5.



Σχήμα 4-5: Σενάριο 4 - Αποτελέσματα

Εξετάζοντας αρχικά τη διάρθρωση (c_1, c_1, c_1) , καταλήγουμε ακριβώς στα ίδια αποτελέσματα με το σενάριο 3, εφόσον $abr_e(c_1) = 2$ Mbps. Σχετικά με τη (c_1, c_1, c_2) , η αρχική της επίδοση (αποδεκτή μόνο μετά την περίπτωση 3), αυξάνεται με την αύξηση της ζήτησης για δεδομένα, χρησιμοποιώντας και τα 2 «είδη» πομποδεκτών (c_1 και c_2) για την παροχή υψηλότερων επιπέδων QoS. Τέλος, η (c_1, c_2, c_2) είναι και πάλι εξετάσιμη μόνο σε πολύ συγκεκριμένες περιπτώσεις φορτίου και μάλιστα στις 6 και 7 για το σενάριο αυτό.

4.3 RAT and Spectrum Selection – Αποτελέσματα επίλυσης προβλήματος RDO-A

4.3.1 Εισαγωγή

Αυτή η παράγραφος χρησιμοποιεί 3 διαφορετικά σενάρια για να εκτιμήσει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου RAT and Spectrum Selection, στην περίπτωση που καλείται να αντιμετωπίσει ρεαλιστικές καταστάσεις με εμπορικά RATs, ήτοι να επιλύσει το πρόβλημα RDO-A. Τα σενάρια διαφοροποιούνται ως προς τη φύση του δικτύου, με τη λογική ότι τα πρώτα δύο περιλαμβάνουν ένα όπου λειτουργούν ως RATs τα UMTS και WLAN, είτε με κανονικές συνθήκες φορτίου είτε με υπερβολικό φορτίο, ενώ το τρίτο σενάριο θεωρεί τη χρήση HSDPA/WiMAX από τους διαθέσιμους πομποδέκτες.

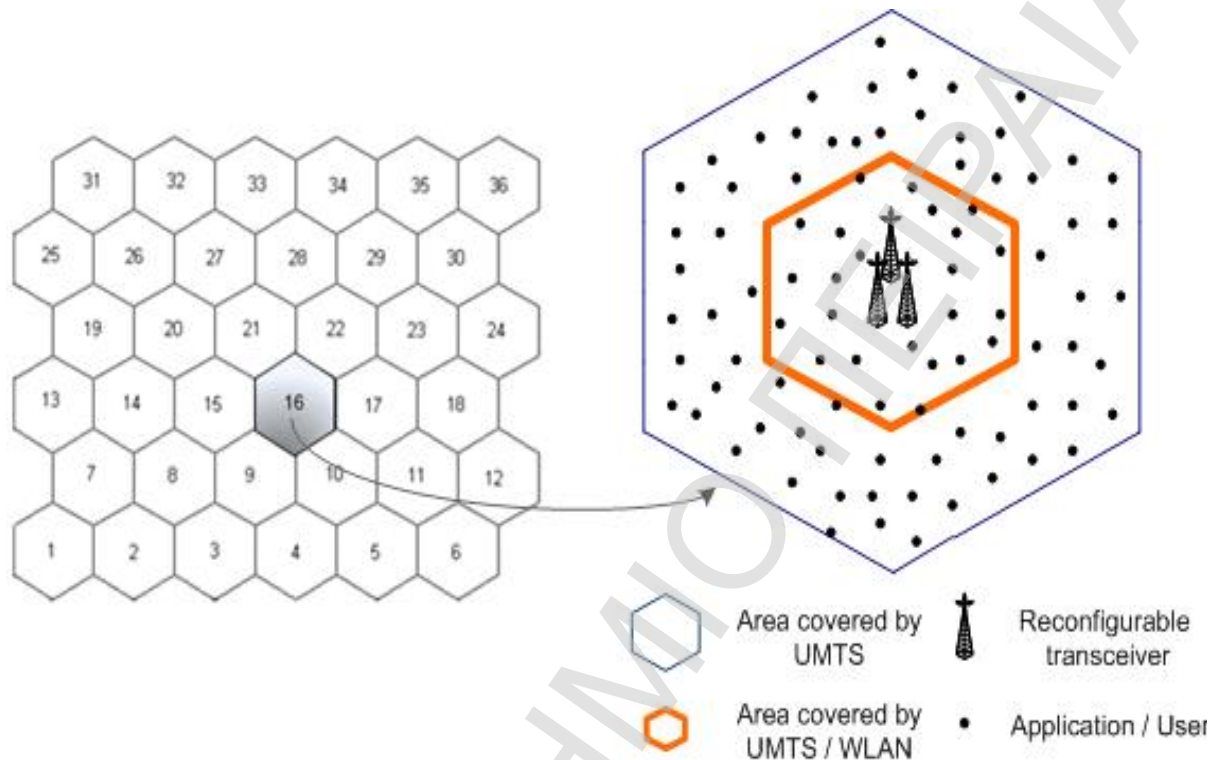
4.3.2 UMTS–WLAN δίκτυο: Κανονικό Φορτίο

Εισαγωγικά Στοιχεία

Το πρώτο σενάριο είναι μεν μικρής κλίμακας, αλλά μας προσδίδει σημαντικές πληροφορίες για τα αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα που προέρχονται από την προσαρμοστική φύση των γνωσιακών δικτύων, σε ανταπόκριση των επιταγών του περιβάλλοντος. Προς επιβεβαίωση αυτών θεωρούμε μια απλή περιοχή εξυπηρέτησης, με δομή όπως αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 4-6.

Η συνολική περιοχή αποτελείται από έναν αριθμό κυψελών (στοιχείων δικτύου), ενώ θεωρούμε ένα τυχόν στοιχείο που αντιμετωπίζει κάποιο πρόβλημα υψηλού φορτίου, οπότε και απαιτείται κάποιας μορφής προσαρμογή του στις νέες αυτές συνθήκες. Το παραπάνω αποτελεί το έναυσμα για αναδιάρθρωση του εν λόγω στοιχείου. Με τον όρο αναδιάρθρωση

εννοούμε την επιλογή του καταλληλότερου RAT προς λειτουργία, η οποία και συνοδεύεται από την κατανομή της κίνησης στους πομποδέκτες, αλλά και τον καθορισμό των επιπέδων υπηρεσίας που θα παρασχεθούν.



Σχήμα 4-6: Δίκτυο UMTS-WLAN: Διάταξη Περιοχής Εξυπηρέτησης

Στα πλαίσια της παραγράφου επικεντρώνουμε την προσοχή μας στο εν λόγω προβληματικό στοιχείο, ώστε να επιλύσουμε το πρόβλημα με τρόπο κατανομημένο. Επομένως, αγνοούνται θέματα διαχείρισης φάσματος ώστε να αποφευχθούν παρεμβολές, ενώ την ίδια στιγμή αγνοούνται και τυχόν συμφωνίες συνεργασίας μεταξύ των διαφόρων παρόχων.

Το στοιχείο μας αποτελείται από ένα σταθμό βάσης, όπου βρίσκονται εν λειτουργία 3 reconfigurable πομποδέκτες, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν είτε σε τεχνολογία *UMTS* είτε σε *WLAN (802.11b)*. Με αυτή τη λογική, η περιοχή που περικλείεται από το εσωτερικό εξάγωνο χρώματος πορτοκαλί καλύπτεται είτε από το *UMTS* είτε από το *WLAN*, ενώ η απομένουσα εξωτερική περιοχή μιας κυψέλης καλύπτεται μόνο από το *UMTS*. Για το μεν *UMTS* θεωρούμε το 0.6 ως μέγιστη επιτρεπτή τιμή του παράγοντα φόρτωσης, ενώ για το *WLAN (IEEE 802.11)* υποθέτουμε μια μέγιστη χωρητικότητα ίση με 5.5Mbps.

Το σύνολο των προσφερομένων υπηρεσιών αποτελείται από 2 υπηρεσίες. Μια υπηρεσία φωνής (s_1) και μία δεδομένων (s_2). Η υπηρεσία φωνής προσφέρεται μόνο μέσω του UMTS και αντιστοιχεί σε ένα επίπεδο QoS, ενώ η υπηρεσία δεδομένων προσφέρεται σε πολλά διαφορετικά επίπεδα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-7.

	UMTS				WLAN			
	Voice		Data		Voice		Data	
QoS Levels	Bit Rate (kbps)	Utility volume	Bit Rate (kbps)	Utility volume	Bit Rate (kbps)	Utility volume	Bit Rate (kbps)	Utility volume
0	16	1	32	2	-	-	32	2
1	-	-	64	4	-	-	64	4
2	-	-	128	8	-	-	128	8
3	-	-	-	-	-	-	256	16

Σχήμα 4-7: Εύρος ζώνης, επίπεδα QoS και χρησιμότητα

Στο Σχήμα 4-7 παρατίθενται οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης ανά υπηρεσία, τα προσφερόμενα επίπεδα QoS, καθώς επίσης και η χρησιμότητα που προέρχεται από την παροχή μιας υπηρεσίας σε ένα δεδομένο επίπεδο ποιότητας.

Για τη μοντελοποίηση της ζήτησης κανονικά απαιτούνται εκτεταμένες πληροφορίες monitoring (βλέπε παράγραφο 2.4). Εδώ αντίθετα υποθέτουμε ότι αναφερόμαστε σε μια τυχαία μεταβλητή με κάποιο διάστημα εμπιστοσύνης και άρα παρακάτω παίρνουμε μια μέση τιμή για τη ζήτηση ανά περίπτωση. Έτσι, η αρχική ζήτηση εντός του στοιχείου αποτελείται από 90 ενεργές αιτήσεις για φωνή και δεδομένα (sessions). Η μέθοδος εφαρμόζεται για 6 διαφορετικές περιπτώσεις (cases), όπου οι σύνοδοι είναι ομοιόμορφα κατανομημένες μέσα στην κυψέλη. Καθεμιά εκ των 6 περιπτώσεων αντιστοιχεί σε ένα διαθετικό συνδυασμό - αριθμό συνόδων φωνής και δεδομένων (μετά από στρογγυλοποίηση οπότεν απαραίτητο), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-8.

	<i>Data</i>		<i>Voice</i>	
	<i>%</i>	<i>sessions</i>	<i>%</i>	<i>sessions</i>
<i>Case1</i>	0	0	100	90
<i>Case2</i>	10	8	90	74
<i>Case3</i>	22	16	78	58
<i>Case4</i>	36	24	64	42
<i>Case5</i>	55	32	45	26
<i>Case6</i>	80	40	20	10

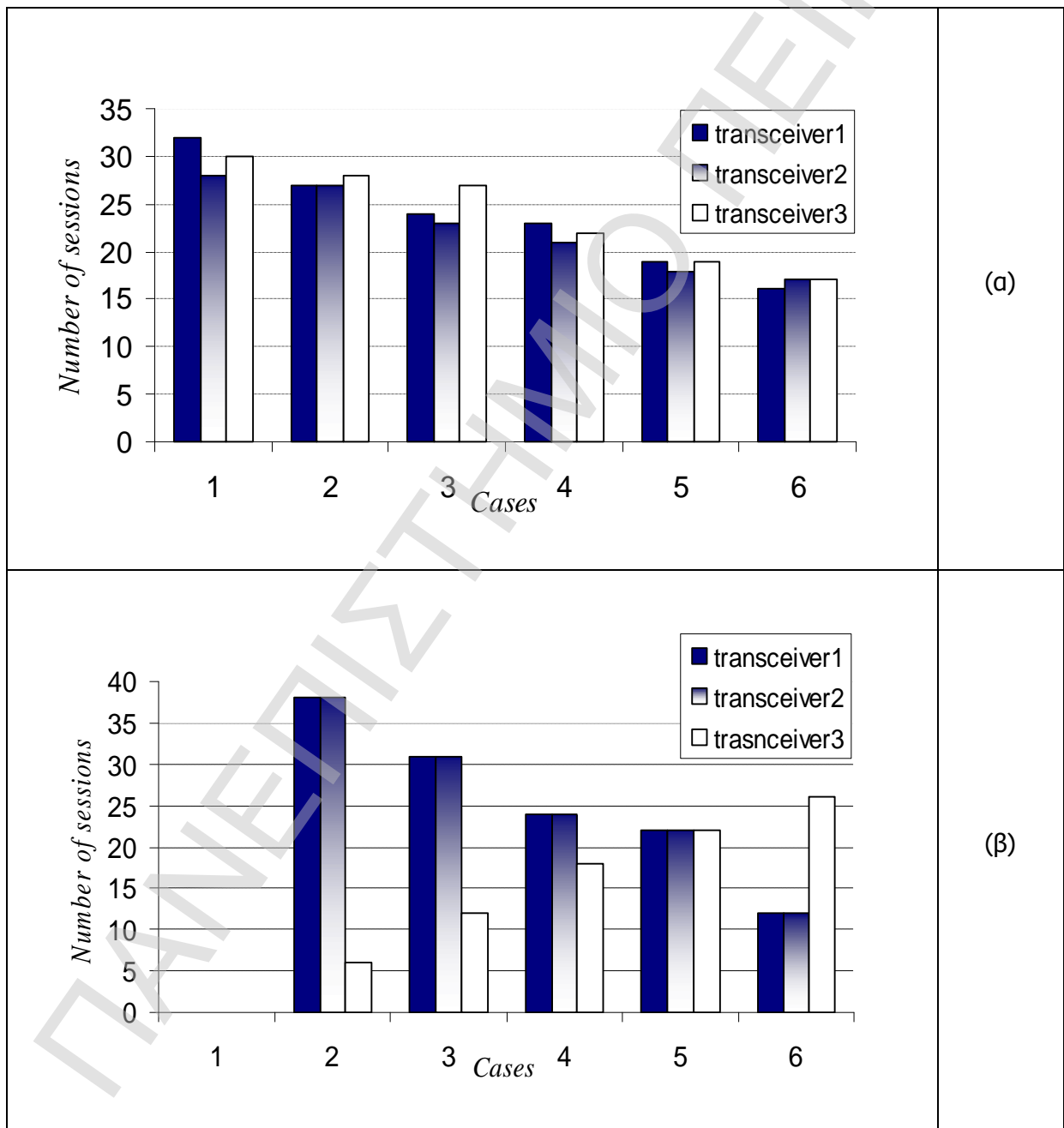
Σχήμα 4-8: UMTS–WLAN δίκτυο: Κανονικό Φορτίο - Περιπτώσεις Εφαρμογής της Μεθόδου

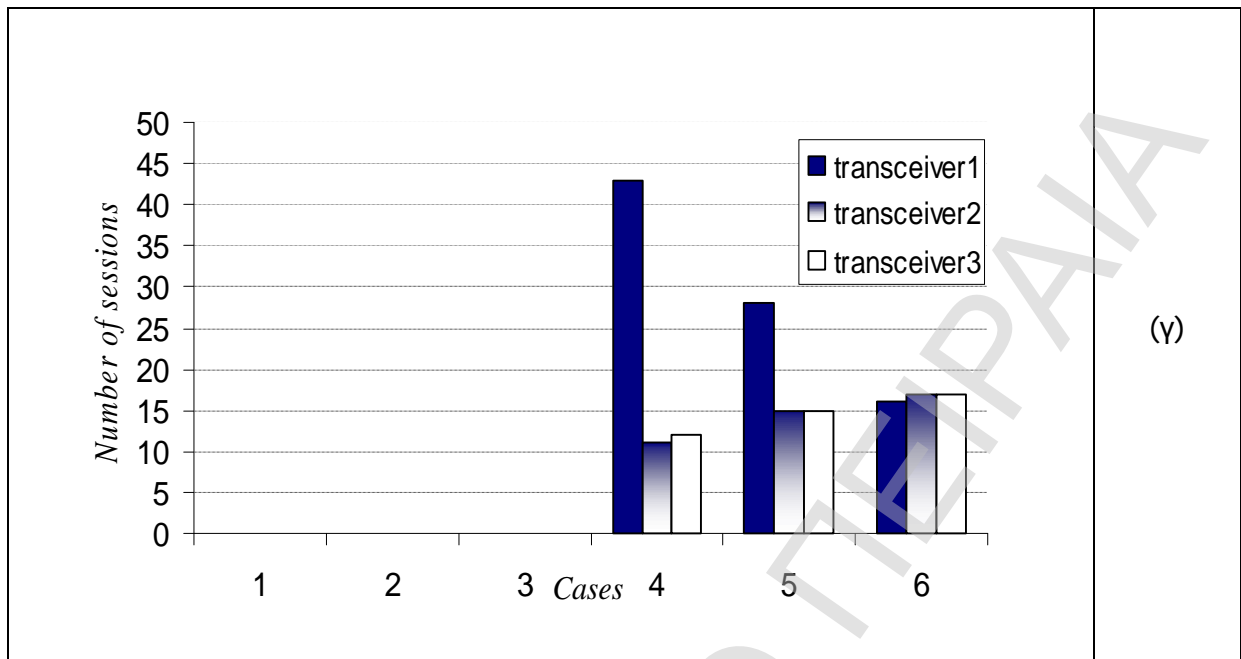
Κατανομή A_{TC}

Όπως έχει ήδη αναλυθεί, κατά την πρώτη φάση της μεθόδου επίλυσης, το πρόβλημα διασπάται σε υποπροβλήματα, που αντιστοιχούν στις διάφορες κατανομές A_{RT} . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο συμβολισμός UUU να δηλώνει την περίπτωση και οι 3 πομποδέκτες να λειτουργούν με UMTS. Ομοίως, ο συμβολισμός UUU υποδηλώνει ότι 2 από τους 3 διαθέσιμους πομποδέκτες της κυψέλης λειτουργεί με UMTS και ο εναπομείναν με WLAN. Αντίστοιχα εξηγούνται και οι υπόλοιποι συμβολισμοί «διάρθρωσεων» ως προς τις τεχνολογίες λειτουργίας των πομποδεκτών. Έτσι, τα προκύπτοντα υποπροβλήματα είναι $|R|^{|Z|} = 8$. Ωστόσο, υποθέτοντας ότι όλοι οι πομποδέκτες έχουν τις ίδιες δυνατότητες λειτουργώντας με την ίδια τεχνολογία, δεν υφίσταται ανάγκη εξέτασης χωριστά συνδυασμών όπως UUU και UWW. Ο προς εξέταση αριθμός υποπροβλημάτων λοιπόν μειώνεται στο 4 (UUU, UUW, UWW και WWW). Επιπροσθέτως, αποκλείεται και η διάρθρωση WWW από το χώρο αναζήτησης λύσεων, λόγω της ύπαρξης χρηστών που αιτούνται υπηρεσίας φωνής, οπότε και τουλάχιστον ένας πομποδέκτης πάντοτε πρέπει να λειτουργεί με UMTS. Έτσι, μετά την αναγνώριση των υποπροβλημάτων που θα υποστούν παράλληλη επεξεργασία, είμαστε έτοιμοι να ξεκινήσουμε την επεξεργασία αυτή, συνεχίζοντας με τις υπόλοιπες φάσεις της μεθόδου επίλυσης.

Κατανομή A_{TU} (βασική κατανομή A_{UQ})

Σε αυτή τη φάση, τα επίπεδα QoS τίθενται στις χαμηλότερες δυνατές αποδεκτές τιμές τους. Η βασική κατανομή της ζήτησης στους πομποδέκτες (βασική A_{TU}) φαίνεται στο Σχήμα 4-9 για τα 3 διαφορετικά προκύπτοντα υποπροβλήματα (το καθένα με σταθεροποιημένη την κατανομή A_{TC}).





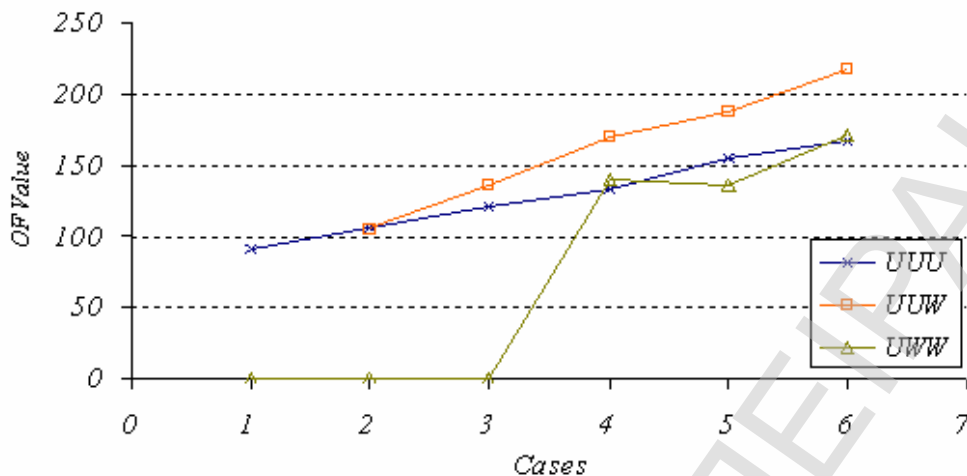
**Σχήμα 4-9: UMTS-WLAN δίκτυο: Κανονικό Φορτίο - Βασική κατανομή A_{TU} ,
(α)UUU, (β)UWU, (γ)UWW**

Στο Σχήμα 4-9 παρατηρούμε τον αριθμό των «συνόδων» που ανατίθενται σε κάθε πομποδέκτη για τις 6 διαφορετικές περιπτώσεις φορτίου που εξετάζουμε. Σημειώνεται δε και πάλι ότι τα αποτελέσματα αντανακλούν τη θεώρηση ομοιόμορφης κατανομής των συνόδων μέσα στην υπό εξέταση κυψέλη.

Κατανομή A_{UQ} (αύξηση επιπέδων QoS) και επιλογή

Μετά και την αύξηση των επιπέδων ποιότητας για κάθε υποπρόβλημα (κατανομή A_{RT}), οι μέγιστες αντίστοιχες τιμές της OF απεικονίζονται στο Σχήμα 4-10.

Δεδομένου ότι το αρχικό εξετασθέν φορτίο περιέχει μόνο αιτήσεις γωνής, δεν έχει έννοια η χρησιμοποίηση κανενός είδους διάρθρωσης, παρά μόνο της UUU. Στην προκειμένη μάλιστα περίπτωση, λόγω του ότι το φορτίο επαρκεί να καλυφθεί και από 2 πομποδέκτες UMTS, αν χρησιμοποιούσαμε WLAN σε έναν από τους 3 πομποδέκτες θα καταλήγαμε στην ίδια ακριβώς τιμή για την OF. Σχετική διαφοροποίηση σε αυτό το σημείο θα φανεί στο επόμενο σενάριο.



Σχήμα 4-10: UMTS–WLAN δίκτυο: Κανονικό Φορτίο - Εξέλιξη της OF

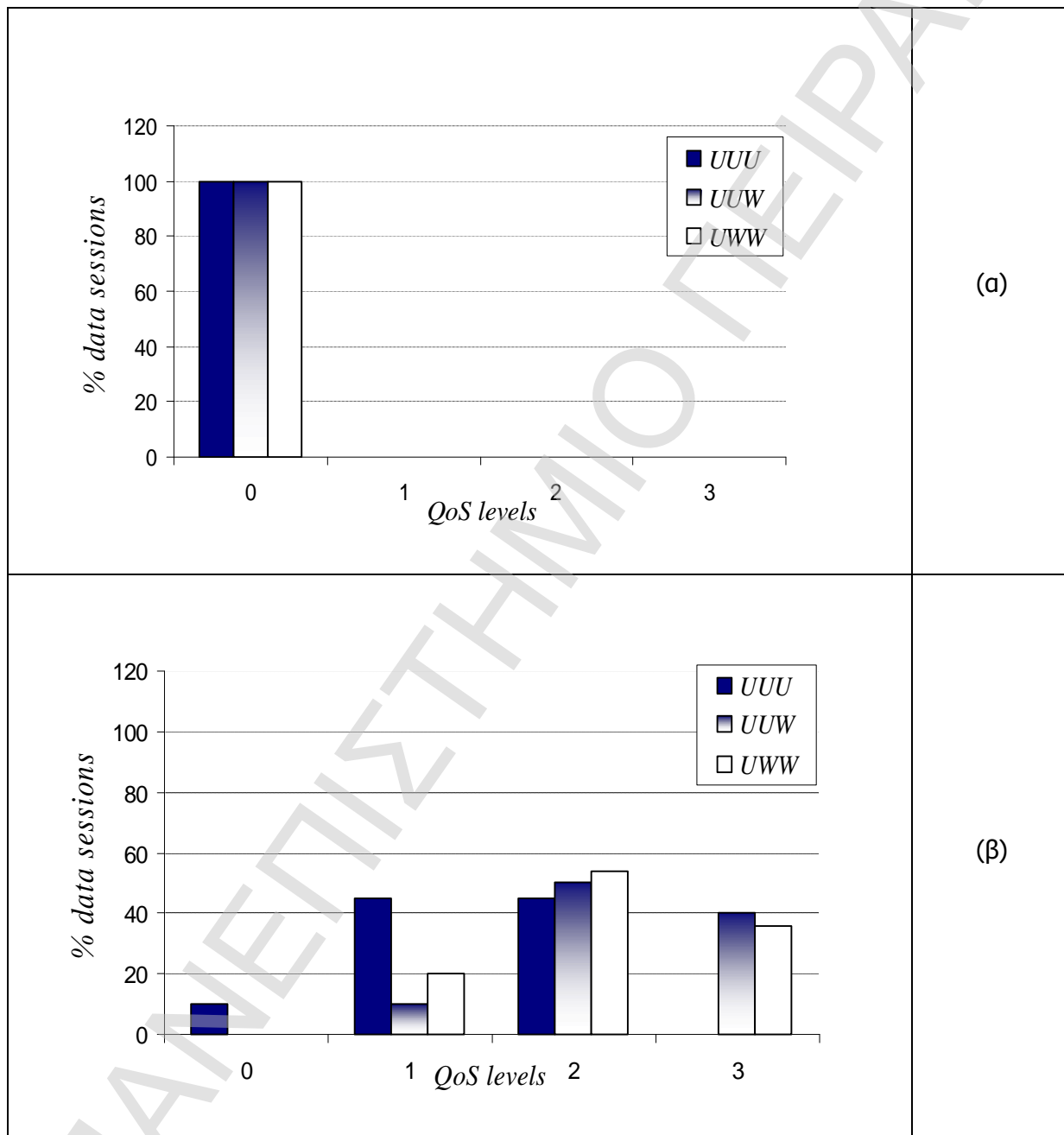
Αν εξετάσουμε αρχικά τη διάρθρωση UUU, θα παρατηρήσουμε μια αύξηση της τιμής της OF, η οποία ακολουθεί την αύξηση της ζήτησης για την υπηρεσία δεδομένων. Αυτό συμβαίνει εφόσον υπάρχει διαθέσιμη χωρητικότητα προς αύξηση των παρεχομένων επιπέδων QoS που συνοδεύουν τις αφικνούμενες αιτήσεις.

Αναφορικά με τη UUW, εφόσον οι αιτήσεις για φωνή εξυπηρετούνται επαρκώς από 2 πομποδέκτες UMTS και οι αιτήσεις για δεδομένα και από τα 2 RATs, η τιμή της OF ολοένα και αυξάνεται με την παράλληλη αύξηση της ζήτησης για δεδομένα.

Τέλος, η διάρθρωση UWW αρχικά αδυνατεί να εξυπηρετήσει τις υπάρχουσες αιτήσεις για φωνή και η προκύπτουσα τιμή της OF είναι μηδέν. Ξεκινώντας από την περίπτωση 4, όπου οι φωνές έχουν ελαττωθεί επαρκώς ώστε να καλύπτονται πλήρως από 1 πομποδέκτη UMTS, η OF δίνει κάποια μη μηδενική τιμή. Στην περίπτωση αυτή οι αιτήσεις δεδομένων που καλύπτονται από τους WLAN πομποδέκτες αποδίδονται σε αυτούς, λόγω της δυνατότητας παροχής υψηλότερων επιπέδων QoS, οι υπόλοιπες που βρίσκονται σε μακρινή απόσταση από τους πομποδέκτες, εξυπηρετούνται από τον UMTS πομποδέκτη.

Συγκρίνοντας τώρα τις ανωτέρω δυνατές διαρθρώσεις, παρατηρούμε ότι η UUW είναι εν γένει η βέλτιστη, δεδομένου του μη υπερβολικού φορτίου που εγγυάται τη δυνατότητα παροχής υψηλότερων γενικά επιπέδων QoS, σε σύγκριση με το συνδυασμό UUU. Η UUU είναι καταλληλότερη στην περίπτωση μεγάλης ζήτησης για υπηρεσία φωνής. Επίσης, η UWW

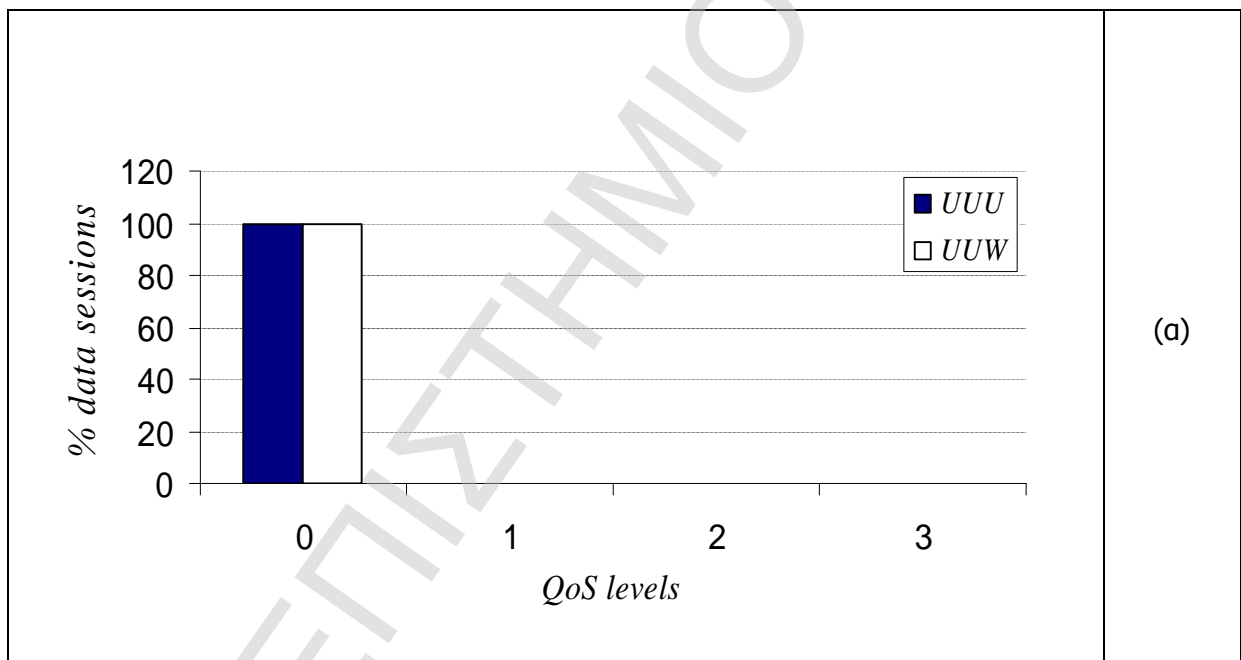
σε γενικές γραμμές είναι ακατάλληλη, διότι ακόμα και ο 1 UMTS πομποδέκτης αδυνατεί στην πλειονότητα των περιπτώσεων να εξυπηρετήσει τη ζήτηση για υπηρεσία φωνής. Τα παραπάνω συμπεράσματα θα πρέπει να βρίσκονται σε συμφωνία με την προκύπτουσα κατανομή A_{UQ} .

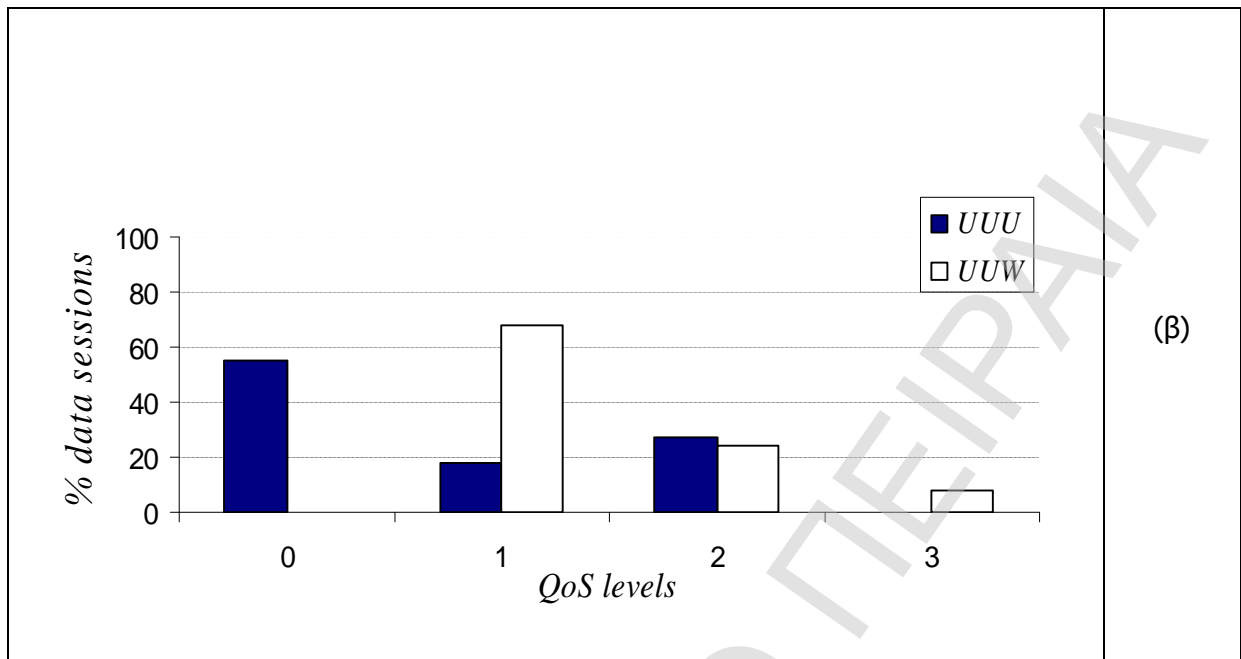


Σχήμα 4-11: UMTS-WLAN δίκτυο: Κανονικό Φορτίο - Κατανομή A_{UQ} για την περίπτωση 4 - (α) βασική, (β) βελτιωμένη

Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 4-11, όπου παρατηρούμε την εξέλιξη της κατανομής A_{UQ} για τα δεδομένα, έχοντας ως βάση τη βασική κατανομή που προκύπτει από τη δεύτερη φάση και καταλήγοντας στη βελτιωμένη, της τρίτης φάσης.

Στο εν λόγω σχήμα φαίνεται ακόμα και η υπεροχή της UUW στην περίπτωση 4, εφόσον περισσότερες αιτήσεις εξυπηρετούνται με υψηλότερα επίπεδα QoS, αυξάνοντας έτσι τη χρησιμότητα, σε σύγκριση με τη UUU ή τη UWW. Σε αντιστοιχία με τα ανωτέρω, το Σχήμα 4-12 περιλαμβάνει τη βασική και βελτιωμένη κατανομή A_{DQ} (εκ νέου μόνο για τα δεδομένα) στην περίπτωση 2, όπου τα προκύπτοντα αποτελέσματα είναι ισοδύναμα (εκουσίως αποκλείσαμε τη διάρθρωση UWW από την περίπτωση αυτή).





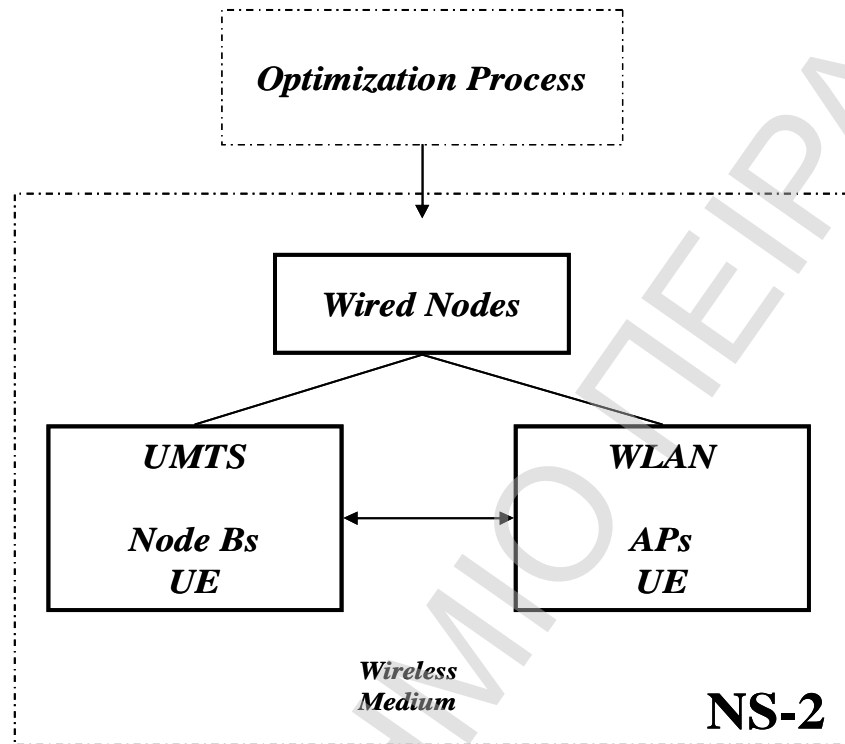
Σχήμα 4-12: UMTS-WLAN δίκτυο: Κανονικό Φορτίο - Κατανομή A_{uQ} για την περίπτωση 2 - (α) βασική, (β) βελτιωμένη

Θα πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι η εκάστοτε βέλτιστη διάρθρωση εξαρτάται από την προηγούμενη κατάσταση του δικτύου, γιατί οι τιμές της OF για τις UUU και U UW είναι ίσες. Αν, επί παραδείγματι, θεωρήσουμε ότι η προηγούμενη διάρθρωση ήταν η UUU, θα καταλήγαμε ξανά στην UUU, για να ελαχιστοποιήσουμε τον αριθμό αλλαγών RATs.

4.3.3 UMTS-WLAN δίκτυο: Κανονικό Φορτίο - Προσομοίωση στην πλατφόρμα NS-2

Μέχρι τώρα είναι φανερό ότι, τουλάχιστον σε καταστάσεις κανονικού φορτίου και δεδομένης της ύπαρξης σημερινών (εμπορικών) τεχνολογιών UMTS/WLAN, η γενικώς καταλληλότερη διάρθρωση ενός στοιχείου δικτύου είναι η U UW. Έχοντας υπόψη τα ανωτέρω, επιστρατεύουμε τον προσομοιωτή NS-2 [7] και εφαρμόζουμε την ανωτέρω μέθοδο σε ένα προσομοιωμένο δίκτυο για ένα χρονικό διάστημα 1 ώρας. Για να επιτευχθεί αυτό, ενσωματώνουμε στην πλατφόρμα προσομοίωσης τις απαραίτητες UMTS και WLAN επεκτάσεις (βλέπε Σχήμα 4-13) και προσαρμόζουμε τον κώδικα του αλγορίθμου στις δεδομένες ανάγκες της παρούσας προσομοίωσης. Ο προσομοιωτής αποτελείται από κινητούς

δέκτες (χρήστες) και σταθμούς βάσης (Node-B – RNC, Access Points) και έχει (σε γενικές γραμμές) τη μορφή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-13.



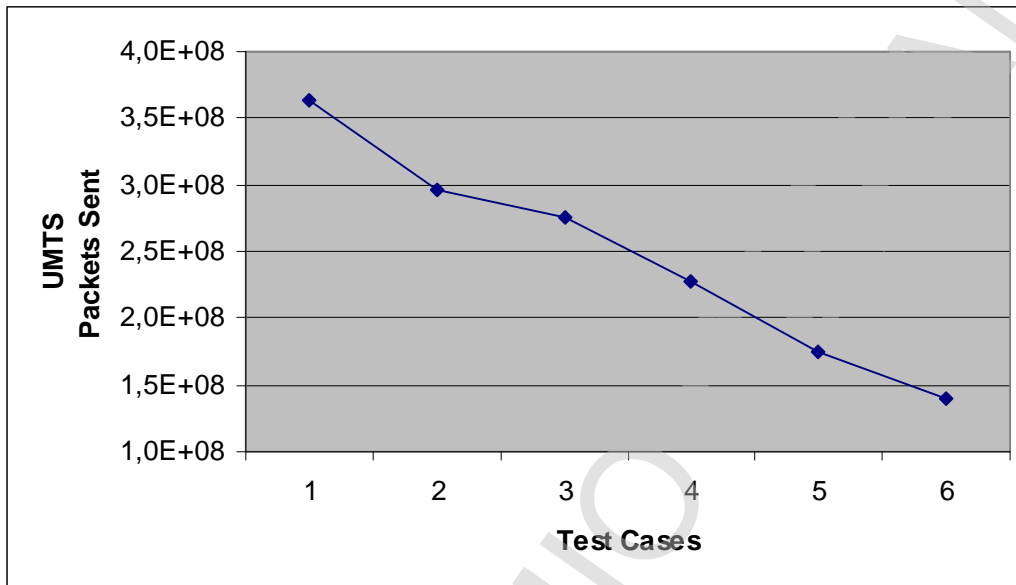
Σχήμα 4-13: Πλατφόρμα Προσομοίωσης

Οι προσομοιώσεις χρησιμοποιούν το μοντέλο διάδοσης Okumura – Hata για το UMTS και το Two-Ray ground για το WLAN, με στόχο να υπολογιστεί το λαμβανόμενο επίπεδο ισχύος κάθε πακέτου. Ενώ τα ανωτέρω μοντέλα διάδοσης υπολογίζουν τη λαμβανόμενη ισχύ, η επίδραση της σκίασης λαμβάνεται επίσης υπόψη και περιγράφεται μέσω μιας λογαριθμοκανονικής μεταβλητής.

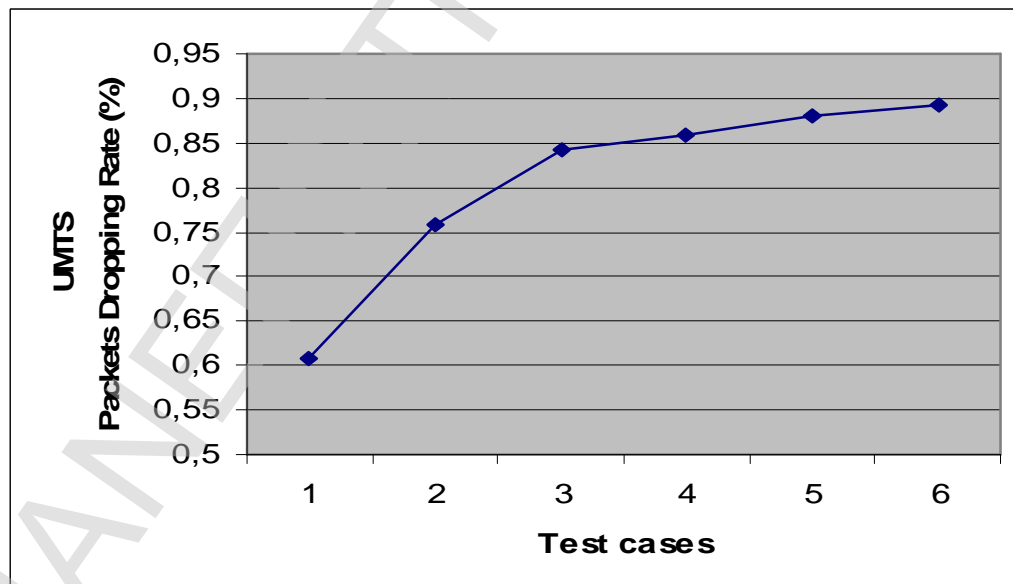
Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από την ως άνω πλατφόρμα προσομοίωσης, αναφορικά με τα μεταδιδόμενα πακέτα στο UMTS και στο WLAN, απεικονίζονται γραφικά στο Σχήμα 4-14 και στο Σχήμα 4-15. Πρέπει δε να τονιστεί ότι οι προσομοιώσεις αφορούν τη διάρθρωση UUT.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-14, ο αριθμός των σταθθέντων πακέτων στο UMTS ελαττώνεται με την αύξηση του αριθμού των συνόδων δεδομένων. Αυτό το αποτέλεσμα είναι καθ'όλα

αναμενόμενο, διότι το UMTS χρησιμοποιεί μικρότερο spreading factor για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, αλλά και διαφορετική κωδικοποίηση, εξαρτώμενη από την αιτούμενη υπηρεσία.



Σχήμα 4-14: Σταλθέντα πακέτα μέσω UMTS



Σχήμα 4-15: Ρυθμός απώλειας πακέτων στο UMTS

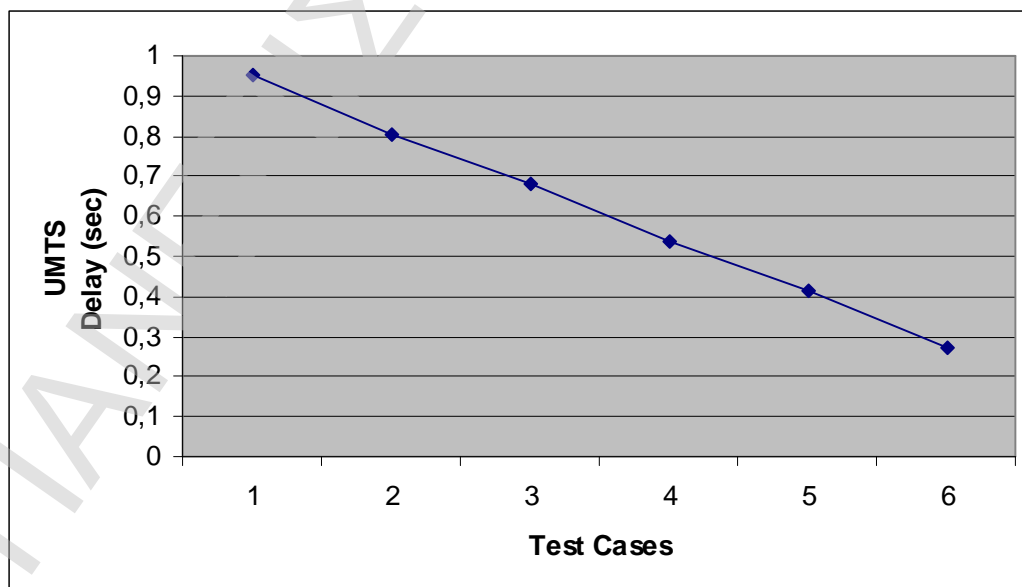
Τα ανωτέρω οδηγούν σε μικρότερο συνολικό αριθμό σταθθέντων πακέτων, όσο περισσότερες σύνοδοι απολαμβάνουν υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης.

Παρομοίως, ο ρυθμός απώλειας πακέτων (dropping rate) για το UMTS επεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 4-15. Παρατηρούμε στο εν λόγω σχήμα ένα ελαφρώς αυξανόμενο ρυθμό απώλειας πακέτων, οφειλόμενο στην αύξηση στις συνόδους δεδομένων. Επιπροσθέτως τονίζουμε τη χρήση συγκεκριμένου μοντέλου λαθών (error model), το οποίο οπωσδήποτε επηρεάζει το ρυθμό απωλειών πακέτων, το οποίο ωστόσο ξεφεύγει από τους σκοπούς της παρούσας διατριβής.

Επιπλέον, το Σχήμα 4-16 παρουσιάζει την εξέλιξη της μέσης τιμής καθυστέρησης δεδομένων στο UMTS, για το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης.

Η συνολική καθυστέρηση προκύπτει από την άθροιση:

- Της καθυστέρησης μετάδοσης κατά τη μετάδοση ενός πακέτου (λαμβάνοντας υπόψη τον κατακερματισμό του) προς το φυσικό στρώμα του πομπού.
- Της καθυστέρησης αναμονής που εκφράζεται ως ποσοστό της καθυστέρησης μετάδοσης.
- Της καθυστέρησης διάδοσης, η οποία προφανώς είναι η ίδια σε όλες τις περιπτώσεις.
- Της καθυστέρησης μετάδοσης κατά τη μετάδοση ενός πακέτου από το φυσικό στρώμα του δέκτη μέχρις ότου το αρχικό πακέτο ανακτηθεί πλήρως.

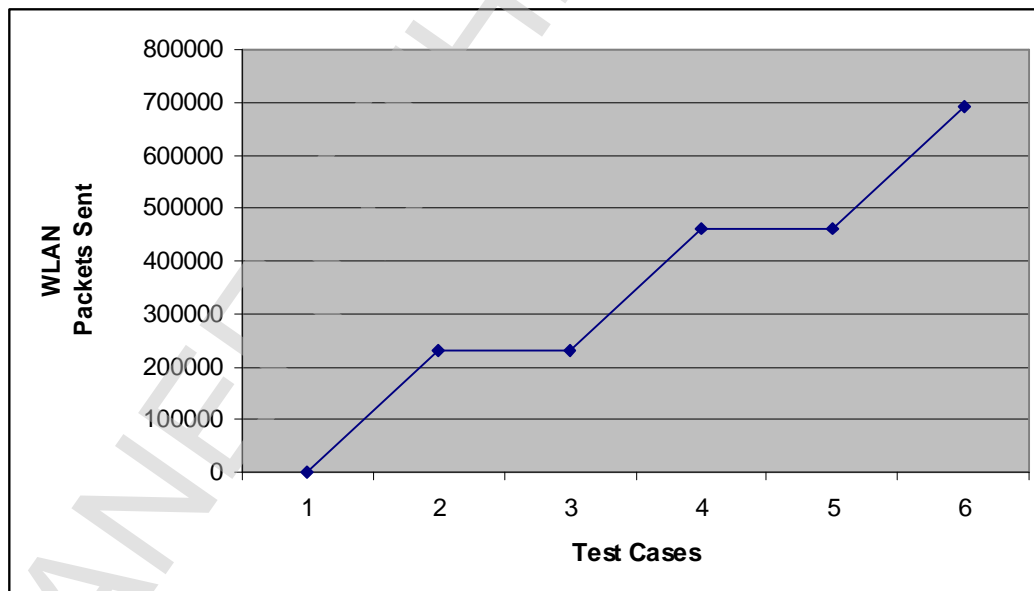


Σχήμα 4-16: Μέσες τιμές καθυστέρησης δεδομένων στο UMTS

Τα αποτελέσματα δείχνουν μια μείωση στην τιμή της καθυστέρησης καθώς αυξάνονται οι σύνοδοι δεδομένων. Αυτή η μείωση εξαρτάται από τις συνόδους δεδομένων που προστίθενται ως φορτίο στους UMTS πομποδέκτες της διάρθρωσης UUN, από τη συγκεκριμένη υπηρεσία, το spreading factor που χρησιμοποιεί το UMTS για την υπηρεσία αυτή και την κωδικοποίηση.

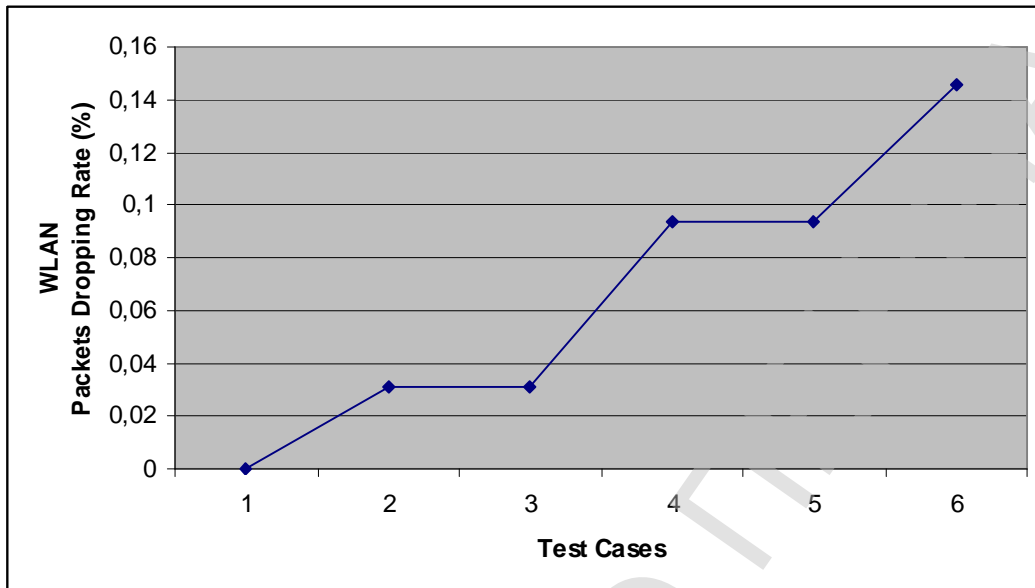
Αναφορικά με το WLAN, ο αριθμός των σταλθέντων πακέτων για το διάστημα της προσομοίωσης (1 ώρα) απεικονίζεται για τις διάφορες περιπτώσεις φορτίου στο Σχήμα 4-17. Παρατηρούμε μια αύξηση στο συνολικό αριθμό των πακέτων κατά τη διάρκεια αυτής της 1 ώρας προσομοίωσης, πράγμα το οποίο είναι λογικό, αν αναλογιστούμε ότι το WLAN δε χρησιμοποιεί την τεχνική του spreading factor ή κάποια άλλη κωδικοποίηση, όπως πχ το UMTS. Συνεπώς, όσο περισσότερες οι σύνοδοι, τόσο περισσότερα τα σταλθέντα πακέτα.

Τέλος, αναφορικά με το ρυθμό απώλειας πακέτων, αναμένεται ότι και αυτός θα αυξάνεται με την αύξηση των συνόδων δεδομένων. Πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι το χρησιμοποιούμενο μοντέλο λαθών (error model) δύναται να αλλάξει κατ'επιλογή και να επηρεάσει αντίστοιχα και το ρυθμό απώλειας.



Σχήμα 4-17: Σταλθέντα πακέτα μέσω WLAN

Τα ανωτέρω απεικονίζονται γραφικά στο Σχήμα 4-18.



Σχήμα 4-18: Ρυθμός απώλειας πακέτων στο WLAN

Το επόμενο σενάριο αποσκοπεί στο να τεστάρει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου στην ανάγκη αντιμετώπισης μια κατάστασης πολύ υψηλού φορτίου, γεγονός συχνό σε εμφάνιση σε περιβάλλοντα B3G.

4.3.4 UMTS-WLAN δίκτυο: Υψηλό Φορτίο

Εισαγωγικά Στοιχεία

Σε αυτό το σενάριο, διατηρώντας τη διάταξη της περιοχής εξυπηρέτησης (Σχήμα 4-6), θεωρούμε την ύπαρξη υψηλού φορτίου στο προβληματικό στοιχείο, το οποίο συνίσταται σε 260 ενεργές αιτήσεις για υπηρεσίες. Εφαρμόζουμε τώρα την προτεινόμενη μέθοδο 9 φορές, θεωρώντας μια διαφορετική κατανομή της ζήτησης σε υπηρεσίες σε κάθε περίπτωση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-19. Επιπλέον, ακολουθούμε την ίδια λογική όπως και στο προηγούμενο σενάριο αναφορικά με τις παραμέτρους του όλου συστήματος.

	<i>Data</i>		<i>Voice</i>	
	<i>%</i>	<i>sessions</i>	<i>%</i>	<i>sessions</i>
<i>Case1</i>	0	0	100	260
<i>Case2</i>	6.5	16	93.5	228
<i>Case3</i>	14	32	86	196
<i>Case4</i>	23	48	77	164
<i>Case5</i>	33	64	67	132
<i>Case6</i>	45	80	55	100
<i>Case7</i>	59	96	41	68
<i>Case8</i>	76	112	24	36
<i>Case9</i>	97	128	3	4

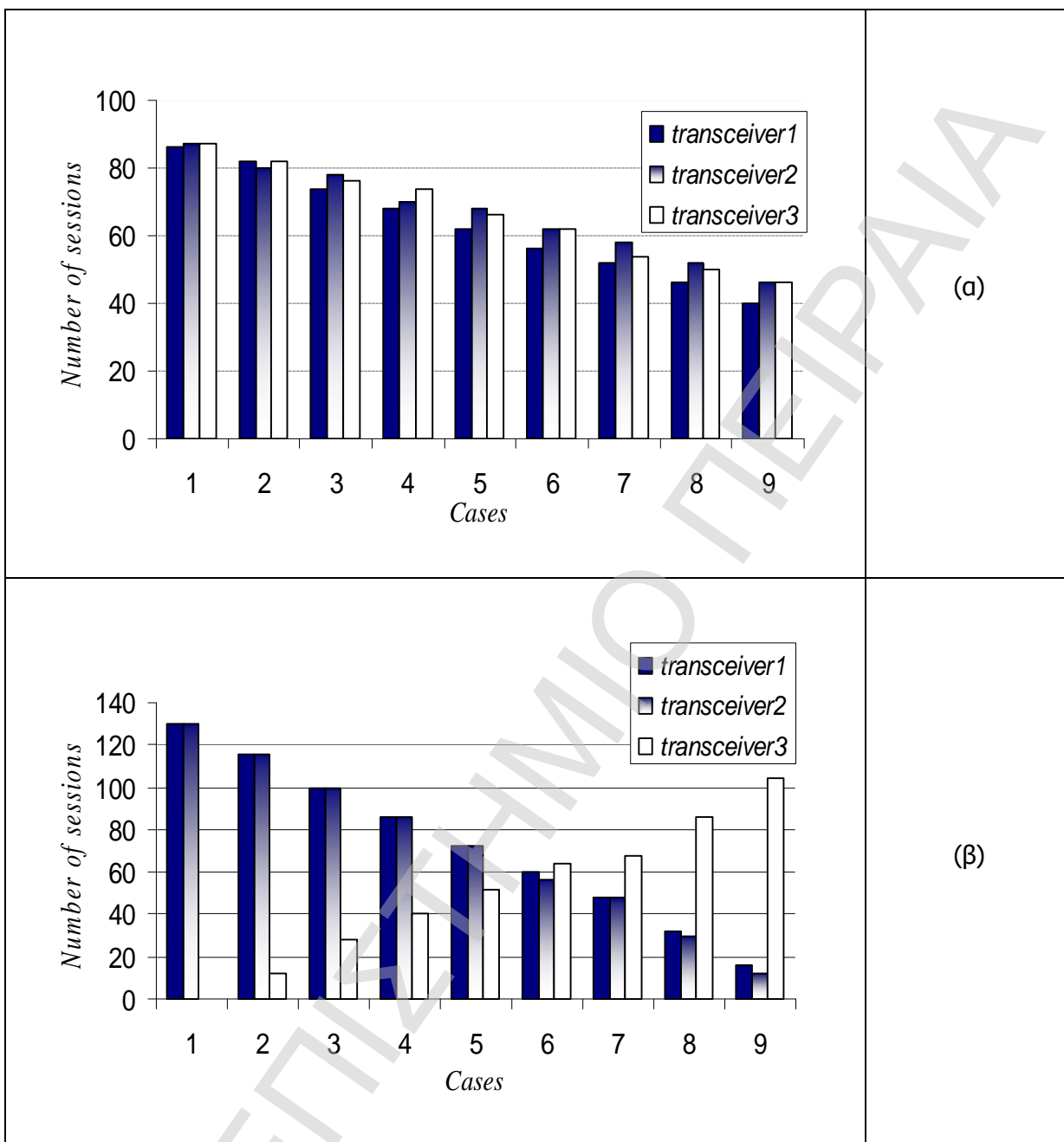
Σχήμα 4-19: UMTS–WLAN δίκτυο: Υψηλό Φορτίο - Περιπτώσεις Εφαρμογής της Μεθόδου

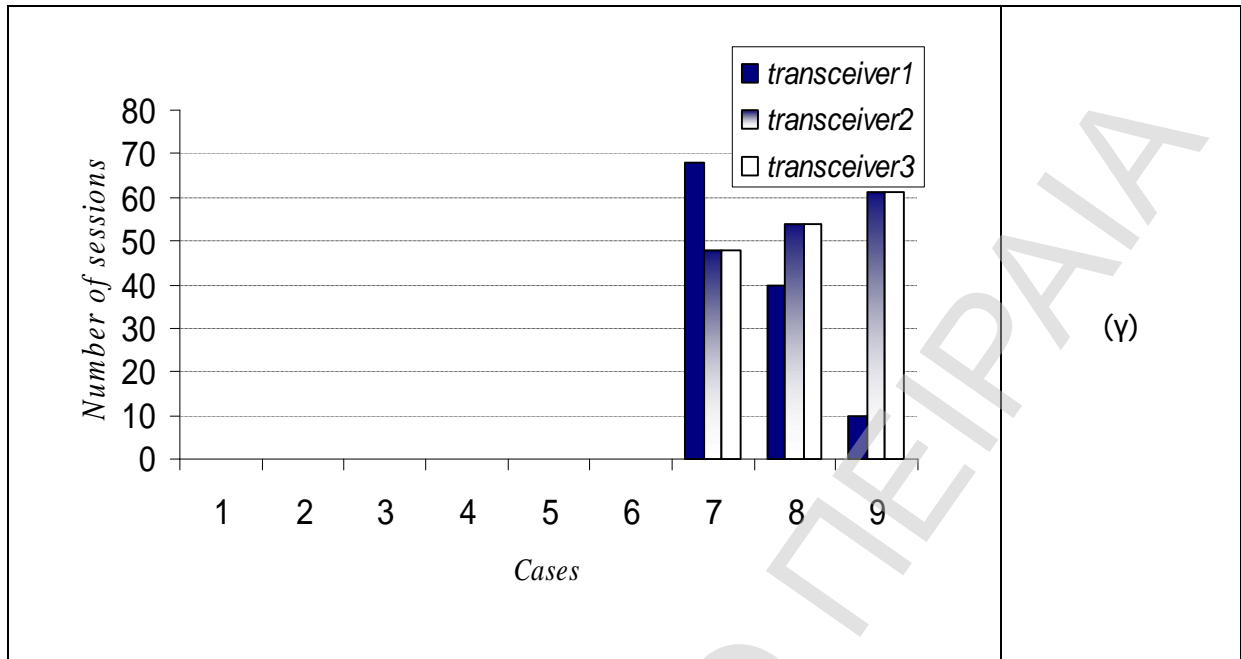
Κατανομή A_{TC}

Στην πρώτη φάση και πάλι το ολικό πρόβλημα διασπάται σε 3 διαφορετικά υποπροβλήματα, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές κατανομές A_{TC} . Κατ' αναλογία με το πρώτο σενάριο, οι προς εξέταση διαρθρώσεις είναι οι (α) UUU, (β) U UW και (γ) UWW.

Κατανομή A_{TU} (βασική κατανομή A_{UQ})

Με τη θέση των επιπέδων QoS στις χαμηλότερες δυνατές τιμές τους για κάθε υποπρόβλημα (με σταθερή κατανομή A_{RT}), ευρίσκεται η βασική κατανομή A_{DT} . Αυτό φαίνεται για τις 9 εξετασθέντες περιπτώσεις στο Σχήμα 4-20. Παρατηρούμε ότι σκόπιμα παραλείπεται η διάρθρωση UWW στις περιπτώσεις 1-6, λόγω του μεγάλου αριθμού αιτήσεων για υπηρεσίες φωνής που δεν μπορεί να καλυφθεί από 1 πομποδέκτη UMTS.

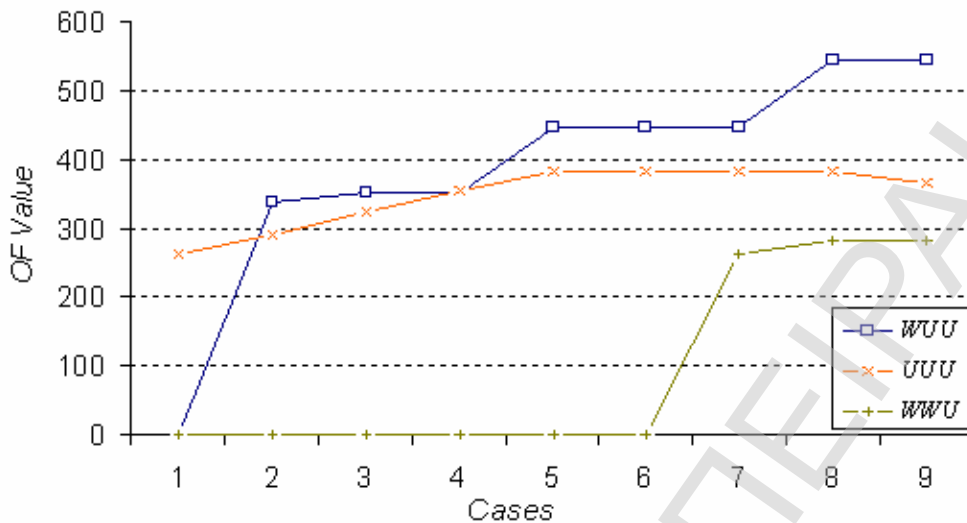




**Σχήμα 4-20: UMTS–WLAN δίκτυο: Υψηλό Φορτίο - Βασική κατανομή A_{TU} ,
(α)UUU, (β)UWU, (γ)UWW**

Κατανομή A_{DQ} (αύξηση επιπέδων QoS) και επιλογή

Μετά τη σταδιακή αύξηση των επιπέδων QoS, η λύση του προβλήματος αντικατοπτρίζεται στην εξαγωγή των τιμών της τελικής OF, για όλα τα υποπροβλήματα (με σταθερή A_{RT}). Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 4-21 και εξηγείται παρακάτω.



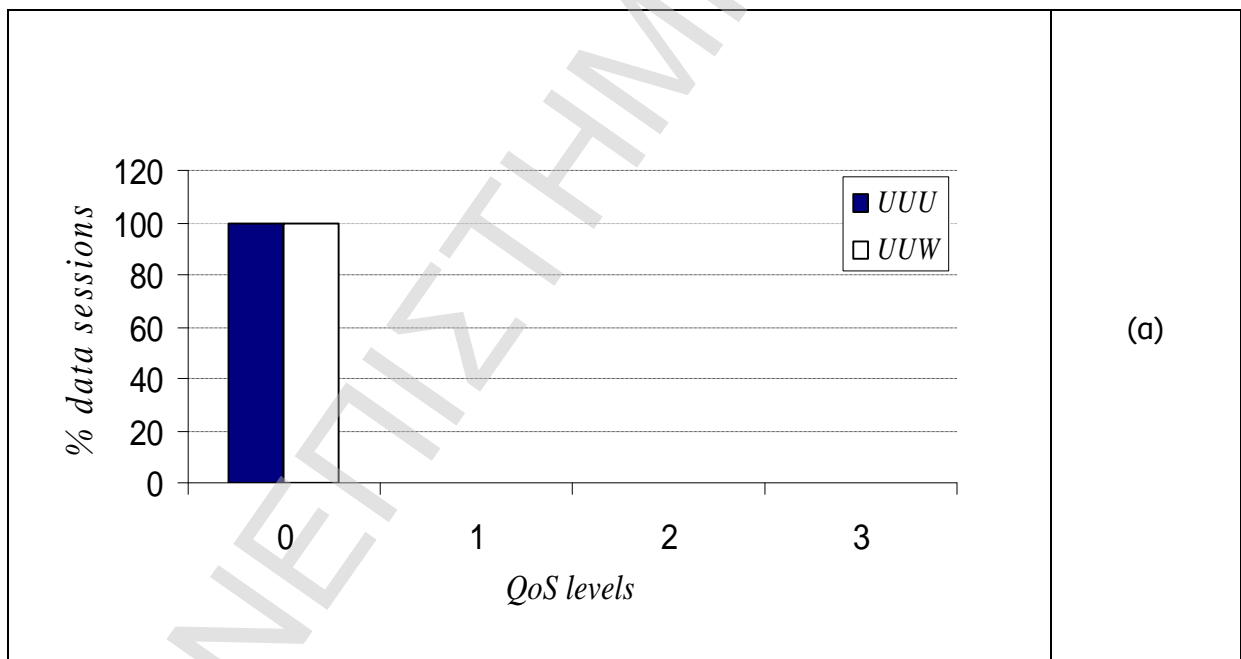
Σχήμα 4-21: UMTS–WLAN δίκτυο: Υψηλό Φορτίο – Εξέλιξη της OF

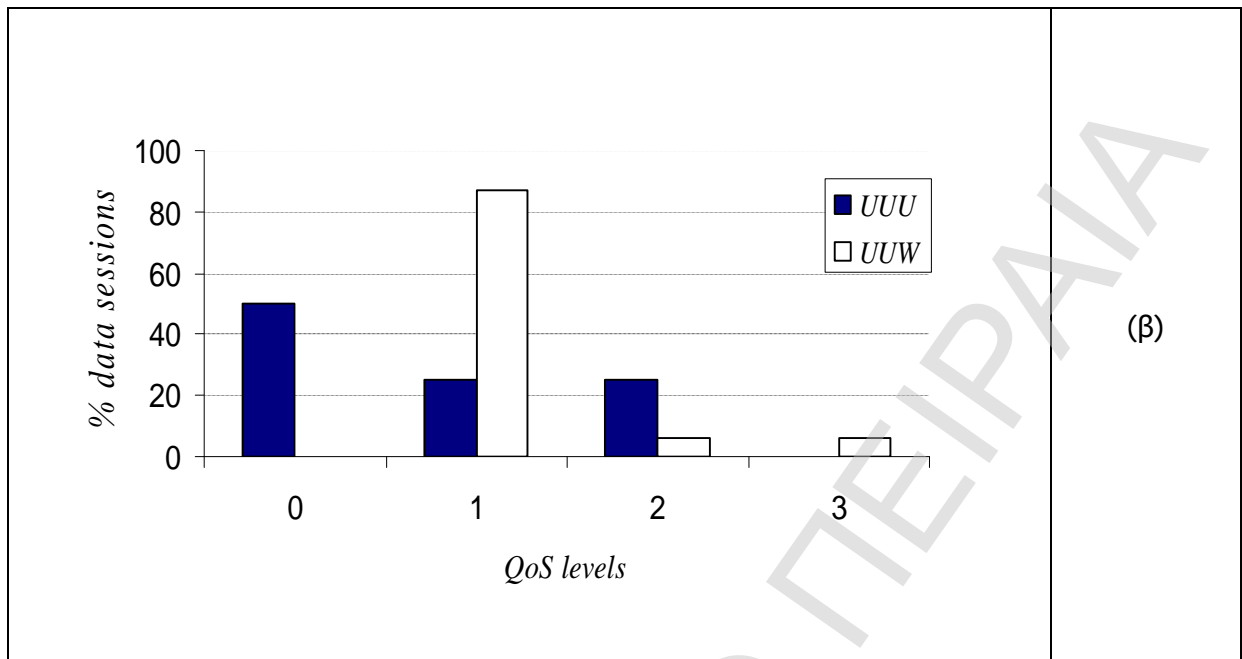
Γενικώς, η ζήτηση στην περίπτωση 1, δεδομένης της ύπαρξης μόνο αιτήσεων για φωνή, δε συνάδει με τη χρήση WLAN. Άρα, μόνο η διάρθρωση UUU έχει νόημα. Εξετάζοντάς τη, παρατηρούμε ότι καθώς η ζήτηση για δεδομένα αυξάνεται, ολοένα και υψηλότερες τιμές της OF επιτυγχάνονται. Αυτό ισχύει για τις περιπτώσεις 1-5, λόγω της αύξησης των προσφερομένων επιπέδων QoS στις «συνόδους» δεδομένων. Μετά την περίπτωση 5, δεν διατίθεται επιπλέον χωρητικότητα και έτσι η τιμή της OF αρχικά (περιπτώσεις 5-8) παραμένει σταθερή, γεγονός που εξηγείται από την αντιστάθμιση της αύξησης που επέρχεται από τις αυξανόμενες αφικνούμενες αιτήσεις για δεδομένα, με τη μείωση που επέρχεται από τις αιτήσεις φωνής (υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή χρηστών – αιτήσεων μέσα στην κυψέλη). Τελικά, ωστόσο (στην περίπτωση 9), τα δεδομένα έχουν αυξηθεί τόσο πολύ, ώστε κάποια ήδη προσφερθέντα επίπεδα QoS πρέπει να μειωθούν, με άλλα λόγια παρατηρείται κάποια μορφή υποβάθμιση της ποιότητας σε σύγκριση με την περίπτωση 8, οπότε και η τιμή της OF οδηγείται αναπόφευκτα σε μείωση.

Αναφορικά με τη UUU, αυτή αρχικά οδηγεί σε μηδενική τιμή της OF (περίπτωση 1), λόγω του ότι το αρχικό φορτίο υπερκαλύπτει τις δυνατότητες 2 UMTS πομποδεκτών. Ξεκινώντας από την περίπτωση 2, όπου οι αιτήσεις (σύνοδοι) για φωνή έχουν μειωθεί αρκετά ώστε να καλύπτονται από 2 UMTS πομποδέκτες, επιτυγχάνεται μια τιμή για την OF, η οποία και αυξάνεται παράλληλα με την αύξηση των αιτήσεων για δεδομένα, η οποία εξυπηρετείται με ολοένα αυξανόμενα επίπεδα QoS, τόσο από τον WLAN πομποδέκτη, όσο και από τους UMTS.

Τέλος, η διάρθρωση UWW στερείται εφαρμογής στις περιπτώσεις 1-6, αφού η ζήτηση για φωνή ξεπερνά τις δυνατότητες του ενός διαθέσιμου UMTS πομποδέκτη. Μετά την περίπτωση 5 ο UMTS πομποδέκτης καθίσταται χρησιμοποιήσιμος και οδηγεί στην επίτευξη μιας τιμής για την OF, η οποία και αυξάνεται με τη μείωση της ζήτησης για φωνή.

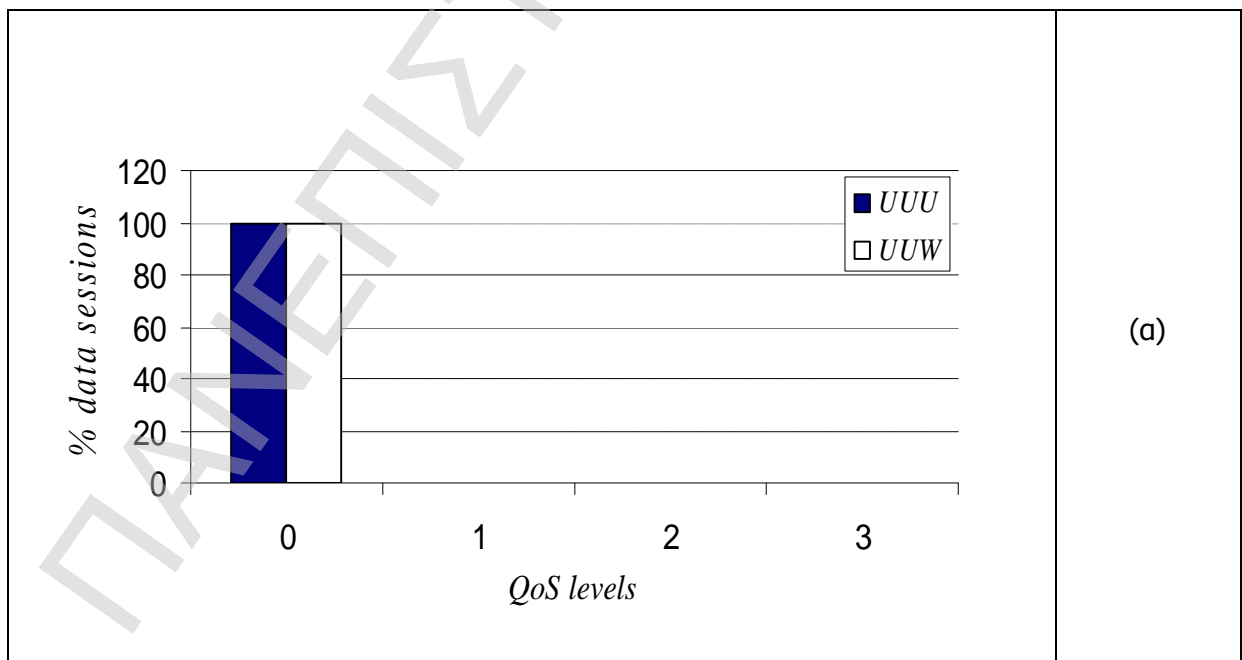
Συγκρίνοντας τώρα τις διαθέσιμες διαρθρώσεις, παρατηρούμε μια αρχική σχετική υπεροχή της UUU, λόγω της ύπαρξης μόνο ζήτησης για φωνή. Ωστόσο, από την περίπτωση 2 μέχρι την περίπτωση 3, η UUU υπερέχει. Αυτό δικαιολογείται αφενός από τα υψηλά επίπεδα QoS που αποδίδονται στα δεδομένα που εξυπηρετούνται από το UMTS, αφετέρου δε από τα υψηλά επίπεδα QoS που εξυπηρετούνται από WLAN (θεωρώντας ότι υπάρχει διαθέσιμη χωρητικότητα). Τα παραπάνω αποτελέσματα απεικονίζονται και στο Σχήμα 4-22, όπου φαίνονται η βασική και η βελτιωμένη κατανομή A_{DQ} για τις συνόδους δεδομένων της περίπτωσης 2. Εύκολα συμπεραίνουμε ότι ο αριθμός συνόδων δεδομένων που γίνονται αποδέκτες υψηλών επιπέδων QoS είναι μεγαλύτερος στην περίπτωση της UUU από ότι σε αυτήν της UUU.

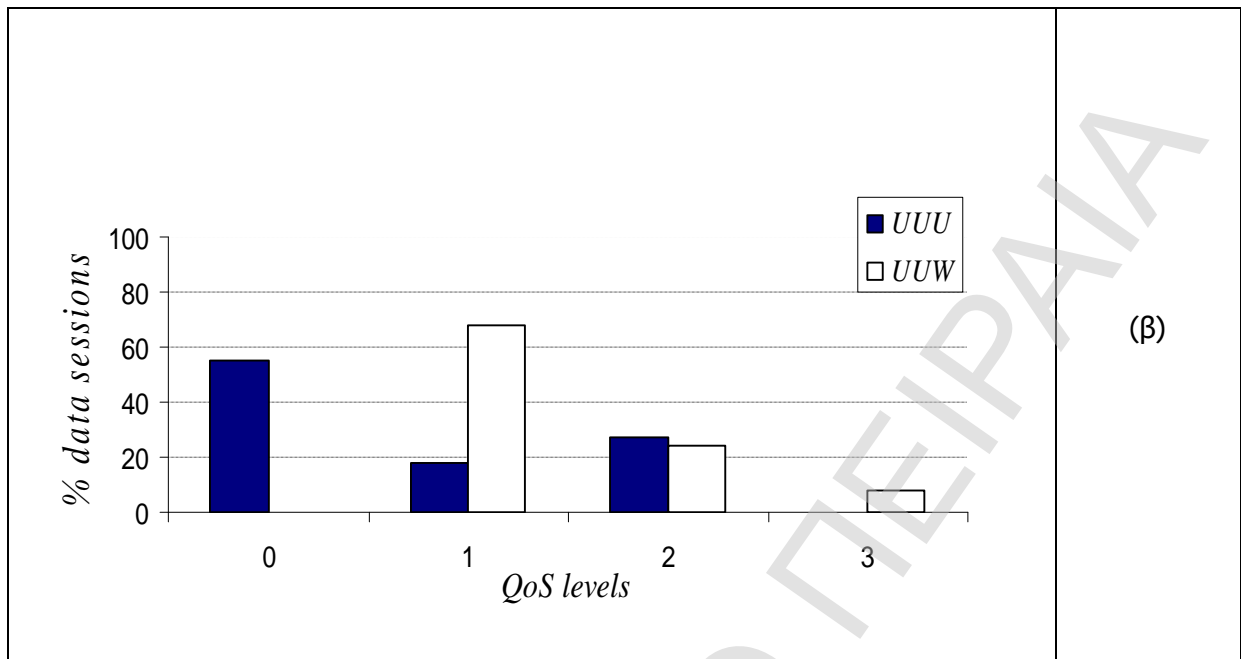




Σχήμα 4-22: UMTS-WLAN δίκτυο: Υψηλό Φορτίο - Κατανομή A_{UQ} για την περίπτωση 2 - (α) βασική, (β) βελτιωμένη

Μολαταύτα, στην περίπτωση 4 τα πράγματα αντιστρέφονται, με τη UUU να αποδεικνύεται η σοφότερη επιλογή, καθώς η τιμή της OF που προκύπτει εξ' αυτού, έχοντας αυξηθεί από την περίπτωση 1, έχει ανέλθει σε υψηλότερο επίπεδο από την αντίστοιχη της UUW.





Σχήμα 4-23: UMTS-WLAN δίκτυο: Υψηλό Φορτίο - Κατανομή A_{UQ} για την περίπτωση 4 - (α) βασική, (β) βελτιωμένη

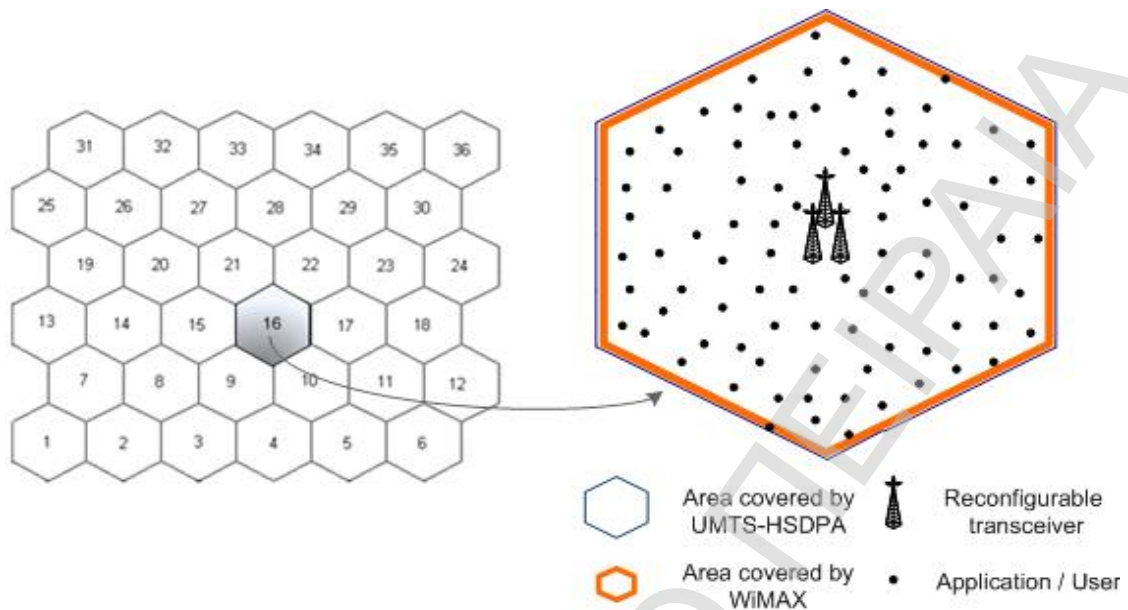
Αυτό απεικονίζεται και στο Σχήμα 4-23, όπου φαίνονται η βασική και βελτιωμένη κατανομή A_{DQ} για τις συνόδους δεδομένων της περίπτωσης 4 και είναι ξεκάθαρο ότι αυτά γίνονται αποδέκτες υψηλότερων επιπέδων QoS με τη χρήση της UUU.

4.3.5 HSDPA/WiMAX δίκτυο: Κανονικό Φορτίο

Εισαγωγικά Στοιχεία

Το παρόν σενάριο αποσκοπεί στο να καταστήσει σαφή τη δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου στην περίπτωση εισαγωγής νέων τεχνολογιών, όπως του HSDPA, προτύπου το οποίο εγκρίθηκε για το UMTS, καθώς και του WiMAX, το οποίο προσφέρει αύρματη ευρυζωνική σύνδεση μακρινών αποστάσεων και αναμένεται να απασχολεί όλο και περισσότερο τη διεθνή επιστημονική κοινότητα.

Για το σκοπό αυτό, αναδομήθηκε καταλλήλως η ανωτέρω περιγραφείσα περιοχή εξυπηρέτησης, για να συμμορφωθεί με τα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών αυτών. Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 4-24.



Σχήμα 4-24: Δίκτυο HSDPA/WiMAX – Διάταξη περιοχής εξυπηρέτησης

Για τις ανάγκες του σεναρίου επίσης ελήφθη υπόψη ένας παράγοντας φόρτωσης ίσος με 0.6 για το HSDPA (το οποίο προσφέρει και υπηρεσία φωνής), ενώ η χωρητικότητα του WiMAX ανέρχεται στις $17Mbps$, με δυνατότητα μεν προσφοράς και φωνής, με περιορισμένη δε κινητικότητα.

Επομένως, ένα ποσοστό μόνο της συνολικής ζήτησης για φωνή μπορεί να εξυπηρετηθεί και από τις 2 τεχνολογίες, το οποίο και θεωρήθηκε για το σενάριό μας ότι ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή 25%. Η απομένουσα ζήτηση για φωνή (αυτή δηλαδή με υψηλή κινητικότητα), εξυπηρετείται μόνο από το UMTS/HSDPA. Οι περιπτώσεις κατά τις οποίες δοκιμάστηκε η μέθοδος επίλυσης, αντίστοιχα και με τα 2 προηγούμενα σενάρια, φαίνονται στο Σχήμα 4-25.

	<i>Data</i>		<i>Voice</i>	
	<i>%</i>	<i>sessions</i>	<i>%</i>	<i>sessions</i>
<i>Case1</i>	0	0	100	300
<i>Case2</i>	7	20	93	260
<i>Case3</i>	15	40	85	220
<i>Case4</i>	25	60	75	180
<i>Case5</i>	36	80	64	140
<i>Case6</i>	50	100	50	100
<i>Case7</i>	66	120	34	60
<i>Case8</i>	87,5	140	12,5	20
<i>Case9</i>	100	160	0	0

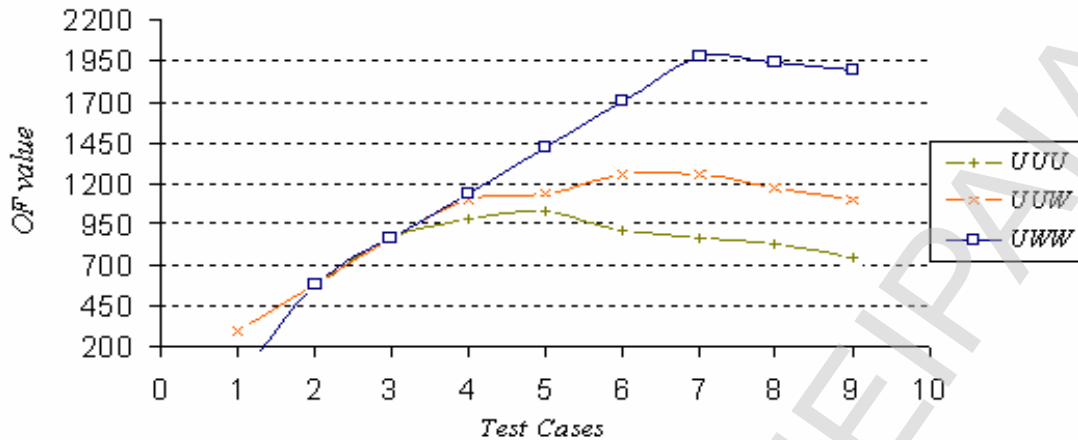
Σχήμα 4-25: HSDPA-WiMAX Δίκτυο – Περιπτώσεις εφαρμογής μεθόδου

Κατανομή A_{TC}

Η πρώτη φάση της μεθόδου επίλυσης ακολουθεί την ίδια ως άνω λογική, δηλαδή διασπά το συνολικό πρόβλημα σε 3 υποπροβλήματα, το καθένα από τα οποία διαθέτει διαφορετική (σταθερή) κατανομή A_{TC} . Τα προκύπτοντα υποπροβλήματα είναι επομένως τα UUU, UUU and UWW. Σε αυτό το σημείο σημειώνουμε τη σκόπιμη παράλειψη της διάρθρωσης WWW, εξαιτίας των σημερινών δυνατοτήτων του WiMAX που σε συνδυασμό με το ότι η ελάχιστη πιθανότητα μη υψηλής κινητικότητας για όλους τους χρήστες σε μια κυψέλη κάνουν τη χρήση του άσκοπη.

Κατανομή A_{TU} (βασική A_{UQ}), βελτίωση επιπέδων QoS και επιλογή

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου συνοψίζονται στο Σχήμα 4-26, όπου απεικονίζεται η εξέλιξη της OF για τους 3 υπό εξέταση συνδυασμούς – υποπροβλήματα. Τα ενδιάμεσα αποτελέσματα παραλείπονται εδώ χάριν συντομίας.



Σχήμα 4-26: HSDPA-WiMAX Δίκτυο – Εξέλιξη της OF

Εξετάζοντας τη διάρθρωση UUU, παρατηρούμε μια αύξηση της OF με την αύξηση της ζήτησης για δεδομένα, μέχρι το σύστημα να φτάσει στο όριο της χωρητικότητάς του (περίπτωση 5). Εν συνεχεία η τιμή της OF μειώνεται, λόγω του ότι 3 πομποδέκτες UMTS/HSDPA αδυνατούν να καλύψουν τη μεγάλη ζήτηση για δεδομένα και απαιτείται υποβάθμιση της ποιότητας υπαρχόντων συνόδων (μείωση των επιπέδων QoS). Η τιμή της OF στην περίπτωση της U UW ακολουθεί παρόμοια λογική, με τη σημείωση ότι τώρα υπάρχει μεγαλύτερη χωρητικότητα στο σύστημα, λόγω του WiMAX. Αντιθέτως, η U WW είναι ακατάλληλη στην περίπτωση ύπαρξης μικρής ζήτησης για δεδομένα, ενώ η προκύπτουσα τιμή της OF ακολουθεί γενικά παρόμοια λογική, με ακόμα μεγαλύτερη δε διαθέσιμη συνολική χωρητικότητα.

Συγκρίνοντας τις διαρθρώσεις (φάση 4), η ύπαρξη και μόνο ζήτησης για δεδομένα επιβεβαιώνει τη σχετική κυριαρχία του WiMAX. Καθώς τα δεδομένα αυξάνονται, χρήσιμο είναι ένας δεύτερος πομποδέκτης να αλλάξει την τεχνολογία λειτουργίας του σε WiMAX, με στόχο την ικανοποίηση των πελατών. Αυτό αποτελεί ισχυρό επιχείρημα για τους θιασώτες του WiMAX, το οποίο όμως αντισταθμίζεται από το κόστος για την εγκατάστασή του, το οποίο πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη, κυρίως σε περιπτώσεις περίπου ισοδύναμων αποτελεσμάτων, όπως στις περιπτώσεις 1 – 3.

Η επιλογή της καταλληλότερης διάρθρωσης στις περιπτώσεις αυτές συνδέεται και πάλι με την προηγούμενη κατάσταση του δικτύου. Θεωρώντας ωστόσο τα 3G δίκτυα ως

περισσότερο συμφέροντα από άποψη κόστους και ήδη εγκατεστημένα σε πολλές περιπτώσεις, η περίπτωση UUU μπορεί να ληφθεί ως η πλέον πιθανή για τη θεώρησή της ως «προηγούμενη κατάσταση». Η τεχνολογία του WiMAX είναι εξ' ολοκλήρου καινοτόμος, με σημαντικότερα όμως πλεονεκτήματα, ειδικά όταν θα κατορθώσει να παρέξει και υπηρεσίες πλήρους κινητικότητας. Για αυτό και αναμένεται μια σκληρή μονομαχία μεταξύ HSDPA και WiMAX τα επόμενα χρόνια στο τηλεπικοινωνιακό στερέωμα.

4.4 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν αναλυτικά αποτελέσματα από την εφαρμογή των αλγορίθμων RAT and Spectrum Selection σε προσομοιωμένα δίκτυα, προκειμένου να καταδείξουν τη χρησιμότητά τους. Τα αποτελέσματα είχαν σκοπό να απαντήσουν στις βασικές προκλήσεις οι σχετιζόμενες με τη διαχείριση reconfigurable (και cognitive), οι οποίες βασίζονται στην αναδιάρθρωσή τους, όσον αφορά τα επιλεγόμενα RATs, φάσμα λειτουργίας, αλλά και άλλες (εφόσον χρειάζεται) λειτουργικές παραμέτρους.

Εν κατακλείδι, τα αποτελέσματα εκ των προσομοιώσεων, ρίχουν άπλετο φως στα πλεονεκτήματα των reconfigurable και cognitive δικτύων υπο την έννοια της δυνατότητας προσαρμογής τους στις επιταγές του περιβάλλοντος. Τα αποτελέσματα αυτά φαίνονται ακόμα περισσότερο ενθαρρυντικά, αν λάβουμε υπόψη την ευκολία ενσωμάτωσης του στοιχείου της γνώσης, όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3. Εκτός των άλλων, θα μπορούσε κανείς να ισχυριστεί ότι οι περιγραφέντες αλγόριθμοι έχουν ως κέντρο τους το χρήστη καθ'αυτό, μέσω της ενσωμάτωσης της έννοιας της χρησιμότητας (utility) που προσπαθούν να μεγιστοποιήσουν. Παράλληλα, οι NOs πάντοτε ενδιαφέρονται για το κόστος των παρεχομένων υπηρεσιών. Άρα, οι προτεινόμενες μέθοδοι στοχεύουν στην εξεύρεση της χρυσής τομής μεταξύ των δύο αυτών προσεγγίσεων του προβλήματος και για αυτό η εφαρμογή τους τόσο σε σημερινά όσο και σε μελλοντικά δίκτυα, φαντάζει αρκετά ελκυστική.

4.5 Βιβλιογραφία

- [1] G.Dimitrakopoulos, K.Tsagkaris, K.Demestichas, E.Adamopoulou, P.Demestichas, "Management Schemes for Distributed Cross-Layer Reconfigurations in the Context of Cognitive B3G Infrastructures", submitted for publication to Elsevier Computer Communications journal
- [2] G. Dimitrakopoulos, K. Tsagkaris, E. Adamopoulou, K. Demestichas, P. Demestichas, "Management Strategies for Distributed Cross-Layer Reconfigurations in the Context of Cognitive, B3G Infrastructures", in Proc. 2006 IST Mobile Summit, Budapest, Hungary, July 2007.
- [3] K. Tsagkaris, G. Dimitrakopoulos, P. Demestichas, A. Saatsakis, "Distributed Radio Access Technology Selection for Adaptive Networks in High-Speed, B3G Infrastructures", International Journal of Communication Systems, October 2007
- [4] A.Mas-Colell, "Microeconomics", Oxford University Press, 1995
- [5] 3GPP TR 25.858 V1.0.4, January 2002.
- [6] WiMAX forum website, <http://www.wimaxforum.org> , 2007.
- [7] The Network Simulator – NS2 web site, <http://www.isi.edu/nsnam/ns> , 2007.

5. ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΑΝΑΔΙΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΣΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ CDMA

Περίληψη:

Το παρόν κεφάλαιο αναλύεται στο intra-RAT κομμάτι της μεθόδου διαχείρισης B3G τμημάτων δικτύων, προϋποθέτοντας ότι έχει επιλεγεί σε ένα σύνολο πομποδεκτών προς λειτουργία ένα CDMA RAT. Οι αλγόριθμοι που θα παρουσιαστούν αποσκοπούν στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του εν λόγω CDMA RAT, με βάση την ικανοποίηση συγκεκριμένων κριτηρίων. Τμήμα του κεφαλαίου έχει δημοσιευτεί στα άρθρα [1][2].

5.1 Εισαγωγή

Από τη στιγμή που έχει επιλεγθεί μια δεδομένη διάρθρωση σε ένα τμήμα δικτύου, και επομένως έχει επιμεληθεί για τη βέλτιστη επιλογή RAT και φάσματος το αντίστοιχο κομμάτι του DNPM (βλέπε Σχήμα 2-6), σύμφωνα με τις μεθόδους που προτάθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, απομένει να εξετάσουμε την επιλεγθείσα διάρθρωση και να μελετήσουμε τρόπους βελτιστοποίησης της λειτουργικότητάς της. Με άλλα λόγια, απομένει να απομονώσουμε κάθε επιλεγθέν RAT και να προσπαθήσουμε να βελτιώσουμε συγκεκριμένες λειτουργικές του παραμέτρους. Για να το επιτύχουμε αυτό, αν υποθέσουμε ότι οι κυρίως χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες σε ένα τμήμα δικτύου θα είναι οι UMTS, HSDPA, WLAN και WiMAX, θα πρέπει να ανατρέξουμε στις μεθόδους που εν συντομία ονομάσαμε “CDMA configuration” και “OFDMA configuration”, όπως έχει προταθεί.

Στα πλαίσια του παρόντος κεφαλαίου θεωρούμε ότι ένα σύνολο από δυναμικά αναδιαρθρούμενους πομποδέκτες έχει αποφασιστεί να λειτουργήσει χρησιμοποιώντας ένα CDMA RAT (με τον όρο αυτό εννοούμε όλες τις παραλλαγές του UMTS, συμπεριλαμβανομένου και του HSDPA). Παράλληλα, κάθε πομποδέκτης που λειτουργεί σε ένα CDMA RAT χρησιμοποιεί και μια δεδομένη συχνότητα φέροντος, που είναι διαφορετική για κάθε πομποδέκτη εάν μιλάμε για πομποδέκτες που ανήκουν στον ίδιο σταθμό βάσης ενός δυναμικά αναδιαρθρούμενου στοιχείου. Βασικό στόχο λοιπόν του κεφαλαίου συνιστά η αποτελεσματική διαχείριση του διαθέσιμου CDMA φάσματος, ή ισοδύναμα η βέλτιστη κατανομή της ζήτησης στα διαθέσιμα CDMA φέροντα, βάσει κάποιων κριτηρίων που θα αναφερθούν παρακάτω.

Έτσι, το πρόβλημα που θα μελετηθεί στο παρόν κεφάλαιο αναφέρεται ως πρόβλημα «Κατανομής της Ζήτησης σε Πολλαπλά Φέροντα» (Demand Allocation into Multiple Carriers - DAMC) και τα πλαίσιά του μπορούν σε γενικές γραμμές να τοποθετηθούν ως ακολούθως. Δεδομένων:

- της κατάστασης του περιβάλλοντος
- του αριθμού των πομποδεκτών που έχει αποφασιστεί να λειτουργήσουν σε ένα CDMA RAT
- των διαθέσιμων CDMA φερόντων και
- της προς εξυπηρέτηση ζήτησης,

αντικειμενικός στόχος της επίλυσης του προβλήματος είναι να εκτιμηθούν οι πιθανές κατανομές της ζήτησης στα διαθέσιμα φέροντα (CDMA carriers) και να επιλεγεί η

καταλληλότερη, ως προς την ικανοποίηση κάποιων κριτηρίων επίδοσης του συστήματος που θα οριστούν παρακάτω.

Προηγούμενες εργασίες επί θεμάτων διαχείρισης δικτύων B3G ασχολήθηκαν με την ταυτόχρονη λειτουργία συστημάτων 3GPP – WLAN [3][4], με την έννοια της επιλογής του καταλληλότερου RAT, ενώ μια μέθοδος που αποσκόπησε στη συμπερίληψη κάθε RAT παρουσιάστηκε ήδη στα πλαίσια της διατριβής (βλέπε επίσης [5]). Επιπροσθέτως, δεδομένων των RATs που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο, το πρόβλημα του καθορισμού του φάσματος (πόρων εν γένει) έχει αντιμετωπιστεί τόσο σε επίπεδο αυτού καθαυτού του RAT (βλέπε [6][7]), όσο και εντός ενός B3G περιβάλλοντος [8][9]. Εκτός αυτών, η έρευνα μέχρι τούδε είχε στραφεί και στη διάσπαση της κίνησης μεταξύ 2 UMTS φερόντων που είχε ένας NO στη διάθεσή του [1] και κατέδειξε την αναγκαιότητα θεώρησης παρόμοιων τεχνικών και σε περιβάλλοντα δυναμικά reconfigurable και cognitive δικτύων [10].

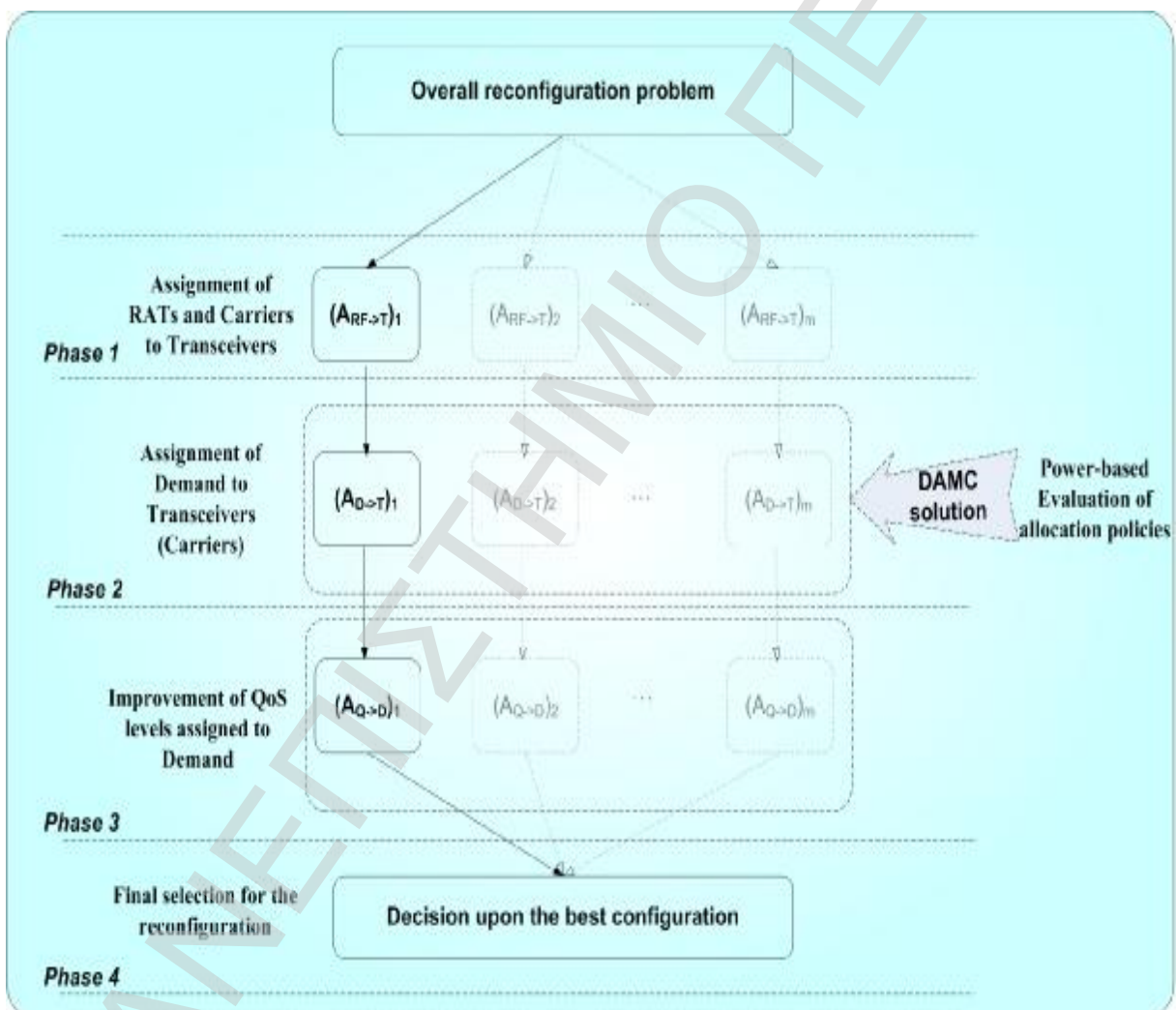
Στα πλαίσια του παρόντος κεφαλαίου θα θεωρήσουμε ότι τα εν λόγω δίκτυα αποτελούν τη βάση, όπου θα στηριχθεί η προτεινόμενη τεχνική για την ενσωμάτωση τεχνολογιών CDMA σε B3G περιβάλλοντα που λειτουργούν με στόχο την απόκτηση cognitive χαρακτήρα. Έτσι, η εργασία επί του θέματος ακολουθεί την εξής δομή: Η παράγραφος 5.2 παρουσιάζει συνοπτικά τα κίνητρα για μια τέτοια εργασία και τα προβλήματα προς αντιμετώπιση. Στη συνέχεια, η παράγραφος 5.3 παρουσιάζει αναλυτικά το πρόβλημα DAMC και το μοντελοποιεί μαθηματικά, παρουσιάζοντας ταυτόχρονα και μια μέθοδο επίλυσης του προβλήματος. Αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου παραθέτονται στην παράγραφο 5.4, ενώ ακολουθούν, αρχικά μια ανάλυση της πολυπλοκότητας της μεθόδου (5.5) και τέλος τα προκύπτοντα συμπεράσματα από την εφαρμογή της (5.6).

5.2 Κίνητρο για μελέτη

Έχει τονιστεί πολλάκις εντός της διατριβής η δυνατότητα βελτίωσης της ποιότητας των παρεχομένων υπηρεσιών στον τελικό χρήστη, μέσω της χρήσης reconfigurable και cognitive δικτύων επικοινωνιών. Βασιζόμενοι στα χαρακτηριστικά καθαυτά που διαθέτουν τα εν λόγω δίκτυα, θα λέγαμε ότι όχι μόνο απαιτούν την επιλογή του καταλληλότερου RAT (και συχνότητας) για χρήση σε κάποιο τμήμα του δικτύου που έχει υποστεί συμφόρηση και αδυνατεί να αποδώσει τα αναμενόμενα, αλλά και χρήζουν ανάπτυξης τεχνικών για τη

βέλτιστη κατανομή της κίνησης στα επιλεχθέντα ζεύγη RATs και συχνοτήτων, ζήτημα το οποίο αποτελεί και το κεντρικό θέμα του παρόντος κεφαλαίου.

Ας θεωρήσουμε ένα τυπικό παράδειγμα κάποιου τμήματος reconfigurable (ή και cognitive) δικτύου, το οποίο χρήζει αναδιάρθρωσης, κατά τα γνωστά, προκειμένου να ανταπεξέλθει στις επιταγές του περιβάλλοντος. Στη γενική της μορφή η αναδιάρθρωση έχει ήδη παρουσιαστεί ως επιλογή RATs, συχνοτήτων, κλπ. για ένα σύνολο από δυναμικά αναδιαρθρούμενους πομποδέκτες ενός σταθμού βάσης. Παρά ταύτα, για διευκόλυνση της κατανόησης του παρόντος κεφαλαίου, στο Σχήμα 5-1 παρουσιάζεται και πάλι η συνολική διαδικασία αναδιάρθρωσης ενός στοιχείου δικτύου, προσαρμοσμένη στις ανάγκες του παρόντος.



Σχήμα 5-1: Γενική απεικόνιση διαδικασίας αναδιάρθρωσης

Κατά την πρώτη φάση, ευρίσκονται όλες οι δυνατές κατανομές RATs και φερόντων στους πομποδέκτες, που τώρα ονομάζουμε $A_{RF \rightarrow T}$, υποθέτοντας συγκεκριμένες παραμέτρους του

συστήματος, κατά τα γνωστά, με τρόπο που τελικά κάθε κατανομή $A_{RF \rightarrow T}$ αντιστοιχεί σε διαφορετικό συνδυασμό από RAT και συχνότητα που ανατίθεται σε ένα πομποδέκτη, και αποτελεί ένα υποπρόβλημα. Όλα τα προκύπτοντα υποπροβλήματα υπόκεινται σε παράλληλη επεξεργασία.

Εφόσον η κατανομή $A_{RF \rightarrow T}$ είναι γνωστή, η δεύτερη φάση είναι υπεύθυνη για τη διάσπαση των χρηστών στους πομποδέκτες (κατανομή $A_{D \rightarrow T}$) ή ισοδύναμα για τη συμπλήρωση ενός συνόλου που καλούμε RFD (RAT-Frequency-Demand – RFD) για κάθε πομποδέκτη.

Στην τρίτη φάση αυξάνουμε σταδιακά τα παρεχόμενα επίπεδα QoS μέχρι το μέγιστο δυνατό επίπεδο (κατανομή $A_{Q \rightarrow D}$).

Τέλος, στην τέταρτη φάση το δίκτυο μπορεί να επιλέξει τη βέλτιστη λύση ανάμεσα σε όλα τα εξετασθέντα υποπροβλήματα.

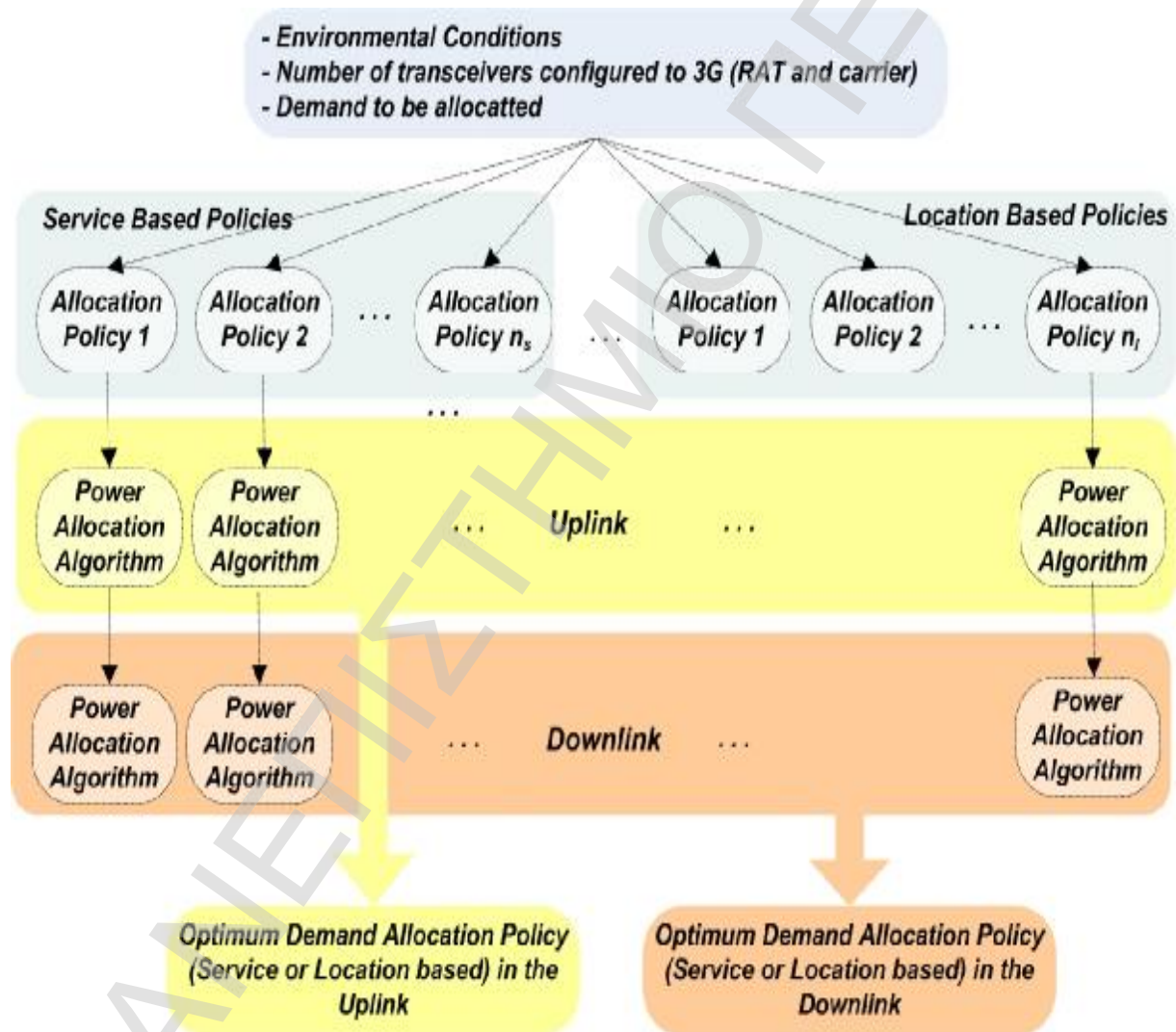
Ας δούμε τώρα πώς η μέθοδος που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο επεμβαίνει στη γενική διαδικασία αναδιάρθρωσης όπως περιγράφεται ανωτέρω:

Ως έκβαση της πρώτης φάσης, είναι πιθανό να υπάρχουν κατανομές $A_{RF \rightarrow T}$, σύμφωνα με τις οποίες ένας αριθμός πομποδεκτών έχει αποφασιστεί να λειτουργήσει σε τεχνολογία CDMA. Επιπροσθέτως, κατά τη δεύτερη φάση υπάρχει ένας δεδομένος όγκος ζήτησης που χρήζει εξυπηρέτησης από τους πομποδέκτες αυτούς. Έτσι ένα λογικό επακόλουθο θέμα είναι η εύρεση του βέλτιστου τρόπου κατανομής των χρηστών στους εν λόγω πομποδέκτες, οι οποίοι σημειώνουμε ότι λειτουργούν σε διαφορετικά φέροντα.

Για να γίνει αυτό, πρέπει να ανακαλύψουμε μια μέθοδο που θα αποτιμά πολλές πολιτικές (policies) κατανομών, μία από τις οποίες θα επιλεγεί τελικά κατά την αναδιάρθρωση. Πρέπει δε να σημειωθεί ότι με τον όρο «πολιτική» εννοούμε ένα συγκεκριμένο ποσοστό της ζήτησης που αποδίδεται σε κάθε διαθέσιμο φέρον. Με αυτή τη λογική, η λύση του προβλήματος DAMC συνίσταται στην επιλογή της αποδοτικότερης πολιτικής κατανομής της κίνησης στα φέροντα των CDMA πομποδεκτών. Η αποδοτικότερη μάλιστα πολιτική ευρίσκεται με γνώμονα την ελαχιστοποίηση της συνολικής εκπεμπομένης / ληφθείσας ισχύος από τους πομποδέκτες, με αυτό να ισοδυναμεί με την επιλογή εκείνης της διάρθρωσης που θα έχει τη μικρότερη επίδραση στις παρεμβολές στο δίκτυο.

Το πρόβλημα DAMC απεικονίζεται λεπτομερώς στο Σχήμα 5-2, ενώ κατωτέρω μοντελοποιείται μαθηματικά και επιλύεται καταλλήλως.

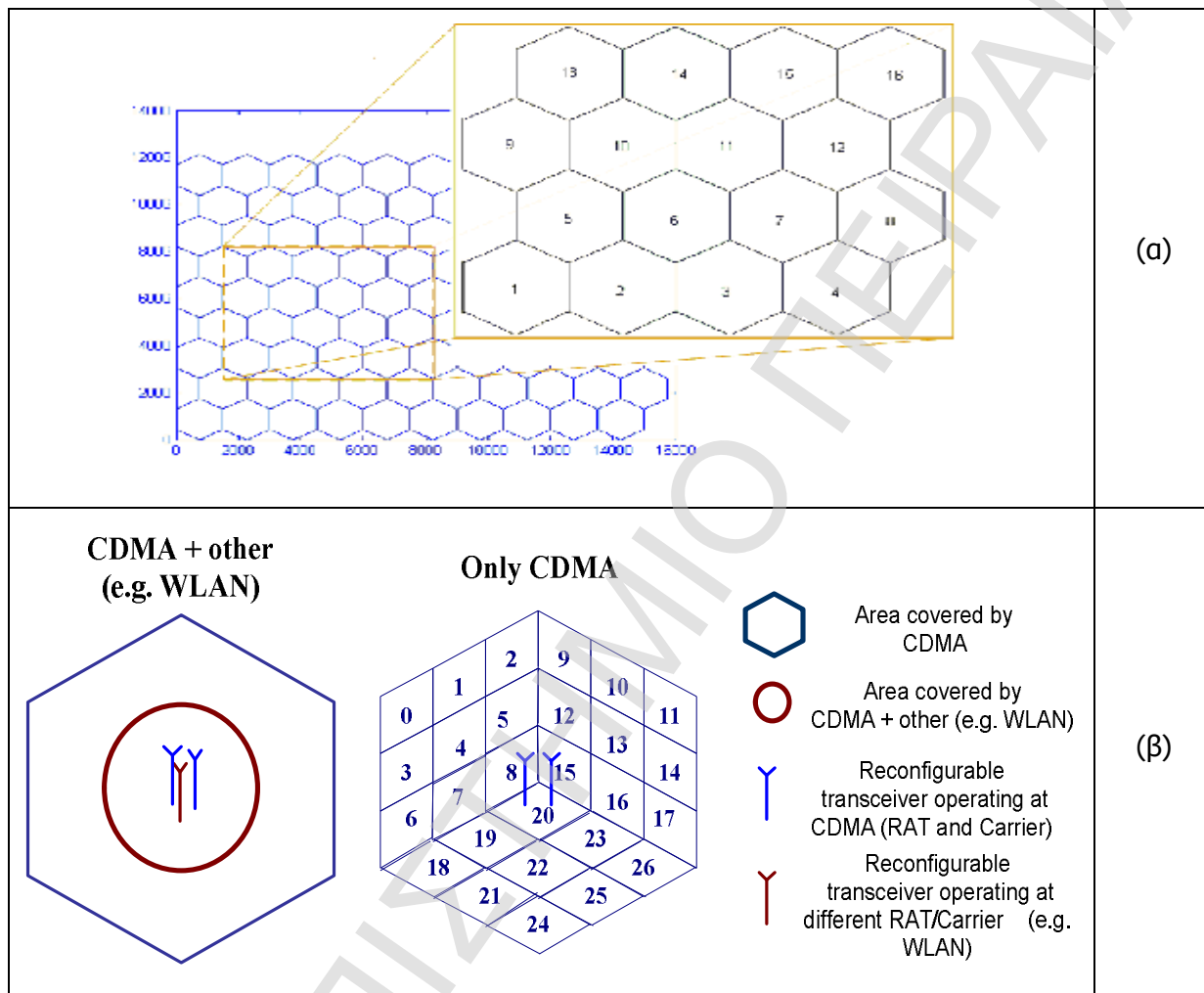
Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι το πρόβλημα δύναται να επιλυθεί είτε σε επίπεδο σταθμού βάσης είτε σε μεγαλύτερο επίπεδο, ήτοι ενός τμήματος δικτύου. Στην πρώτη περίπτωση κάθε σταθμός βάσης (σε ένα στοιχείο δικτύου - κυψέλη) αποφασίζει για τη διάρθρωση των πομποδεκτών του με ένα τρόπο πλήρως κατανοημένο, δίχως να λαμβάνει υπόψη την πιθανή επίπτωση της απόφασης αυτής στους γείτονες σταθμούς βάσης. Στη δεύτερη περίπτωση αντίθετα, η απόφαση για την αναδιάρθρωση λαμβάνεται μετά από θεώρηση και των πιθανών επιπτώσεών της μέσα σε όλο το τμήμα δικτύου (και αυτή η περίπτωση επίσης αποτελεί αντικείμενο του παρόντος).



Σχήμα 5-2: Απεικόνιση προβλήματος DAMC

5.3 DAMC – Αναλυτική Περιγραφή

Αυτή η παράγραφος περιέχει μια αναλυτική περιγραφή του προβλήματος DAMC, βασική για την κατανόηση της επίλυσής του που θα πραγματοποιηθεί κατωτέρω.



Σχήμα 5-3: (α) Τμήμα δικτύου υπό θεώρηση (β) Κάλυψη σταθμού βάσης

5.3.1 Παράμετροι εισόδου: Σύστημα, Περιοχή Εξυπηρέτησης, Υπηρεσίες

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-3 (α), θεωρούμε ένα τμήμα δικτύου που περιλαμβάνει ένα σύνολο από σταθμούς βάσης V (όπου κάθε σταθμός βάσης εξυπηρετεί μια κυψέλη). Καθένας από τους σταθμούς βάσης διαθέτει έναν αριθμό δυναμικά αναδιαρθρούμενων πομποδεκτών, κάποιιοι από τους οποίους έχει αποφασιστεί να λειτουργήσουν σε τεχνολογία

CDMA. Η περιοχή κάλυψης των CDMA πομποδεκτών διασπάται σε ένα σύνολο από ελαχίστου μεγέθους τμήματα που καλούμε "pixels", P , τα οποία απλώνονται σε ζώνες (σύνολο Z) γύρω από το σταθμό βάσης. Πομποδέκτες που λειτουργούν με άλλα RATs (εν γένει OFDMA, πχ WLAN) διαθέτουν διαφορετικές περιοχές κάλυψης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-3 (β). Τα pixels που εξυπηρετούνται από το σταθμό βάσης v σχηματίζουν το σύνολο P_v .

Το σύνολο των υπηρεσιών καλείται S . Οι απαιτήσεις σε QoS μιας υπηρεσίας $s \in S$ εκφράζονται μέσω των ιδίων χαρακτηριστικών κάθε υπηρεσίας s , δηλαδή το ρυθμό μετάδοσης, τον παράγοντα "service activity factor", και την ελάχιστη απαιτούμενη αναλογία «ενέργειας ανά bit προς τη φασματική πυκνότητα παρεμβολών».

Το σύνολο των διαθέσιμων CDMA φερόντων που ανήκουν στο μοναδικό πάροχο που θεωρούμε, ορίζεται ως F . Προφανώς, το σύνολο των CDMA φερόντων ανά σταθμό βάσης v είναι F_v .

Τέλος, εκφράζουμε τη συνολική εκπεμπόμενη ισχύ ανά πομποδέκτη του σταθμού βάσης v και για το φέρον f μέσω του $P_{v,f}^{down}$, το άνω φράγμα του οποίου είναι αντίστοιχα $P_{BS,f}^{MAX}$. Παρομοίως, εκφράζουμε τη συνολική λαμβανόμενη ισχύ ανά πομποδέκτη του σταθμού βάσης v και για το φέρον f μέσω του $P_{v,f}^{up}$, το άνω φράγμα του οποίου είναι η μέγιστη επιτρεπτή ισχύς εκπομπής ενός κινητού, που δηλώνεται ως P_{MT}^{MAX} .

Ακόμα, ο παράγοντας φόρτωσης ενός στοιχείου δικτύου στην άνω ζεύξη (uplink loading factor), ν , για το φέρον f είναι $lf_{v,f}^{up}$ ($\forall f \in F_v$). Το μέγιστο επιτρεπτό uplink loading factor ορίζεται ως $lf_{v,f}^{up,max}$.

5.3.2 Πολιτικές Κατανομής Ζήτησης

Ορίζουμε ως σύνολο $A = \{A_i \mid i \in Z_+^*\}$ το σύνολο των διαφορετικών πολιτικών, καθεμιά από τις οποίες αντιστοιχεί σε μια διαφορετική κατανομή της ζήτησης στα CDMA φέροντα. Το σύνολο A διαιρείται σε 2 υποσύνολα, A^s και A^l . Το υποσύνολο A^s περιλαμβάνει τις πολιτικές βασισμένες στην υπηρεσία (*Service Based Policies*), που σημαίνει ότι οι πολιτικές κατανομής εξαρτώνται από τον τύπο των αναφερομένων υπηρεσιών, ενώ το υποσύνολο A^l περιλαμβάνει τις πολιτικές βασισμένες στην τοποθεσία (*Location Based Policies*) που υπονοεί

ότι οι πολιτικές χωρίζονται με βάση την τοποθέτηση των χρηστών μέσα στην περιοχή εξυπηρέτησης.

Αναλυτικότερα, στην περίπτωση των πολιτικών A^s , καθένα από τα διαθέσιμα CDMA φέροντα αναλαμβάνει την εξυπηρέτηση ενός συγκεκριμένου ποσοστού της συνολικής ζήτησης, το οποίο ποσοστό εξαρτάται από τον τύπο της υπηρεσίας. Επί παραδείγματι, η ισοστή τέτοια πολιτική (A_i^s) εκφράζεται μέσω του τρισδιάστατου πίνακα $A_i^s = \{x_{v,s,f} \mid \forall (v,s,f) \in (V \times S \times F_v)\}$, όπου το i είναι ένας μη μηδενικός - θετικός ακέραιος ($i \in Z_+^*$) που δηλώνει μια συγκεκριμένη κατανομή, ενώ κάθε στοιχείο $x_{v,s,f}$ εκφράζει το ποσοστό της ζήτησης της υπηρεσίας s στο σταθμό βάσης v , που κατανέμεται στο φέρον f . Για παράδειγμα, η έκφραση $x_{v_2,s_1,f_1} = 20\%$ υποδηλώνει την ανάθεση του 20% της ζήτησης για την υπηρεσία s_1 σε ένα πομποδέκτη που ανήκει στο σταθμό βάσης v_1 και λειτουργεί με το φέρον f_1 .

Αντίστοιχα, στην περίπτωση των πολιτικών A^l , σημασία έχει η τοποθέτηση (σε pixels) της ζήτησης. Με άλλα λόγια, η ανάθεση μιας αίτησης για σύνδεση σε ένα φέρον εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από την τοποθεσία που ευρίσκεται ο εν λόγω χρήστης μέσα στην κυψέλη που καλύπτει ο δεδομένος σταθμός βάσης. Έτσι, όπως και προηγουμένως, κάθε πολιτική A_i^l εκφράζεται μέσω του πίνακα $A_i^l = \{x_{v,p,f} \mid \forall (v,p,f) \in (V \times P_v \times F_v), i \in Z_+^*\}$. Κάθε στοιχείο $x_{v,p,f}$ εκφράζει το ποσοστό των συνδέσεων (ζήτησης) ανά pixel p του σταθμού βάσης v που κατανέμεται στο φέρον f .

Και στις δύο περιπτώσεις, η μέθοδος DAMC θεωρεί και τις δύο πολιτικές κατανομών και αποσκοπεί στο να αποτιμήσει την επίδοσή τους, επιλέγοντας την καταλληλότερη είτε από το σύνολο A^s είτε από το σύνολο A^l . Η εν λόγω αποτίμηση επίδοσης πραγματοποιείται βάσει κριτηρίων όπως περιγράφεται κατωτέρω.

5.3.3 Κριτήρια Επιλογής της βέλτιστης πολιτικής κατανομής

Το κριτήριο βάσει του οποίου καθορίζεται η απόδοση κάθε πολιτικής κατανομής της ζήτησης στα φέροντα εξαρτάται σε γενικές γραμμές από τις ανάγκες και τη στρατηγική που επιθυμεί να καθορίσει κάθε πάροχος. Στα πλαίσια της διατριβής θεωρούμε ως τέτοιο (ως έχει

προαναφερθεί) την ελαχιστοποίηση της συνολικής εκπεμπομένης / λαμβανομένης ισχύος στις ζεύξεις ανόδου (uplink) και καθόδου (downlink) για κάθε πομποδέκτη στο σταθμό βάσης ν , για κάθε CDMA φέρον $f \in F_\nu$:

$$\text{Ελαχιστοποίηση} \quad OF^d(A) = \frac{1}{|V|} \cdot \sum_{f \in F_\nu} \sum_{v \in V} P_{v,f}^{down} \quad \text{στο downlink} \quad (5.1)$$

$$\text{Ελαχιστοποίηση} \quad OF^u(A) = \frac{1}{|V|} \cdot \sum_{f \in F_\nu} \sum_{v \in V} P_{v,f}^{up} \quad \text{στο uplink} \quad (5.2)$$

με βάση την προτεινόμενη εκ της πολιτικής A (είτε A^s είτε A^l) κατανομή της αίτησης στα διαθέσιμα CDMA φέροντα.

Για αυτό το λόγο επιστρατεύουμε τους αλγόριθμους κατανομής ισχύος που αναλύονται στα [12][13] και τους εκτελούμε $|F_\nu|$ φορές ανά σταθμό βάσης, δηλαδή μία φορά για καθένα εκ των διαθέσιμων φερόντων στο ν . Η είσοδος που χρειάζονται οι εν λόγω αλγόριθμοι ([12] [13]) έχει να κάνει με τη ζήτηση ανά ριxel και υπηρεσία πολλαπλασιασμένη με το ποσοστό που υποδεικνύει κάθε πολιτική A_i και μπορεί να εκφραστεί ως:

$$d'_{s,p} = \lfloor x_{\nu,s,f} \cdot d_{s,p} \rfloor \quad \forall (s \in S), (p \in P_\nu) \quad (5.3)$$

στην περίπτωση των πολιτικών βασισμένων σε υπηρεσία και

$$d'_{s,p} = \lfloor x_{\nu,p,f} \cdot d_{s,p} \rfloor \quad \forall (s \in S), (p \in P_\nu) \quad (5.4)$$

στην περίπτωση πολιτικών βασισμένων στην τοποθεσία, όπου η έκφραση $\lfloor \cdot \rfloor$ δηλώνει το ακέραιο μέρος της εσωκλειόμενης ποσότητας.

Τελικά λοιπόν παρατηρούμε ότι η λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης DAMC αντιστοιχεί και στην εύρεση εκείνης της μορφής αναδιάρθρωσης που οδηγεί στην ελαχιστοποίηση των παρεμβολών στο δίκτυο.

5.4 Προσομοίωση και Ενδεικτικά Αποτελέσματα

Σε αυτή την παράγραφο παραθέτουμε διάφορα σενάρια προσομοιώσεων και αποτελέσματα που καταδεικνύουν τη λειτουργικότητα της μεθόδου που προτείνεται στο παρόν κεφάλαιο.

5.4.1 Σενάριο 1 – Γενικές Παράμετροι Εισόδου

Το τμήμα δικτύου μοντελοποιείται μέσω 16 σταθμών βάσης, καθένας εκ των οποίων διαθέτει τουλάχιστον 2 πομποδέκτες που λειτουργούν σε CDMA, με τη μεταξύ τους απόσταση να τίθεται ίση με 1.5km , όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-3 (β). Θεωρούμε ότι 27 pixels (χωρισμένα σε 3 ζώνες) διατάσσονται γύρω από κάθε σταθμό βάσης, δηλαδή σε κάθε κυψέλη. Ας θεωρήσουμε μια απλή, πλην όμως προφανή περίπτωση όπου ένας πάροχος έχει υπό την κατοχή του δύο ευρυζωνικά CDMA φέροντα, f_1 και f_2 , καταλαμβάνοντας συνολικά φάσμα εύρους $2 \times 5\text{MHz}$. Επιπλέον, τα 2 φέροντα είναι αμοιβαίως πλήρως απομονωμένα, έτσι ώστε να εκμηδενίζονται οι μεταξύ τους παρεμβολές. Τέλος, 3 τύποι υπηρεσιών υποστηρίζονται, μια υπηρεσία φωνής s_1 και δύο υπηρεσίες δεδομένων s_2 και s_3 , αντιστοίχως.

Το Σχήμα 5-4 (α) περιγράφει τα προφίλ των παρεχομένων υπηρεσιών.

Επιπροσθέτως, οι παράμετροι συστήματος που σχετίζονται με το παράδειγμά μας συνοψίζονται στο Σχήμα 5-4 (β). Σημειώνουμε εδώ ότι κάποιες από τις εν λόγω παραμέτρους δύνανται να μεταβάλλονται σε περιβάλλοντα γνωστικών (δυναμικά αναδιαρθρούμενων) δικτύων σε σχέση με απλά UMTS συστήματα (τις τιμές των οποίων χρησιμοποιούμε), αλλά τέτοιες μεταβολές ουδόλως επηρεάζουν τη λειτουργικότητα των αλγορίθμων.

(α)

	Voice Service		Data Service1		Data Service2	
	Uplink	Downlink	Uplink	Downlink	Uplink	Downlink
Bit Rate (Kbps)	12.2	12.2	64	64	64	144
Target E_b/I_o (dB)	4	6.5	2	5	1.5	4
Service Activity Factor	0.67	0.67	1.0	1.0	1.0	1.0

(β)

Chip Rate W (Mcps)	3.84
Thermal Noise Power P_N (dBm)	-108.1
P_{BS,f_1}^{MAX} (dBm)	40
P_{BS,f_2}^{MAX} (dBm)	40
P_{MT}^{MAX} (dBm)	21
Propagation model	Okumura-Hata (macro) + Log-Normal Shadowing
Antennas type	Omni
Orthogonality factor (downlink)	0.4

(γ)

Service	Number of users
s_1 (Voice 12,2/12,2Kbps)	20
s_2 (Data 64/64Kbps)	10
s_3 (Data 64/144Kbps)	4

(δ)

Service	Number of users
s_1 (Voice 12,2/12,2Kbps)	45
s_2 (Data 64/64Kbps)	6
s_3 (Data 64/144Kbps)	2

Σχήμα 5-4: (α) Προφίλ παρεχομένων υπηρεσιών (β) Παράμετροι συστήματος (γ) Ζήτηση ανά υπηρεσία – σενάριο 1 (δ) Ζήτηση ανά υπηρεσία – σενάριο 2 (σύγκριση πολιτικών)

Τέλος, το σενάριό μας θεωρεί ότι τη στιγμή που γίνεται γνωστή η ανάγκη για κάποιας μορφής αναδιάρθρωση στο σύστημα, για κάθε σταθμό βάσης υπάρχουν ενεργές 20 συνδέσεις s_1 , 10 συνδέσεις s_2 και 4 συνδέσεις s_3 που πρέπει να ανατεθούν καταλλήλως στα διαθέσιμα CDMA φέροντα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-4 (γ).

5.4.2 **Σενάριο 1 – Εφαρμογή πολιτικών A^s**

Όπως έχει αναφερθεί, κάθε πολιτική του τύπου A^s αντιστοιχεί σε συνδυασμό 3 ποσοστών ζήτησης, ένα για κάθε υπηρεσία (3 τύποι υπηρεσιών). Έτσι, για να γίνει η αναζήτηση στο χώρο των πολιτικών, θέτουμε τα ποσοστά για τις υπηρεσίες s_1 και s_2 να κυμαίνονται από το 0% μέχρι το 100% με βήμα 10% (έστω για το φέρον 1), ενώ αντίστοιχα για την υπηρεσία s_3 το ποσοστό της ζήτησης που ανατίθεται στο φέρον 1 κυμαίνεται από 20% έως 100% με βήμα του 20%, λόγω του δεδομένου αριθμού συνδέσεων (4) για την υπηρεσία αυτή. Η επίπτωση του επιλεγόμενου βήματος και των ορίων των ποσοστών μελετάται στην παράγραφο 5.5. Το Σχήμα 5-5 (α) δείχνει τις πιθανές πολιτικές, σε καθεμιά από τις οποίες ανατίθεται ένας κωδικός A_i^s (*Allocation Policy Code - APC*).

Ο συνολικός αριθμός πολιτικών ανέρχεται σε:

$$\left(\frac{100-0}{10}+1\right) \times \left(\frac{100-0}{10}+1\right) \times \left(\frac{100-20}{20}+1\right) = 605,$$

s_1 s_2 s_3

κάποιες από τις οποίες απορρίπτονται εξαιτίας του γεγονότος ότι οι αλγόριθμοι ([12][13]) ίσως δεν οδηγούν σε αποδεκτές λύσεις για κάποιες από τις κατανομές.

Προσπαθώντας λοιπόν να ερμηνεύσουμε μια γραμμή του πίνακα στο Σχήμα 5-5 (α), πχ. τη σκιασμένη, πρέπει να τονίσουμε ότι η πολιτική με $APC = A_{56}^s$, αναθέτει 10% της ζήτησης για την υπηρεσία s_1 , 0% της ζήτησης για την υπηρεσία s_2 και 20% της ζήτησης για την υπηρεσία s_3 στο πρώτο φέρον. Λογικά λοιπόν τα απομένοντα ποσοστά της ζήτησης για κάθε υπηρεσία (90%, 100% και 80%, αντίστοιχα) ανατίθενται στο δεύτερο φέρον.

(a)

Ποσοστό ζήτησης ανά υπηρεσία στο φέρον 1			Allocation Policy Code
S ₁	S ₂	S ₃	
0%	0%	20%	A ₁ ^s
...
...
0%	0%	100%	A ₅ ^s
0%	10%	20%	A ₆ ^s
...
...
10%	0%	20%	A ₅₆ ^s
...
80%	40%	60%	A ₄₆₃ ^s = $\hat{A}^{s,down}$
...
100%	40%	40%	A ₅₇₂ ^s = $\hat{A}^{s,up}$
...
100%	100%	100%	A ₆₀₅ ^s

(β)			(γ)		
Service	% of demand to carrier 1	% of demand to carrier 2	Service	% of demand to carrier 1	% of demand to carrier 2
s_1	80%	20%	s_1	100%	0%
s_2	40%	60%	s_2	40%	60%
s_3	60%	40%	s_3	40%	60%

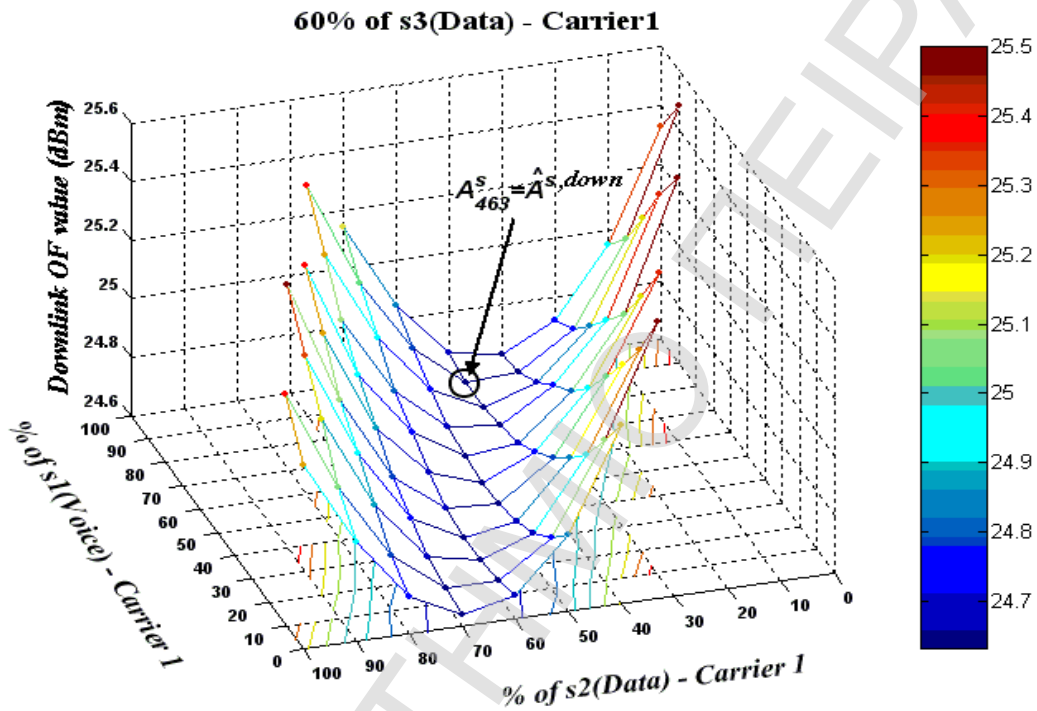
Σχήμα 5-5: Πολιτικές A^s (α) Χώρος λύσεων (β) Καλύτερη πολιτική για downlink (γ) Καλύτερη πολιτική για uplink

Ανωτέρω υποθέτουμε ότι η ίδια πολιτική εφαρμόζεται σε καθένα σταθμό βάσης μέσα στο υπό θεώρηση τμήμα δικτύου. Στην περίπτωση που θελήσουμε να εξετάσουμε την εφαρμογή διαφορετικής πολιτικής για κάθε σταθμό βάσης v , ο αριθμός των συνδυασμών – πολιτικών εκτοξεύεται στα επίπεδα του 605^{16} στο σενάριό μας, όπως φαίνεται και από την ανάλυση της πολυπλοκότητας της μεθόδου στην παράγραφο 5.5. Είναι λογικό άλλωστε, όσο αυξάνει η περιοχή που θέλουμε να ελέγξουμε, τόσο αυξάνει και η απαιτούμενη πολυπλοκότητα. Ούτως ή αλλιώς, μετά από μια αναλυτική αναζήτηση (exhaustive search) στο χώρο των λύσεων, εφαρμόζοντας τους αλγορίθμους ανάθεσης ισχύος, καταλήγουμε στις βέλτιστες πολιτικές τύπου A^s , τόσο για την άνω ζεύξη όσο και για την κάτω ζεύξη. Το Σχήμα 5-5(β) και το Σχήμα 5-5 (γ) απεικονίζουν τις επιλεχθείσες βέλτιστες πολιτικές για το downlink και το uplink, αντιστοίχως.

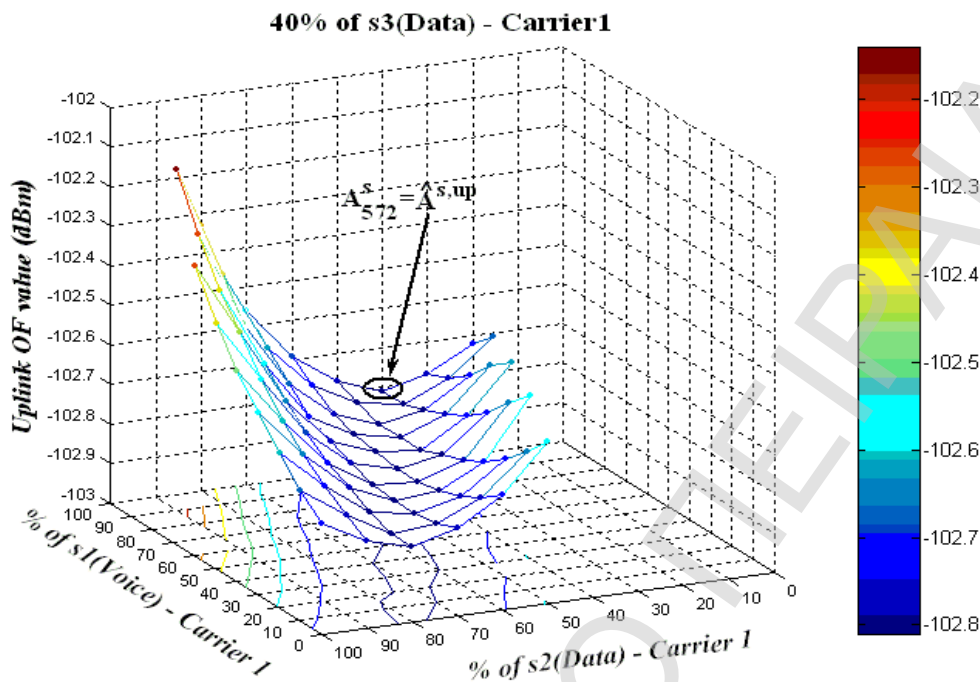
Συγκεκριμένα, αναφορικά με τη βελτιστοποίηση στο downlink, το αποτέλεσμα δείχνει ότι η βέλτιστη πολιτική που συνιστάται σε κάθε σταθμό βάσης να ακολουθήσει είναι να αναθέσει 80%, 40% και 60% των s_1 , s_2 και s_3 , αντιστοίχως, στο πρώτο φέρον, και την υπόλοιπη

ζήτηση στο δεύτερο φέρον ($\hat{A}^{s,down} = A_{463}^s$). Με την ίδια λογική, για την περίπτωση του uplink, η βέλτιστη πολιτική είναι να ανατεθούν ποσοστά 100%, 40% και 40% των s_1 , s_2 και s_3 , αντιστοίχως, στο πρώτο φέρον, και το υπόλοιπο τμήμα της ζήτησης στο δευτερό φέρον ($\hat{A}^{s,up} = A_{572}^s$).

(α)



(β)



Σχήμα 5-6: Σενάριο 1 – τιμές OF για πολιτικές (α) downlink; (β) uplink

Προφανώς βέβαια εναπόκειται στη στρατηγική που επιθυμεί να ακολουθήσει ο πάροχος η επιλογή μίας εκ των πολιτικών κατανομής της ζήτησης είτε για το downlink είτε για το uplink. Η από κοινού αντιμετώπιση του προβλήματος δε, για τις δύο ζεύξεις, ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

Το Σχήμα 5-6 (α) απεικονίζει τις τιμές $OF^d(A)$ που αντιστοιχούν στις διαφορετικές πολιτικές που εξετάζονται στο downlink και για την περίπτωση που το 60% της ζήτησης για την s_3 αντίκειται στο πρώτο φέρον. Για λόγους συντομίας δεν περιέχονται τα υπόλοιπα σχήματα, δηλαδή οι περιπτώσεις 20%, 40%, 80% και 100% της s_3 στο πρώτο φέρον.

Ομοίως, στο Σχήμα 5-6 (β) εμπεριέχονται οι τιμές $OF^u(A)$ για το uplink και για την περίπτωση που το 40% της ζήτησης για την s_3 ανατίθεται στο πρώτο φέρον. Όπως και προηγουμένως, δεν περιέχονται τα σχήματα για τις περιπτώσεις ανάθεσης 20%, 60%, 80% και 100% της ζήτησης για την s_3 στο φέρον 1. Ακόμα, οι πολιτικές που απορρίπτονται (από τους αλγορίθμους ανάθεσης ισχύος, όπως προαναφέρθηκε) δεν απεικονίζονται στα ανωτέρω σχήματα. Με αυτό τον τρόπο δικαιολογούνται οι ασυνέχεις στις επιφάνειες των σχημάτων.

Επιπλέον, οι διαφορές στις τιμές της OF δικαιολογούνται από το γεγονός ότι ο προς εξυπηρέτηση όγκος ζήτησης, καθώς και η χωρική κατανομή του, είναι ίδια για κάθε σταθμό βάσης στο τμήμα δικτύου. Τέλος, συμπεραίνεται ότι η τάση σε μείωση (χαμήλωμα) της επιφάνειας κοντά στα μεσαία ποσοστά (50%) δεν έχει γενική εφαρμογή. Αντιθέτως, οι βασικές διαφορές στα χαρακτηριστικά των παρεχομένων υπηρεσιών επιφέρουν μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας στην επιλογή του βέλτιστου σημείου της επιφάνειας.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε ότι στην περίπτωση του uplink, εκτός από την πολιτική A_{572}^s που φαίνεται στο Σχήμα 5-5 (γ), ορισμένες άλλες πολιτικές οδηγούν στην ίδια τιμή της OF και άρα θεωρούνται επίσης βέλτιστες. Σε μια τέτοια περίπτωση, η επιλογή της καταλληλότερης πολιτικής γίνεται θεωρώντας την προηγούμενη κατάσταση του δικτύου και λαμβάνοντας ως επικρατέστερη την πολιτική που χρειάζεται τις λιγότερες αλλαγές σε φέρον (ή και RAT), ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απαιτήσεις σηματοδοσίας στο δίκτυο.

5.4.3 Σενάριο 1 – Εφαρμογή πολιτικών A'

Στην περίπτωση αυτή, αποσκοπούμε στην κατανομή της ζήτησης στα 2 φέροντα λαμβάνοντας υπόψη την πληροφόρηση που έχουμε σχετικά με την τοποθέτηση (rixel) κάθε χρήστη. Πιο αναλυτικά, κατανέμουμε τη ζήτηση στα φέροντα βάσει της ζώνης (απόστασης) που ανήκει το κάθε rixel. Εάν θέλαμε να δούμε την περίπτωση του τι θα γίνει αν θεωρήσουμε κάθε rixel χωριστά (αντί για κάθε ζώνη), η πολυπλοκότητα του προβλήματος θα αυξανόταν δραματικά. Αυτό είναι φανερό εφόσον στην περίπτωση που μελετάμε στη διατριβή αυτή τα rixels ομαδοποιούνται σε ζώνες μειώνοντας την επακόλουθη πολυπλοκότητα. Κάθε πολιτική εξαρτάται από την τοποθέτηση της ζήτησης στις ζώνες μέσα στο σταθμό βάσης. Το Σχήμα 5-6 (α) απεικονίζει όλες τις υποψήφιες πολιτικές A' .

(a)				
	Allocated Carrier per zone			Allocation Policy Code
	Zone 1	Zone 2	Zone 3	
	1	1	1	A'_1
	1	1	2	A'_2

	1	2	1	$A_3^l = \hat{A}^{l,up} = \hat{A}^{l,down}$
	1	2	2	A_4^l

	2	2	2	A_8^l
(β)				
	Allocated Carrier per zone			
	<i>Pixels of zone 1</i>	<i>Pixels of zone 2</i>	<i>Pixels of zone 3</i>	
	1	2	3	

Σχήμα 5-7: Πολιτικές A^l (α) Χώρος λύσεων; (β) Καλύτερη πολιτική \hat{A}^l

Προφανώς, αν z είναι ο συνολικός αριθμός ζωνών και $|F|$ ο αριθμός διαθέσιμων φερόντων CDMA, ο συνολικός αριθμός δυνατών πολιτικών είναι $|F|^{|z|}$. Στο παράδειγμά μας, ο αριθμός των ζωνών γύρω από τους πομποδέκτες είναι $|Z|=3$, ενώ ο αριθμός των φερόντων είναι $|F|=2$. Συνεπώς, ο αριθμός των δυνατών πολιτικών είναι $2^3=8$.

Αναφορικά με το σενάριό μας, ως βέλτιστη πολιτική επιλέγεται η απεικονιζόμενη στο Σχήμα 5-7 (β), καθώς είναι αυτή η οποία ελαχιστοποιεί τη μέση λαμβανόμενη και εκπεμπόμενη ισχύ ανά σταθμό βάσης. Παρατηρούμε λοιπόν ότι η καλύτερη πολιτική τόσο στο uplink όσο και στο downlink ($\hat{A}^{l,up} = \hat{A}^{l,down}$) αντιστοιχεί στην ανάθεση των συνδέσεων που βρίσκονται στα pixels των ζωνών 1 και 3 στο φέρον 1, ενώ οι συνδέσεις που βρίσκονται στα pixels που ανήκουν στη ζώνη 2 ανατίθενται στο φέρον 2.

5.4.4 Σενάριο 2 – Σύγκριση μεταξύ A^s και A^l

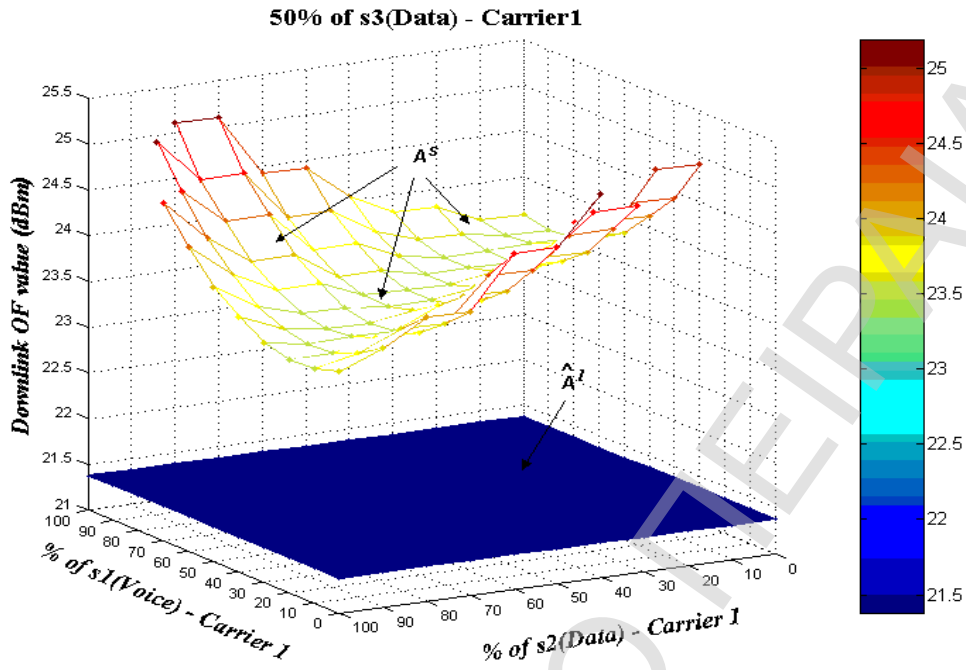
Στην παρούσα παράγραφο, εφαρμόζουμε τη DAMC μέθοδο σε 3 διαφορετικές συνθήκες φορτίου (διατηρώντας πάντα τον ίδιο όγκο ζήτησης που πρέπει να εξυπηρετηθεί από CDMA RATs) ώστε να συγκρίνουμε τις πολιτικές A^s και A^l βάσει των επιλεχθέντων κριτηρίων. Οι συνθήκες αυτές είναι οι ακόλουθες:

- φορτίο ομοιόμορφα καταμεμημένο στις ζώνες
- φορτίο συγκεντρωμένο στα ακραία pixels
- φορτίο τυχαία καταμεμημένο

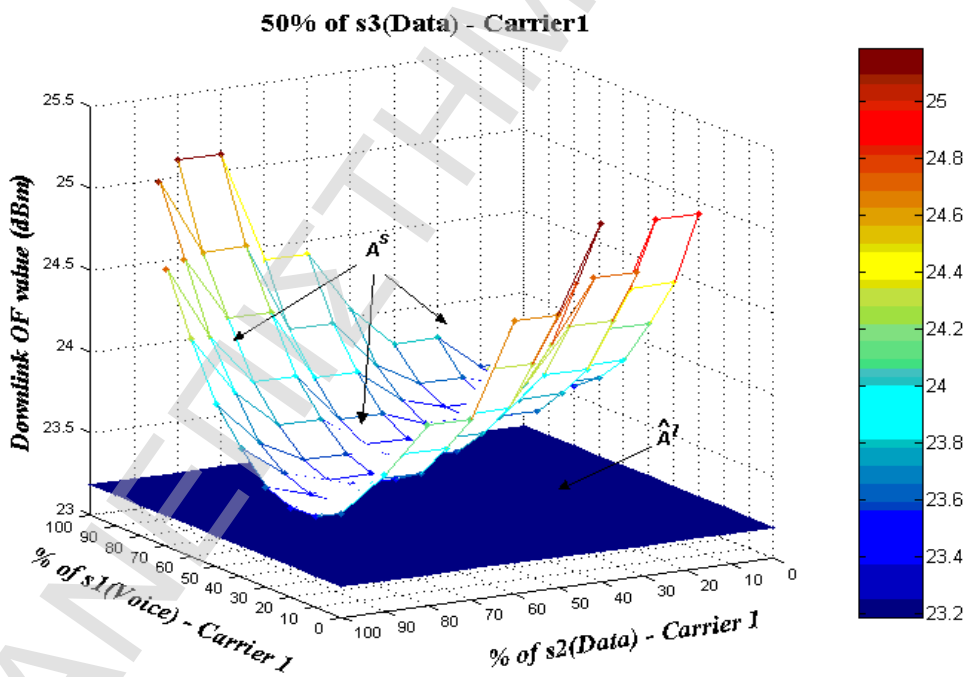
Σημειώνουμε ότι οι υπόλοιπες παράμετροι θεωρούνται ότι παραμένουν αμετάβλητες στις προσομοιώσεις.

Η διαδικασία έχει ως εξής: Για κάθε τύπο φορτίου απομονώνουμε τη βέλτιστη κατανομή \hat{A}^l και τη συγκρίνουμε με το σύνολο των πολιτικών A^s . Τα αποτελέσματα της σύγκρισης παρατίθενται για τις 3 συνθήκες φορτίου στο downlink στο Σχήμα 5-8 (α), (β) και (γ), ενώ αντίστοιχα για τις ίδιες 3 συνθήκες φορτίου στο uplink τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 5-9 (α), (β) και (γ). Για διευκόλυνση της κατανόησης του τρόπου παρουσίασης των αποτελεσμάτων, η βέλτιστη πολιτική κατανομής $\hat{A}^{l,up}$ ($\hat{A}^{l,down}$), απεικονίζεται μέσω ενός επιπέδου που είναι παράλληλο στο επίπεδο XY και τέμνει τον άξονα των Z στο σημείο ακριβώς της τιμής $OF(\hat{A}^{l,up})$ ($OF(\hat{A}^{l,down})$).

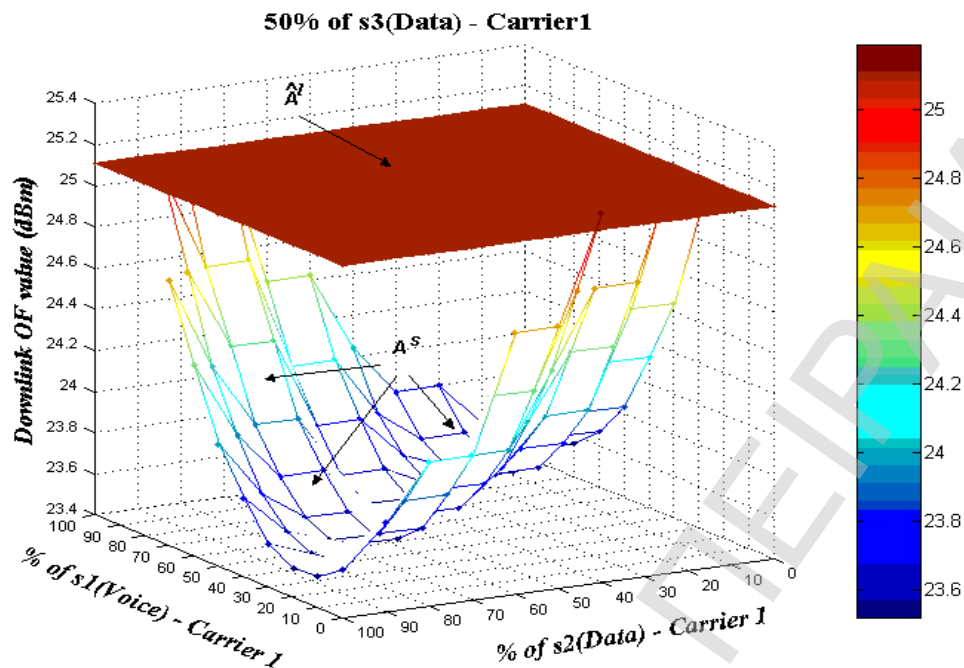
(α)



(β)



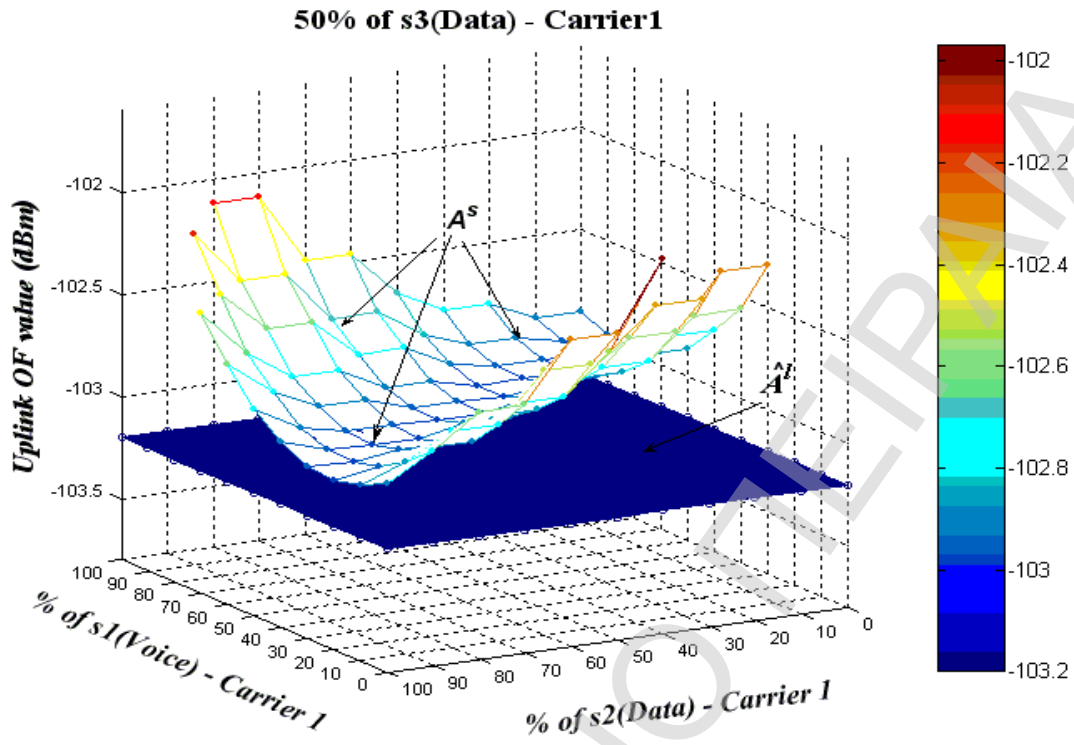
(γ)



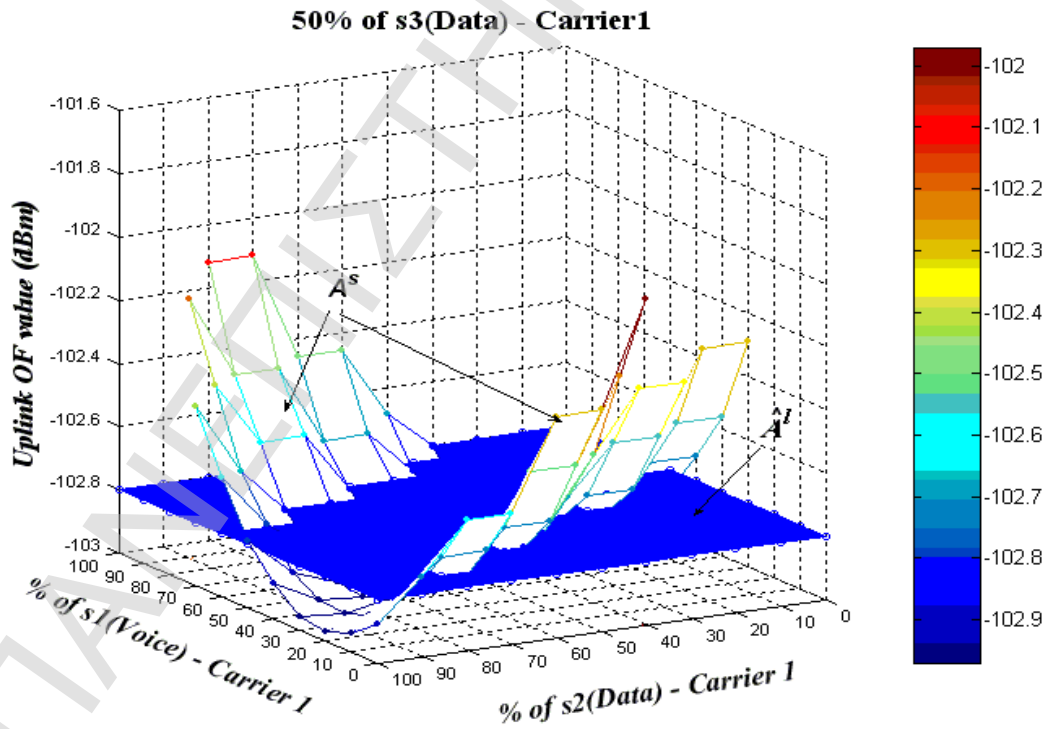
Σχήμα 5-8: Σενάριο 2 (σύγκριση πολιτικών) στο downlink; (α) ομοιόμορφη κατανομή φορτίου στις ζώνες, (β) συγκέντρωση φορτίου στα ακραία pixels, (γ) τυχαία κατανομή φορτίου

Στο downlink, παρατηρώντας το Σχήμα 5-8 (α), συμπεραίνουμε ξεκάθαρα ότι οι πολιτικές A^l αποδίδουν καλύτερα από τις πολιτικές A^s στην περίπτωση της ομοιόμορφης κατανομής του φορτίου στις ζώνες γύρω από τους πομποδέκτες (του σταθμού βάσης). Επιλέον, ακόμα και στην περίπτωση που το φορτίο συγκεντρώνεται στα άκρα της κυψέλης (ακραία pixels), βλέπουμε στο Σχήμα 5-8 (β) ότι πάλι οι πολιτικές A^l υπερέχουν ακόμα σε σχέση με τις αντίστοιχες A^s , με τη μεταξύ τους διαφορά όμως να γίνεται μικρότερη από προηγουμένως. Τέλος, στην περίπτωση της τυχαίας κατανομής του φορτίου (βλέπε Σχήμα 5-8 (γ)), οι πολιτικές A^s γίνονται τώρα μακράν καλύτερες των A^l . Άρα, συμπερασματικά, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, η βέλτιστη πολιτική θα πρέπει να αναζητηθεί ανάμεσα στις πολιτικές A^l , με εξαίρεση την περίπτωση της τυχαίας κατανομής φορτίου (που είναι όμως και η πλέον πιθανή), όπου οι πολιτικές A^s αποδεικνύονται καλύτερες.

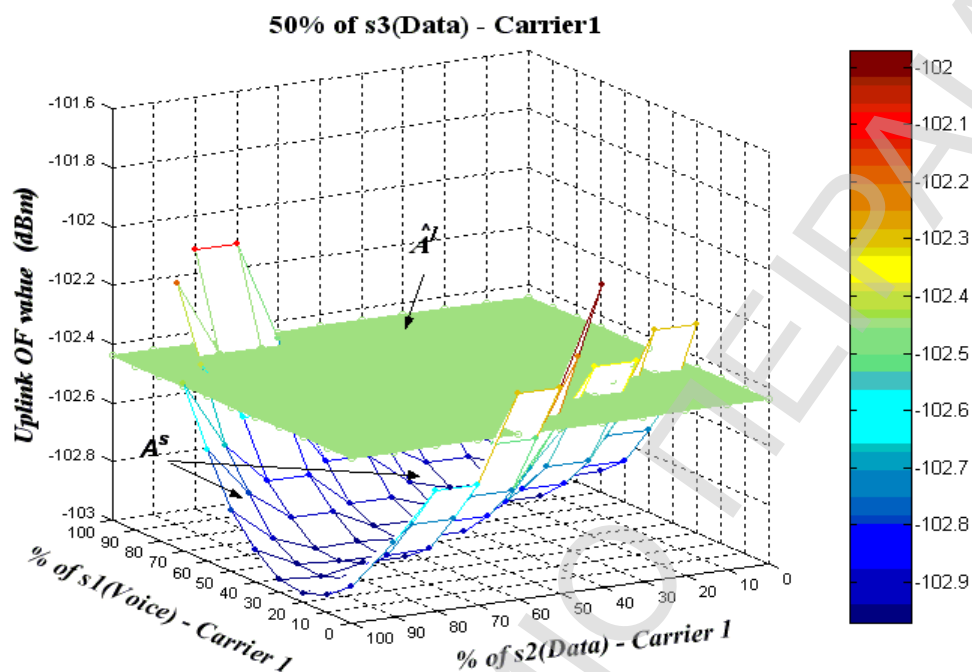
(α)



(β)



(γ)



Σχήμα 5-9: Σενάριο 2 (σύγκριση πολιτικών) στο uplink; (α) ομοιόμορφη κατανομή φορτίου στις ζώνες, (β) συγκέντρωση φορτίου στα ακραία pixels, (γ) τυχαία κατανομή φορτίου

Στην uplink ζεύξη, συμπεραίνουμε (Σχήμα 5-9 (α), (β), (γ)) ότι οι πολιτικές A^s αποδίδουν καλύτερα από τις πολιτικές A^l στις 2 από τις 3 περιπτώσεις χωρικής κατανομής του φορτίου. Αυτή η υπεροχή είναι ακόμα περισσότερο προφανής στην περίπτωση τυχαίας κατανομής φορτίου. Αυτό το συμπέρασμα φαίνεται ότι αντιτίθεται στην εφαρμογή του κριτηρίου ελαχιστοποίησης ισχύος για το downlink, όπου στην πληθώρα των περιπτώσεων υπερέχουν οι πολιτικές A^l . Επομένως, εναπόκειται στα στρατηγικά σχέδια του εκάστοτε παρόχου η παροχή προτεραιότητας στη μία ή την άλλη ζεύξη.

Σε γενικές γραμμές, η επίλυση του προβλήματος ανάθεσης της ζήτησης σε πολλαπλά CDMA φέροντα που έχουν επιλεγεί για λειτουργία σε περιβάλλοντα B3G, βελτιώνει σημαντικά την ικανότητα ενός reconfigurable (cognitive) δικτύου να ενεργεί προκαταρκτικά διαρθρώνοντας καταλλήλως τους πομποδέκτες του, αναλόγως της ζήτησης.

5.5 Ανάλυση Πολυπλοκότητας Μεθόδου

Η παρούσα παράγραφος αποσκοπεί στην αποτίμηση της πολυπλοκότητας της μεθόδου DAMC, ώστε να τεσταριστεί η υπολογιστική της δύναμη.

Αρχικά μελετάμε την περίπτωση πολιτικών βασισμένων στην υπηρεσία. Στο σενάριο 1 έχουμε ήδη υπολογίσει τον αριθμό συνδυασμών – πολιτικών που πρέπει να εξεταστούν στην περίπτωση διάθεσης 2 CDMA φερόντων και 3 υπηρεσιών, με ένα εύρος από 0% έως 100% για κάθε φέρον και 2 βήματα, 10% για τις s_1 , s_2 και 20% για την s_3 , αντίστοιχα. Με αυτή τη λογική, στη γενική περίπτωση που διατίθενται 2 CDMA φέροντα για λειτουργία, ο προς εξέταση αριθμός των πολιτικών είναι

$$\prod_{s \in S} \left(\frac{dl_s - ul_s}{ms_s} + 1 \right) \quad |F| = 2 \quad (5.5)$$

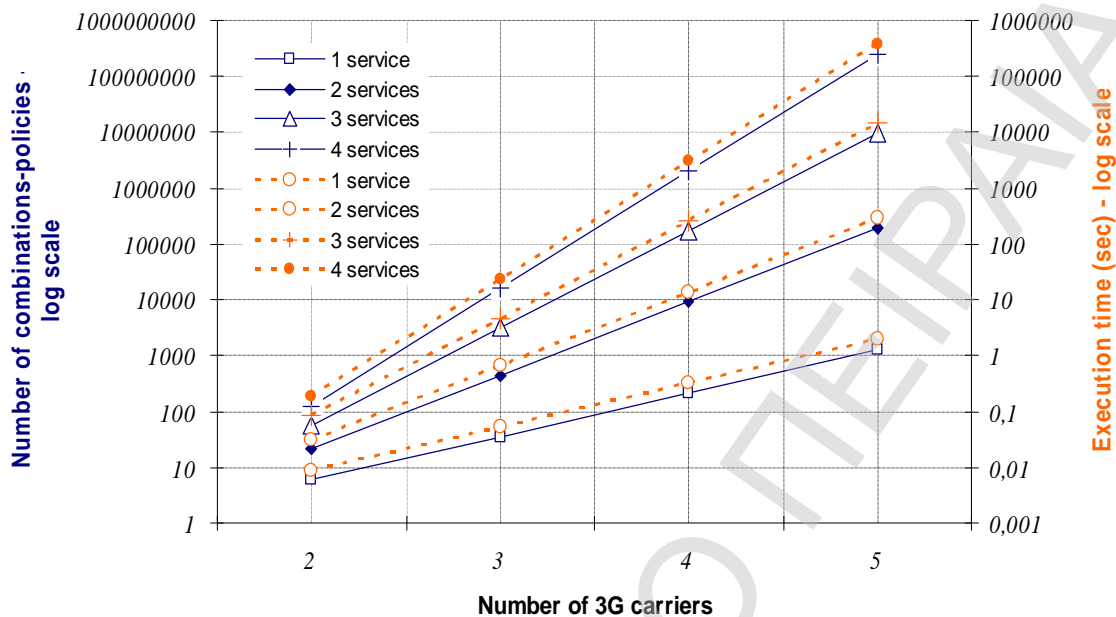
όπου dl_s , ul_s και ms_s είναι το κάτω όριο, το άνω όριο και το βήμα για κάθε υπηρεσία $s \in S$, αντίστοιχα.

Παρά το γεγονός ότι το ενδεχόμενο της ύπαρξης 2 CDMA φερόντων (άρα και πομποδεκτών) ανά γνωσιακό σταθμό βάσης είναι αρκετά πιθανό, σημαντικό είναι να εξεταστεί και η περίπτωση της διάθεσης περισσότερων CDMA φερόντων για λειτουργία. Σε αυτή την περίπτωση, ο αριθμός των προς εξέταση πολιτικών υπολογίζεται μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$\prod_{s \in S} \left[\sum_{\substack{ul_s \\ x_{v,s,|f|=dl_s, \\ x_{v,s,|f|=x_{v,s,|f|}+ms_s}}} \sum_{\substack{ul_s - x_{v,s,|f|} \\ x_{v,s,|f|-1=dl_s, \\ x_{v,s,|f|-1=x_{v,s,|f|-1}+ms_s}}} \Lambda \sum_{\substack{ul_s - \sum_{f=4}^{|F|} x_{v,s,f} \\ x_{v,s,3}=dl_s, \\ x_{v,s,3}=x_{v,s,3}+ms_s}} \left(\frac{ul_s - dl_s - \sum_{f=3}^{|F|} x_{v,s,f}}{ms_s} + 1 \right) \right] \quad |F| \geq 3 \quad (5.6)$$

όπου ενθυμούμαστε ότι $x_{v,s,f}$ είναι το ποσοστό της ζήτησης για την υπηρεσία s , στο σταθμό βάσης v , που ανατίθεται στο φέρον f . Ο δείκτης v στη σχέση (5.6) δε μεταβάλλεται, εφόσον εξυποθέσεως εφαρμόζεται η ίδια πολιτική για όλους τους πομποδέκτες που ανήκουν στο υπό εξέταση τμήμα δικτύου.

Θεωρώντας τη ζήτηση που αναγράφεται στο Σχήμα 5-4 (γ), ενδεικτικές μετρήσεις της πολυπλοκότητας της μεθόδου DAMC παρατίθενται στο Σχήμα 5-10.



Σχήμα 5-10: Ενδεικτικές μετρήσεις πολυπλοκότητας

Συγκεκριμένα, παρατηρούμε την αύξηση στον αριθμό των επαγόμενων πολιτικών κατανομής σε συνάρτηση του αριθμού των CDMA φερόντων και του αριθμού των παρεχομένων υπηρεσιών. Στο ίδιο σχήμα παρατηρούμε και τον απαιτούμενο χρόνο εκτέλεσης θεωρώντας υπολογιστή Pentium M, 1.6GHz, 512MB. Προφανώς υπάρχουν περιπτώσεις που χρήζουν υπολογισμών εξαιρετικά περισσότερο πολύπλοκων, αλλά είναι σχεδόν άχρηστη η εξέτασή τους.

Με αυτό το σκεπτικό, θεωρούμε ότι με κατάλληλο χειρισμό μπορούμε να πετύχουμε μείωση του αριθμού των πολιτικών και άρα και των υπολογιστικών αναγκών της μεθόδου. Για παράδειγμα, θεωρούμε ότι κάθε πολιτική εφαρμόζεται εξίσου σε όλους τους σταθμούς βάσης (και πομποδέκτες) ενός τμήματος δικτύου. Από την άλλη πλευρά, αποκλείουμε από το χώρο των λύσεων τις πολιτικές που δεν οδηγούν σε εφικτή λύση ως προς την ανάθεση ισχύος. Έτσι, κατορθώνουμε τελικά να μειώνουμε τον αριθμό των προς εξέταση πολιτικών για κάθε σταθμό βάσης, ο οποίος, υποθέτοντας ότι θα ενσωματώσει ικανότητες μάθησης, θα αναλάβει την ευθύνη να αποκλείει κατά περίπτωση κάποιες πολιτικές, όπως και να επιλέγει με τρόπο έξυπνο τα άνω και κάτω όρια των ποσοστών και το βήμα μετάβασης.

Φαίνεται μάλιστα ότι μια τέτοια μείωση είναι εξαιρετικά σημαντική, αφού στο σενάριο 1, ο αρχικός αριθμός των υπό εξέταση πολιτικών ήταν 1331 και καταλλήλως μειώθηκε στο 605, που αποτελεί εξαιρετικά μεγάλο ποσοστό μείωσης (περίπου $\approx 54\%$!).

Παρόμοια ανάλυση θα ακολουθούσαμε και στην περίπτωση των πολιτικών που βασίζονται στην τοποθέτηση, την οποία εδώ παραλείπουμε για λόγους συντομίας.

5.6 Επέκταση: Θεώρηση Κριτηρίου Εξισορρόπησης του Φορτίου (load balancing) Μεταξύ των Φερόντων

5.6.1 Γενικά Στοιχεία

Η εξισορρόπηση της ισχύος έχει να κάνει με τη διατήρηση των τιμών των παραγόντων φόρτωσης στο uplink (uplink loading factors) κάθε φέροντος στα ίδια (περίπου) επίπεδα. Αυτή η επιλογή φαντάζει λογική σε ρεαλιστικές καταστάσεις που αντιμετωπίζουν συνήθως οι ΝΟs. Συγκεκριμένα, η διαδικασία βελτιστοποίησης αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης που σχετίζεται με τις διαφορές μεταξύ των τιμών των uplink loading factors για κάθε διαθέσιμο φέρον σε ένα στοιχείο δικτύου. Ο παραπάνω στόχος μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ακολούθως:

Ελαχιστοποίησε την:

$$OF(A) = \frac{1}{|V|} \cdot \sum_{f \in F_v} \sum_{f' \in \{F_v - f\}} (lf_{v,f}^{up} - lf_{v,f'}^{up})^2 \quad \forall v \in V \quad (5.7)$$

Με βάση την κατανομή της ζήτησης που προτείνεται από την πολιτική A (είτε A^s είτε A^l) βάσει των:

$$lf_{v,f}^{up} = (1 + j) \cdot \sum_{p \in P_v} \sum_{s \in S} d_{s,p,f} \cdot \left[1 + \frac{W}{(E_b/I_o)_s \cdot r_s \cdot a_s} \right]^{-1}$$

$$\forall (v, f) \in (V \times F_v) \quad (5.8)$$

$$d_{s,p,f} = \lfloor x_{v,s,f} \cdot d_{s,p} \rfloor \quad \forall (s \in S), (p \in P_v) \quad (5.9a)$$

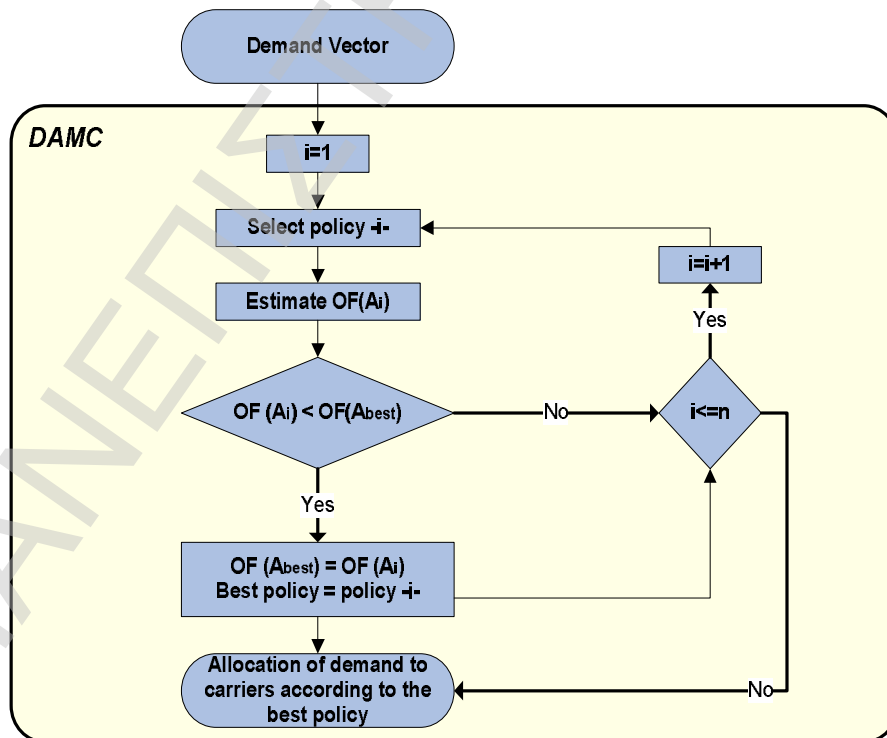
στην περίπτωση πολιτικών A^s , και

$$d_{s,p,f} = \lfloor x_{v,p,f} \cdot d_{s,p} \rfloor \quad \forall (s \in S), (p \in P_v) \quad (5.9\beta)$$

στην περίπτωση πολιτικών A^l .

$$lf_{v,f}^{up} \leq lf_{v,f}^{up,max} \quad \forall (v, f) \in (V \times F_v) \quad (5.10)$$

Η σχέση (5.7) μοντελοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση που σχετίζεται με την εξισορρόπηση των uplink loading factors των στοιχείων δικτύου και φερόντων. Η σχέση (5.8) υπολογίζει την τιμή του uplink loading factor ανά φέρον σε κάθε στοιχείο δικτύου. Εδώ η επίδραση του φορτίου των γειτονικών στοιχείων δικτύου λαμβάνεται υπόψη μέσω του j , το οποίο δηλώνει τον παράγοντα των παρεμβολών που προκαλούνται από γειτονικά στοιχεία ή "other to own cell interference ratio" (βλέπε επίσης [14]) και αποτίθεται ότι αλλάζει δεδομένων των καταστάσεων παρεμβολών. Η ποσότητα $d_{s,p}$ στις (5.9α) και (5.9β) εκφράζει τη ζήτηση ανά υπηρεσία και ρικελ που θα ανατεθεί στα διαθέσιμα φέροντα, ενώ η ποσότητα $d_{s,p,f}$ εκφράζει τη ζήτηση της υπηρεσίας s και του ρικελ p που προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της ποσότητας $d_{s,p}$ με το ποσοστό που υποδεικνύει κάθε πολιτική κατανομής A_i . Τέλος, οι εξισώσεις (5.10) εξασφαλίζουν ότι οι μέγιστε προκαθορισμένες τιμές των uplink loading factors ανά φέρον σε κάθε στοιχείο δικτύου θα παραμένουν πάντα κάτω της μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής.



Σχήμα 5-11: Διάγραμμα ροής μεθόδου

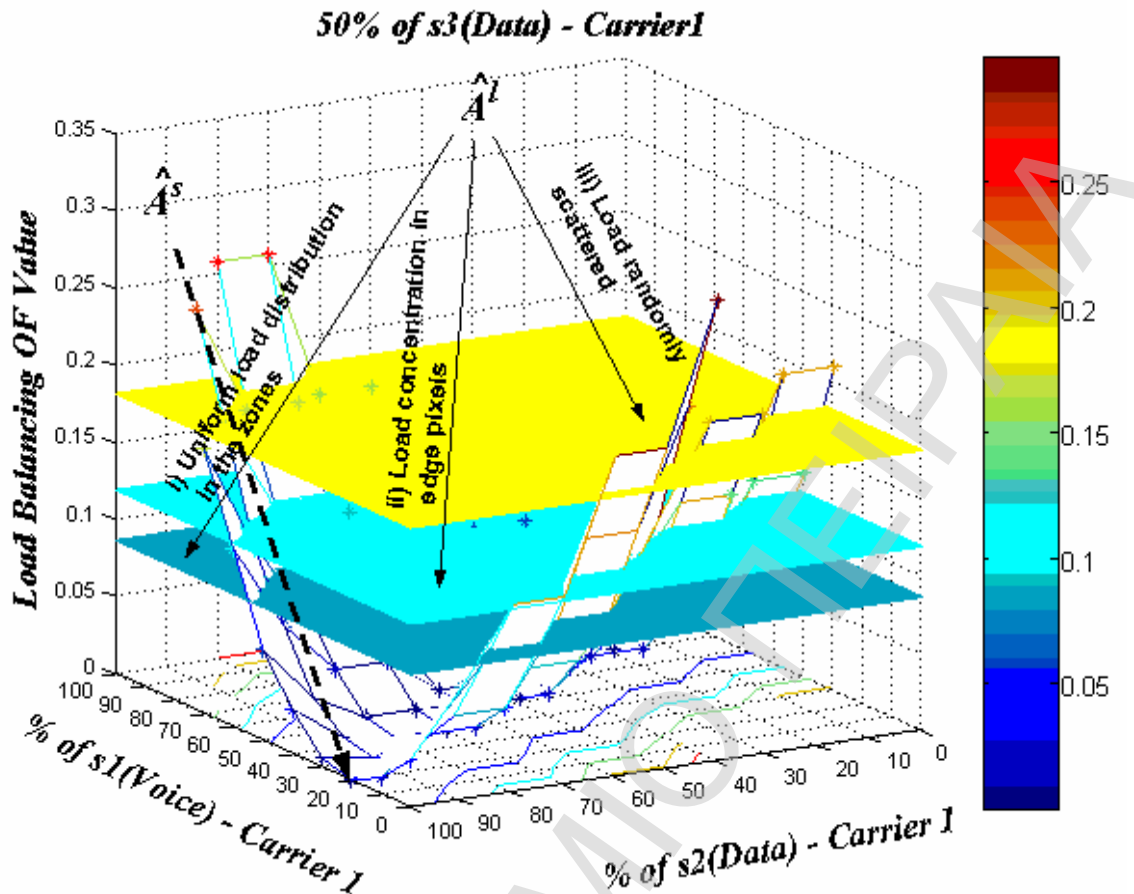
Η μέθοδος που αποφασίζει για την κατανομή που εγγυάται το βέλτιστο αποτέλεσμα λαμβάνει χώρα με ευριστικό τρόπο σύμφωνα με το διάγραμμα ροής που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-11

Συγκεκριμένα, δεδομένου του φορτίου, η μέθοδος θεωρεί την πρώτη πολιτική κατανομής και υπολογίζει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Το αυτό ισχύει για κάθε δυνατή πολιτική και τελικά επιλέγεται η πολιτική που βελτιστοποιεί την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Το τελευταίο βήμα είναι η κατανομή της ζήτησης στα φέροντα.

5.6.2 Σύγκριση μεταξύ A^s και A^l

Η παράγραφος αυτή περιγράφει ένα σενάριο (όπως και στην περίπτωση του κριτηρίου ελαχιστοποίησης της συνολικής ισχύος) όπου η μέθοδος εφαρμόζεται στις 3 διαφορετικές καταστάσεις φορτίου (όπως και στην 5.4.4), προκειμένου να συγκριθούν οι πολιτικές A^s και A^l υπό την εφαρμογή του κριτηρίου "load balancing" που περιγράφει η σχέση (5.7). Η ζήτηση στο υπό εξέταση στοιχείο δικτύου συνίσταται σε 45 συνδέσεις της υπηρεσίας s_1 , 6 συνδέσεις της υπηρεσίας s_2 και 2 της s_3 . Οι υπόλοιπες παράμετροι αφήνονται ως είχαν και στα προηγούμενα.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής: για κάθε τύπο φορτίου απομονώνουμε τη βέλτιστη πολιτική \hat{A}^l και τη συγκρίνουμε με το σύνολο των πολιτικών A^s . Τα αποτελέσματα της σύγκρισης (για τους 3 τύπους φορτίου) απεικονίζονται συνοπτικά στο Σχήμα 5-12, όπου η βέλτιστη τιμή της $OF(\hat{A}^l)$ απεικονίζεται μέσω ενός επιπέδου παράλληλου στο επίπεδο X-Y, που τέμνει τον άξονα-Z στο σημείο $OF(\hat{A}^l)$.



Σχήμα 5-12: Σύγκριση πολιτικών στην περίπτωση εφαρμογής κριτηρίου load balancing

Σε γενικές γραμμές πάντως, συμπεραίνει κανείς ότι η βέλτιστη πολιτική θα πρέπει να αναζητηθεί ανάμεσα στις πολιτικές A^s , πράγμα το οποίο έρχεται σε αντίθεση με τα μέχρι τώρα αποτελέσματα κατά την εφαρμογή του κριτηρίου ελαχιστοποίησης της ισχύος. Το παραπάνω αφήνει μεν περιθώρια για συνέχιση της εργασίας στο θέμα, αλλά παράλληλα καταδεικνύει και τη σημαντικότητα της διαχείρισης όταν αυτή βασίζεται σε πολιτικές (policy-based management), αφού τα κριτήρια εφαρμογής των πολιτικών καθορίζουν και τα αποτελέσματα της εφαρμογής τους.

5.7 Συμπεράσματα - Κατευθύνσεις

Η ακατάπαυστη δίψα για συνεχή συνδεσιμότητα σε πολύ υψηλή ποιότητα έχει δώσει το έναυσμα για τη μελέτη μεθόδων σαν αυτή που παρουσιάστηκε στο παρόν κεφάλαιο. Τα reconfigurable και cognitive δίκτυα επικοινωνιών, με τις ολοένα και περισσότερο καινοτόμες

υπηρεσίες που παρέχουν και με τη δυνατότητα περισσότερο ευέλικτης χρήσης του διαθέσιμου φάσματος, καθιστούν απαραίτητη την ενασχόληση με τεχνικές δυναμικής ανάθεσης φάσματος σε μια πληθώρα περιπτώσεων. Μία από αυτές είναι και η περίπτωση όπου σε ένα τμήμα δικτύου έχει επιλεγεί ως σύστημα για λειτουργία μια τεχνολογία CDMA, η οποία λειτουργεί σε πολλαπλά φέροντα και τα οποία χρήζουν κατάλληλης κατανομής της ζήτησης σε αυτά. Η ζητούμενη κατάλληλη μέθοδος κατανομής μπορεί να ευρεθεί εάν σχεδιαστούν οι κατάλληλοι αλγόριθμοι διαχείρισης, που θα λαμβάνουν υπόψη διάφορα χαρακτηριστικά των γνωσιακών δικτύων, θα εκτιμούν τα πιθανά αποτελέσματα κάθε πιθανής διάρθρωσης του δικτύου και θα παίρνουν την καλύτερη δυνατή (κατά περίπτωση) απόφαση.

Συνοψίζοντας, στο παρόν κεφάλαιο ασχοληθήκαμε με την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης βασισμένο σε πολιτικές λήψης αποφάσεων. Η λύση του προβλήματος συνίσταται στην εύρεση της καλύτερης δυνατής κατανομής της ζήτησης σε μια περιοχή εξυπηρέτησης, στα διαθέσιμα CDMA φέροντα (DAMC), η οποία και φαίνεται ότι αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της συνολικής διαδικασίας αναδιάρθρωσης σε ένα τμήμα δικτύου. Το πρόβλημα DAMC μοντελοποιήθηκε μαθηματικά και επιλύθηκε καταλλήλως, λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένα κριτήρια βελτιστοποίησης. Η επίλυσή του είχε να κάνει με την επιλογή της καταλληλότερης πολιτικής ανάθεσης της ζήτησης στα διαθέσιμα φέροντα. Τέλος, η αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων μεθόδων επικυρώθηκε και μέσω προσομοιώσεων.

Στα πλαίσια της συνέχισης του παρόντος έργου, αρχικά προτείνεται να ενσωματωθούν τεχνικές εκμάθησης (όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.5) με στόχο τη βέλτιστη επιλογή των καταλληλότερων πολιτικών κατανομής της ζήτησης, ώστε να καταστεί δυνατή η αμεσότερη και αποτελεσματικότερη προσαρμογή ενός δικτύου με γνωσιακό χαρακτήρα σε εξωτερικά ερεθίσματα.

5.8 Βιβλιογραφία

- [1] K. Tsagkaris, G. Dimitrakopoulos, P. Demestichas, "Policies for the Reconfiguration of Cognitive Wireless Infrastructures to 3G Radio Access Technologies", submitted for publication in ACM/Springer Wireless Networks journal
- [2] K. Tsagkaris, G. Dimitrakopoulos, P. Demestichas, "Spectrum Management Strategies for efficient UMTS Integration in Wireless B3G Infrastructures", in Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC'06), Istanbul, Turkey, June 2006.
- [3] K. Ahmavaara, H. Haverinen, R. Pichna, "Interworking architecture between 3GPP and WLAN systems", IEEE Commun. Mag., Vol. 41, No. 11, Nov. 2003, pp.74-81.
- [4] Q. Song and A. Jamalipour, "Network Selection in an integrated wireless LAN and UMTS environment using mathematical modeling and computer techniques", IEEE Wireless Commun. Mag, Vol. 12, No. 6, June 2005, pp.42-48.
- [5] P. Demestichas, G. Dimitrakopoulos, D. Bourse, K. El Khazen, « Dynamic Planning and Management of Reconfigurable Systems, IEEE DySPAN 2005, First Symposium on Dynamic Access Networks, Baltimore USA, 8-11 November 2005.
- [6] I.Katzela, M.Naghshineh, "Channel assignment schemes for cellular mobile telecommunications systems: A comprehensive study", IEEE Personal Commun., Vol. 3, No. 3, June 1996, pp.10-31.
- [7] N.Bambos, "Toward power-sensitive network architectures in wireless communications: Concepts, issues, and design aspects", IEEE Personal Commun., Vol. 5, No. 3, June 1998.
- [8] Paul Leaves, David Grandblaise, Ralf Tönjes, Klaus Moessner, Michele Breveglieri, Didier Bourse, Rahim Tafazolli, "Dynamic Spectrum Allocation in Composite Reconfigurable Wireless Networks", IEEE Commun. Mag., Vol. 42, No. 5, May 2004.
- [9] P. Demestichas, N. Koutsouris, G. Koundourakis, K. Tsagkaris, A. Oikonomou, V. Stavroulaki, L. Papadopoulou, M. Theologou, G. Vivier, K.El-Khazen, "Management of networks and services in a composite radio context", IEEE Wireless Commun. Mag., Vol. 10, No. 4, Aug. 2003, pp. 44-51.
- [10] J. Mitola et al., "Cognitive radio: Making software radios more personal," IEEE Pers. Commun., vol. 6, no. 4, pp. 13–18, Aug. 1999.
- [11] K. Tsagkaris, G. Dimitrakopoulos, P. Demestichas, A. Saatsakis, "Distributed Radio Access Technology Selection for Adaptive Networks in High-Speed, B3G Infrastructures", International Journal of Communication Systems, October 2007

- [12] K.Tsagkaris, P.Demestichas, M.Theologou, "Location-and-Service Aware Downlink Transmission Power Allocation in WCDMA-Based Cellular Networks", Wireless Personal Communications, Kluwer Academic Publishers, Volume 30, Issue 2-4, pp. 167-181, September 2004.
- [13] P.Demestichas, K.Tsagkaris, E.Tzifa, M.Theologou, "Uplink transmission power allocation in CDMA-based cellular networks", IEE Electronic Letters Journal, Vol. 39, No. 1, pp. 147 – 148, 2003.
- [14] H. Holma, A.Toskala, "WCDMA for UMTS: Radio Access for Third Generation Mobile Communications" John Wiley & Sons, England, 2002.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ

6. ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ OFDMA

Περίληψη:

Το παρόν κεφάλαιο εξετάζει την περίπτωση που σε τμήμα ενός Β3G δικτύου έχουν επιλεγεί προς λειτουργία τεχνολογίες OFDMA και παρουσιάζει τρόπους βελτιστοποίησης της λειτουργίας τους, δίνοντας έμφαση στο χρησιμοποιούμενο φάσμα και στο πώς αυτό μπορεί να καταστεί εμπορικά εκμεταλλεύσιμο. Τμήμα του κεφαλαίου έχει δημοσιευτεί στο [1].

6.1 Εισαγωγική Μελέτη

Όπως κάθε χρήσιμο αγαθό αποτελεί προϊόν εμπορικής εκμετάλλευσης από διάφορες πηγές, σε διάφορες εκφάνσεις της ανθρώπινης δραστηριότητας, έτσι και το φάσμα, το πλέον πολύτιμο αγαθό στις τηλεπικοινωνίες, συνιστά απαραίτητο εργαλείο στα χέρια όσων παραδοσιακά το κατέχουν (διεθνείς και τοπικές κρατικές αρχές), οι οποίοι και το εκμεταλλεύονται καταλλήλως. Η εκμετάλλευση αυτή απορρέει από την ολοένα αυξανόμενη ζήτηση για φάσμα σε μια πληθώρα πεδίων στις τηλεπικοινωνίες. Μια τέτοια ζήτηση, καθώς και οι εφαρμογές τις οποίες αυτή συνεπάγεται, έχει μεν ευεργετικές επιδράσεις στη ζωή των χρηστών και στη γενικότερη αλματώδη πρόοδο της τεχνολογίας, αλλά παράλληλα εγείρει τη σκέψη της ωφέλειας που θα μπορούσε να γεννηθεί από την κατοχή του φάσματος. Ο σκοπός λοιπόν της εκμετάλλευσης του εν λόγω αγαθού, μέσω αποδοτικών μεθόδων – τεχνικών διαχείρισής του, είναι διττός. Από τη μία πλευρά να καταναίμει στις κατάλληλες οντότητες (stakeholders) το φάσμα με τρόπο δίκαιο, ώστε να καταστεί δυνατή η χρήση του, με απώτερο στόχο την εξυπηρέτηση των αναγκών των χρηστών. Από την άλλη πλευρά, να ενισχύσει φυσικά τις πηγές εσόδων των κατόχων.

Ορμώμενο από τις παραπάνω σκέψεις και με στόχο τη βελτίωση των τρόπων με τους οποίους αυτές υλοποιούνται, το παρόν κεφάλαιο αποσκοπεί στο να καταστήσει σαφή τα θέματα που ανακύπτουν κατά την εμπορική εκμετάλλευση του φάσματος από τους κατόχους του, όσον αφορά τη δίκαιη και αποτελεσματική κατανομή του στους πελάτες τους (NOs). Επιπλέον, να μελετήσει πιθανούς τρόπους αύξησης της απόδοσης του χρησιμοποιούμενου φάσματος από τους NOs και να εξετάσει πώς (με ποιές μεθόδους) δύναται να βελτιωθεί η υφιστάμενη κατάσταση αναφορικά με τους τρόπους χρήσης του διαθέσιμου φάσματος, ώστε να εξαλειφθούν τυχόν μειονεκτήματα που υπάρχουν σήμερα.

Για το σκοπό αυτό, αρχικά παρουσιάζονται κάποια στατιστικά στοιχεία που στόχο έχουν να καταδείξουν τη σχετική αδυναμία αποδοτικής χρήσης του φάσματος με βάση τους σημερινούς τρόπους, και παράλληλα να εισάγουν τις προκλήσεις που αναδεικνύονται εξ'αυτής, σχετικά με την εξεύρεση καινοτόμων τεχνικών αποδοτικής διαχείρισής του. Εν συνεχεία, παρουσιάζεται ο γενικός σκελετός μιας τεχνικής που εφαρμόζεται ως επί το πλείστον σε τεχνολογίες OFDMA και ονομάζεται δεξαμενή φάσματος (spectrum pooling) για την επίλυση προβλημάτων υποχρησιμοποίησης του φάσματος. Η πρόταση για υιοθέτηση της τεχνικής αυτής από τους παρόχους αναλύεται ακολουθώντας διεξοδικά, με παράλληλη μελέτη τυχόν επιπτώσεών της στα οικονομικά μεγέθη των παρόχων. Το μοντέλο που παρουσιάζεται

για την αξιολόγηση της τεχνικής βασίζεται σε στοιχεία θεωρίας παιγνίων και για την αποτίμηση της επίδοσής του παρουσιάζονται αποτελέσματα από προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν και εξέτασαν τη δυνατότητα επιτυχούς εφαρμογής της. Τέλος, εξάγονται τα σχετικά συμπεράσματα και οι δυνατές επεκτάσεις της εν λόγω μεθόδου, στο μέλλον.

Τα παραπάνω έρχονται να ολοκληρώσουν τη μελέτη των μηχανισμών διαχείρισης πόρων (και φάσματος) σε reconfigurable (και cognitive) δίκτυα, αν θυμηθούμε ότι στα πλαίσια της διατριβής μελετήθηκαν τεχνικές που αφορούν συνολικά τις τεχνολογίες B3G (inter-RAT management), στη συνέχεια δόθηκε έμφαση σε μια τεχνική μελέτη πάνω σε τεχνολογίες CDMA (intra-RAT management), ενώ τέλος το παρόν κεφάλαιο εστίασε στη διαχείριση πόρων (κυρίως φάσματος) σε τεχνολογίες OFDMA, από μια σκοπιά ωστόσο όχι τόσο τεχνική (καθόσον κάτι τέτοιο αποτελεί διεθνώς αντικείμενο μελέτης), αλλά περισσότερο οικονομική.

6.2 Η Εκμετάλλευση του Φάσματος – Μειονεκτήματα και Προκλήσεις

Οι διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών σε φάσμα καθιστούν την εκμετάλλευσή του δελεαστική για τους, συνήθως κρατικής υφής, κατόχους του. Διεθνώς η χρήση του φάσματος καθορίζεται, ως έχει αναφερθεί, από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union - ITU) [2], η οποία προσδιορίζει τα γενικά πλαίσια ζωνών φάσματος που δύνανται να χρησιμοποιούνται από τα διάφορα RATs, τα οποία πλαίσια είναι στατικά στο χωροχρόνο (δεν προβλέπονται δυναμικές μεταβολές). Από εκεί και πέρα, τοπικές αρχές (σε εθνικό επίπεδο) αναλαμβάνουν τη διαχείριση του φάσματος. Στην Ελλάδα ο κρατικός φορέας που κατέχει το φάσμα και μπορεί να το διαχειρίζεται, πουλώντας το σε παρόχους, είναι η Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων (ΕΕΤΤ) [3]. Η ΕΕΤΤ διαιρεί το συνολικό φάσμα σε ζώνες, τις οποίες και παραχωρεί έναντι συγκεκριμένου αντιτίμου και για μεγάλα χρονικά διαστήματα (της τάξεως των 20 ετών) σε NOs και γενικά σε ιδιωτικούς και κρατικούς φορείς που το χρησιμοποιούν για την παροχή ποικίλων υπηρεσιών. Η εκάστοτε επιλογή των φορέων πραγματοποιείται με ακολουθία διαδικασιών, συνήθως δημοπρασιών. Αυτή η επιλογή των φορέων προς παραχώρηση φάσματος δεν αποκλείει το ενδεχόμενο να αποκτήσει ένας NO φάσμα / άδεια χρήσης περισσότερων του ενός RAT.

Ο Οργανισμός Τηλεπικοινωνιών Ελλάδος (ΟΤΕ), επί παραδείγματι, έχει αποκτήσει άδειες χρήσης φάσματος για την παροχή υπηρεσιών μέσω πολλών τεχνολογιών, όπως για κινητές επικοινωνίες δεύτερης γενιάς (GSM), Ψηφιακό Κυψελωτό Σύστημα (Digital Cellular System - DCS), κινητές επικοινωνίες τρίτης γενιάς (UMTS), Σταθερή Ασύρματη Πρόσβαση (Fixed Wireless Access - FWA), καθώς και δορυφορικών επικοινωνιών, τόσο σταθερών όσο και κινητών. Η ανωτέρω αδειοδότηση απεικονίζεται και στο Σχήμα 6-1.

RAT	Φάσμα Ζεύξης Ανόδου (MHz)	Φάσμα Ζεύξης Καθόδου (MHz)
<i>GSM</i>	885-890	930-935
<i>DCS</i>	1760-1785	1855-1880
<i>UMTS FDD</i>	1950,3-1965,3	2140,3-2155,3
<i>UMTS TDD</i>	1905,1-1910,1	
<i>FWA</i>	3441,5-3455,5	3541,5-3555,5 24969-25025 25977-26033
<i>Δορυφορικές Επικοινωνίες</i>	Μεγάλος αριθμός φερόντων, αναλόγως εφαρμογής	

Σχήμα 6-1: Τυπική Περίπτωση Διαθέσιμου Φάσματος από εν Ελλάδι NO

Σε πολλές περιπτώσεις οι NOs αδυνατούν να καλύψουν τις ανάγκες τους σε φάσμα, κατάσταση η οποία διαπιστώνεται σε ποικίλες καταστάσεις μεγάλου φορτίου, όπως για παράδειγμα κατά τη διάρκεια αθλητικών γεγονότων. Δεδομένης μάλιστα της ανυπαρξίας της δυνατότητας να ενοικιαστεί φάσμα από τρίτες πηγές, ο εν λόγω προβληματικός NO διαθέτει συνήθως μόνο τις επιλογές της υποβάθμισης των επιπέδων ποιότητας υπηρεσίας (QoS levels), που παρέχει στους χρήστες και της απόρριψης τμήματος της ζήτησης. Η πρώτη επιλογή οδηγεί σε μη αποδεκτές από τους χρήστες ταχύτητες σύνδεσης και η δεύτερη οδηγεί σε απευθείας απώλεια εσόδων.

Από την άλλη πλευρά, τμήμα του διατιθέμενου φάσματος παραμένει κατά κανόνα αχρησιμοποίητο, καθόσον δεν είναι απαραίτητο σε όλη την επικράτεια ενός παρόχου και ανά πάσα χρονική στιγμή. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τη μη ύπαρξη δυνατότητας προσωρινής ενοικίασης του αχρησιμοποίητου φάσματος από πηγές που το χρειάζονται και θα μπορούσαν να συμβάλουν στη συνολική αύξηση της αποδοτικότητας της χρήσης του, εγείρει ένα πρόβλημα σχετικά με το βαθμό χρησιμοποίησης του διαθέσιμου φάσματος και τη

δυνατότητα εκμετάλλευσης της κατάστασης αυτής. Επιστρέφοντας στο παράδειγμά μας, το φάσμα που έχει ανατεθεί στον ΟΤΕ και προορίζεται για FWA παραμένει μέχρι τούδε αχρησιμοποίητο, ενώ και στο UMTS, μόνο μία φέρουσα συχνότητα χρησιμοποιείται από τις αγορασθείσες. Παράλληλα, φάσμα που προορίζεται για δορυφορικές επικοινωνίες διαθέτει κατά κανόνα υφή χωρική, αλλά χρησιμοποιείται σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

Κοινή πεποίθηση, εν γένει, αποτελεί η ανάγκη διενέργειας προσπάθειών για την εκμετάλλευση του μη χρησιμοποιούμενου φάσματος. Για παράδειγμα, ΝΟs που χρειάζονται φάσμα για τη λειτουργία συγκεκριμένου RAT (χωρικά ή χρονικά) δύνανται να δανειστούν φάσμα του ίδιου ή και άλλου RAT, από κάποιο ΝΟ που δεν το χρησιμοποιεί επί του παρόντος. Γενικά οι ΝΟs πολύ συχνά γίνονται αποδέκτες αιτημάτων για δανειοδότηση σε φάσμα, με «δράστες» συνήθως μικρομεσαίες επιχειρήσεις (ΜΜΕ), που αποβλέπουν στην παροχή συγκεκριμένων υπηρεσιών. Έτσι, το μη χρησιμοποιούμενο FWA φάσμα του ΟΤΕ θα μπορούσε να οριστεί ως μια επιπλέον UMTS φέρουσα για άλλους παρόχους που τη χρειάζονται, ενώ μη χρησιμοποιούμενες UMTS φέρουσες, αλλά και το φάσμα δορυφορικών επικοινωνιών, θα μπορούσε να γίνει προϊόν εκμετάλλευσης με παρόμοιο τρόπο.

Και σε διεθνή κλίμακα, η έρευνα (όπως έχει άλλωστε προαναφερθεί) πάνω σε έξυπνες μεθόδους ευέλικτης διαχείρισης του φάσματος εντείνεται συνεχώς [5][6]. Παράλληλα, έχουν οριστεί επισήμως και διάφορα σενάρια χρήσης του φάσματος [7], τα οποία προσπαθούν να κατηγοριοποιήσουν τις τάσεις χρήσης του φάσματος, ώστε να κατευθύνουν αντίστοιχα τις σχετικές ερευνητικές προσπάθειες. Στο παρόν κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με την περίπτωση πραγματοποίησης συμφωνιών προσωρινής αγοραπωλησίας φάσματος μεταξύ ΝΟs, ή μεταξύ ΝΟs και τρίτων, οι οποίοι συνιστούν τις λεγόμενες «δευτερεύουσες αγορές» (secondary markets) [8].

Προς τούτο, η επόμενη παράγραφος περιγράφει μια τεχνική που αναμένεται να χρησιμοποιηθεί κατά κόρον για την έξυπνη διαχείριση του φάσματος, κυρίως σε OFDMA συστήματα. Αναλύεται η λειτουργία της τεχνικής αυτής και αξιολογείται η αποτελεσματικότητά της με οικονομικά κριτήρια.

6.3 Η τεχνική «δεξαμενής φάσματος» (Spectrum Pooling – SP)

Η παράγραφος αυτή αναλύει την τεχνική δεξαμενής φάσματος και προτείνει μια μέθοδο για την οικονομική της αξιολόγηση, ενώ παράλληλα παρατίθενται ορισμένα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου αξιολόγησης.

6.3.1 Επισκόπηση τεχνικής

Η τεχνική του «Spectrum pooling» είχε προταθεί αρχικά για την αύξηση της δυνατότητας πρόσβασης σε μη αδειοδοτημένες (ή και μη επιτρεπόμενες) ζώνες φάσματος και ως επί το πλείστον εφαρμογή έχει στην περίπτωση OFDMA τεχνολογιών, οι οποίες λειτουργούν συχνά σε μη αδειοδοτημένες περιοχές του φάσματος. Για αυτό το λόγο και είναι σχετική και με τα προαναφερθέντα σενάρια χρήσης του φάσματος [9]. Η εν λόγω τεχνική θεωρεί ότι ένας NO δύναται να τοποθετήσει σε μια δεξαμενή, τις (προσωρινά) μη χρησιμοποιούμενες ζώνες φάσματος. Από τη δεξαμενή αυτή θα μπορούν να ενοικιάσουν φάσμα άλλοι NOs ή και τρίτοι παράγοντες που το χρειάζονται. Επιπροσθέτως, ένας αριθμός NOs δύναται ακόμα και να συνενώσει τις υποχρησιμοποιούμενες αυτές περιοχές σε μια κοινή, μεγαλύτερη δεξαμενή. Προφανώς, αυτή η έννοια είναι ικανή όχι μόνο να βελτιώσει την αποδοτικότητα της χρήσης του φάσματος, αλλά και να προσφέρει νέες πηγές κερδών για τους NOs.

Ενώ η τεχνική δεξαμενής φάσματος μελετάται από τεχνική σκοπιά στο [9], θεωρείται επιβεβλημένο να εκτιμηθεί και η απόδοσή της όσον αφορά το οικονομικό κομμάτι, δηλαδή αναφορικά με τα επιπλέον κέρδη που μπορεί να φέρει στους NOs. Ακριβώς σε αυτό το σημείο έρχεται να συνεισφέρει το παρόν κεφάλαιο. Προς τούτο προτείνει ένα μοντέλο για την οικονομική αποτίμηση της τεχνικής Spectrum Pooling. Το μοντέλο αυτό εκμεταλλεύεται στοιχεία της θεωρίας παιγνίων [10]. Συγκεκριμένα, επεκτείνει κατάλληλα το μοντέλο που παρουσιάζεται στις εργασίες [11] και [12] και το εφαρμόζει καταλλήλως στην περίπτωση της δεξαμενής φάσματος. Τέλος, ενδεικτικά αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου έρχονται να πείσουν για τη χρηστικότητά του.

6.3.2 Περιγραφή Μοντέλου Οικονομικής Αξιολόγησης

Εστιάζουμε σε μια τυχούσα περιοχή του φάσματος. Το φάσμα παρέχεται μέσω άδειας σε ένα σύνολο από NOs, N . Ένας τυχόν κάτοχος άδειας, έστω NO- i , ($i \in N$), μπορεί να διαθέσει c_i φέροντα προς ενοικίαση, επειδή τυγχάνει να μην τα χρησιμοποιεί. Τα φέροντα αυτά υποθέτουμε (που είναι και η γενική περίπτωση) ότι αποτελούν τμήμα ενός OFDMA συστήματος (βλέπε [9]). Έτσι, μπορούν να διαιρεθούν σε έναν αριθμό από υποφέροντα

(subcarriers), με σκοπό την αντιστοίχησή τους με ένα συνολικό ρυθμό μετάδοσης και άρα επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας.

Θεωρούμε δεδομένο ότι η συνολική ζήτηση για φέροντα, d , είναι τέτοια ώστε $d \leq \sum_{i \in N} c_i$

(λογικό εφόσον συζητούμε περισσότερο για δευτερεύουσες αγορές).

Ο NO- i , ($i \in N$), πρέπει να επιλέξει καταλλήλως την τιμή που θα απαιτήσει για αυτή τη δοσοληψία, προκειμένου να εξυπηρετήσει τη ζήτηση. Η τιμή αυτή έστω ότι θα είναι η p_i .

Σύμφωνα με τις εργασίες [11][12][13], η οποιαδήποτε επιλεγείσα τιμή οδηγεί στην απορρόφηση ενός ποσοστού της συνολικής ζήτησης, το οποίο καλείται «μερίδιο αγοράς» (market share) του NO- i , $msh_i(p_i)$. Ισχύει ότι:

$$msh_i(p_i) = \frac{1-p_i}{|N|} + \frac{\sum_{k \in (N-i)} (p_k)}{(|N|) \cdot (|N|-1)} \quad (6.1)$$

Το προκύπτον κέρδος για τον NO- i ($i \in N$), $RVN_i(p_i)$, θα είναι:

$$RVN_i(p_i) = \frac{c_i}{\sum_{k \in (N)} (c_k)} \cdot msh_i(p_i) \cdot d \cdot p_i \quad (6.2)$$

Τέλος, ας υποθέσουμε ότι ένα υποσύνολο του συνόλου των NOs, $N_{cp} \subseteq N$, συνενώνει τις προσωρινά μη χρησιμοποιούμενες ζώνες φάσματος σε μια κοινή δεξαμενή (common pool - cp).

Η επίδοση ενός τέτοιου σχήματος θα καθοριστεί από την εκ νέου επιλεγείσα τιμή για οποιαδήποτε δοσοληψία θα πραγματοποιηθεί επί της κοινής αυτής δεξαμενής. Η τιμή αυτή συμβολίζεται ως p_{cp} , και αναπαριστά την τιμή με την οποία θα μπορεί κάποιος να δανειστεί φάσμα από την κοινή δεξαμενή.

Η επιλογή της ανωτέρω τιμής καθορίζει και πάλι το νέο μερίδιο αγοράς της κοινής δεξαμενής, $msh_{cp}(p_{cp})$, ενώ το μερίδιο καθενός εκ των συμμετεχόντων στην κοινή δεξαμενή NO- j , ($j \in N_{cp}$), θα είναι $RVN_j^{cp}(p_{cp})$. Με τον τρόπο αυτό, η τελική επίδοση του συστήματος θα κρίνεται εκ της σύγκρισης του κέρδους καθενός εκ των συμμετεχόντων στην κοινή δεξαμενή,

ήτοι του $RVN_j^{cp}(p_{cp})$, με το κέρδος της αυτόνομης λειτουργίας του NO- j , ήτοι του $RVN_j(p_j)$.

6.4 Εφαρμογή Μοντέλου και Ενδεικτικά Αποτελέσματα

Για την αξιολόγηση θα χρησιμοποιηθούν 3 σενάρια. Τα πρώτα 2 αναφέρονται στην αυτόνομη δραστηριότητα ενός NO (όσον αφορά τη δημιουργία της δεξαμενής) και διαφοροποιούνται ως προς το «άνοιγμα» των επιβαλλόμενων τιμών. Το δε τρίτο παρουσιάζει την ιδέα της συνένωσης εκ μέρους NOs διαθέσιμου φάσματος σε μια κοινή δεξαμενή.

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου αξιολόγησης καταδεικνύουν τη χρησιμότητά του με 2 τρόπους, ήτοι:

- συγκρίνοντας το μέσο προσδοκώμενο κέρδος ενός NO που χρησιμοποιεί τη δεξαμενή με το κέρδος των ανταγωνιστών του και
- συγκρίνοντας τα κέρδη των NOs μέσω της επιλογής τιμών πέλησης του φάσματος εντός της δεξαμενής με τα αποκτώμενα εκτός αυτής (χωρίς τη δημιουργία της).

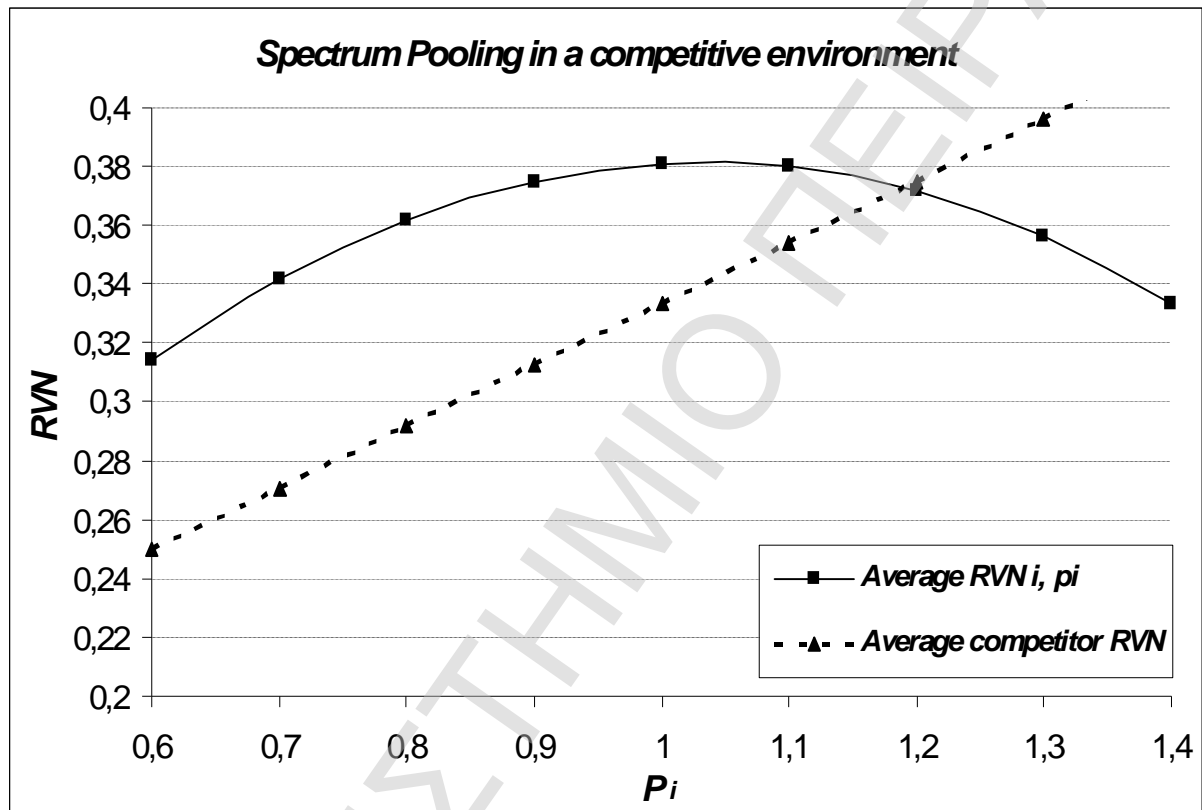
6.4.1 Σενάριο 1

Στο πρώτο σενάριο, το σύνολο N αποτελείται από 4 NOs που διαθέτουν $c_1=3$, $c_2=4$, $c_3=2$ και $c_4=5$ φέροντα προς προσωρινή πώληση. Επιπλέον, $p_1=0.6 \cdot p$ (το p δηλώνει μια τιμή αναφοράς), $p_2=0.8 \cdot p$, $p_3=1.2 \cdot p$ και $p_4=1.4 \cdot p$, αντίστοιχα.

Τα προκύπτοντα μερίδια αγοράς, όπως προκύπτουν από τη σχέση (6.1), είναι περίπου 0.38 (38%), 0.32, 0.18 και 0.12. Τέλος, υποθέτοντας ότι υπάρχει μια συνολική ζήτηση για 5 φέροντα, τα τελικά προσδοκώμενα κέρδη (εφαρμόζοντας τη σχέση 6.2) είναι περίπου $0.25 \cdot p$, $0.36 \cdot p$, $0.16 \cdot p$ και $0.29 \cdot p$.

Υποθέτουμε ότι κάθε NO- i μπορεί να επιλέξει κατάλληλα την εφαρμοζόμενη τιμή (p_i), λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των ανταγωνιστών του. Αν, επί παραδείγματι, αφήσουμε την p_i να κυμαίνεται από $0.6 \cdot p$ έως $1.4 \cdot p$ (διατηρώντας τις τιμές των ανταγωνιστών σταθερές), το μέσο προσδοκώμενο κέρδος για τον NO- i ($RVN_i(p_i)$) θα είναι αυτό που απεικονίζεται στο Σχήμα 6-2.

Εύκολα παρατηρούμε ότι η δεξαμενή αποδεικνύεται εξαιρετικά ωφέλιμη για μια ευρεία κλίμακα της επιλεγόμενης τιμής p_i . Συγκεκριμένα, διατηρώντας την p_i σε χαμηλά επίπεδα, το μέσο προσδοκώμενο κέρδος $RVN_i(p_i)$, ($i \in N$), είναι υψηλότερο από το μέσο κέρδος ενός τυχόντα ανταγωνιστή. Μια πιθανή αύξηση της τιμής p_i οδηγεί σε αύξηση των κερδών τόσο του NO- i , όσο και του ανταγωνιστή.



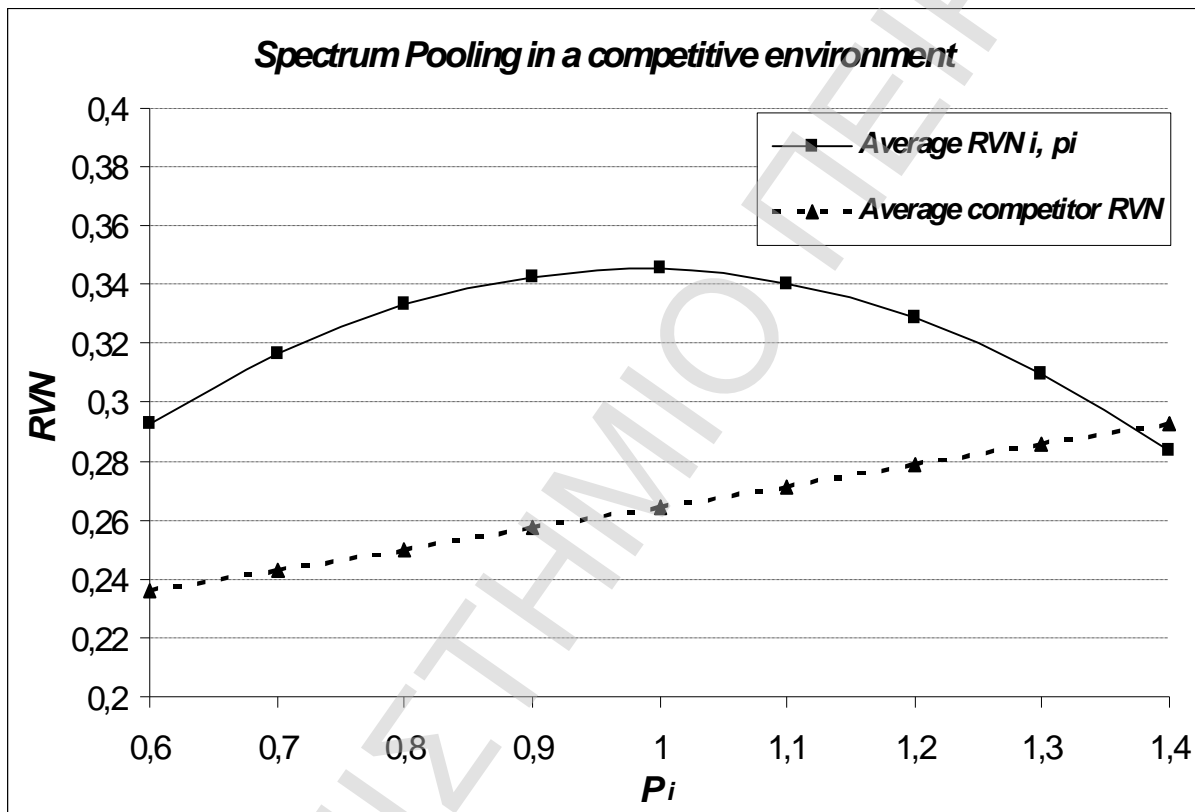
Σχήμα 6-2: Αξιολόγηση Spectrum Pooling – Σενάριο 1: αυτόνομη λειτουργία ενός NO έναντι του ανταγωνισμού

Μόνο πάνω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο της τιμής της p_i , το κέρδος του ανταγωνιστή αυξάνεται «επικίνδυνα». Ωστόσο, σε γενικές γραμμές, ο NO- i δύναται να επιλέξει την τιμή (p_i) με τρόπο τέτοιο ώστε να επιτύχει το επιθυμητό αποτέλεσμα ως προς τη διαφοροποίηση του κέρδους του από αυτό του κάθε ανταγωνιστή.

6.4.2 Σενάριο 2

Στο δεύτερο σενάριο, το σύνολο N και τα φέροντα που διατίθενται προς πώληση παραμένουν ως είχαν, δηλαδή $c_1=3$, $c_2=4$, $c_3=2$ και $c_4=5$, αντίστοιχα. Μολαταύτα, $p_1=0.8 \cdot p$, $p_2=0.9 \cdot p$, $p_3=p$ και $p_4=1.1 \cdot p$, τώρα. Τα μερίδια αγοράς και τα προσδοκώμενα κέρδη προκύπτουν εκ νέου εφαρμόζοντας τις (6.1) και (6.2).

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου απεικονίζονται γραφικά στο Σχήμα 6-3.



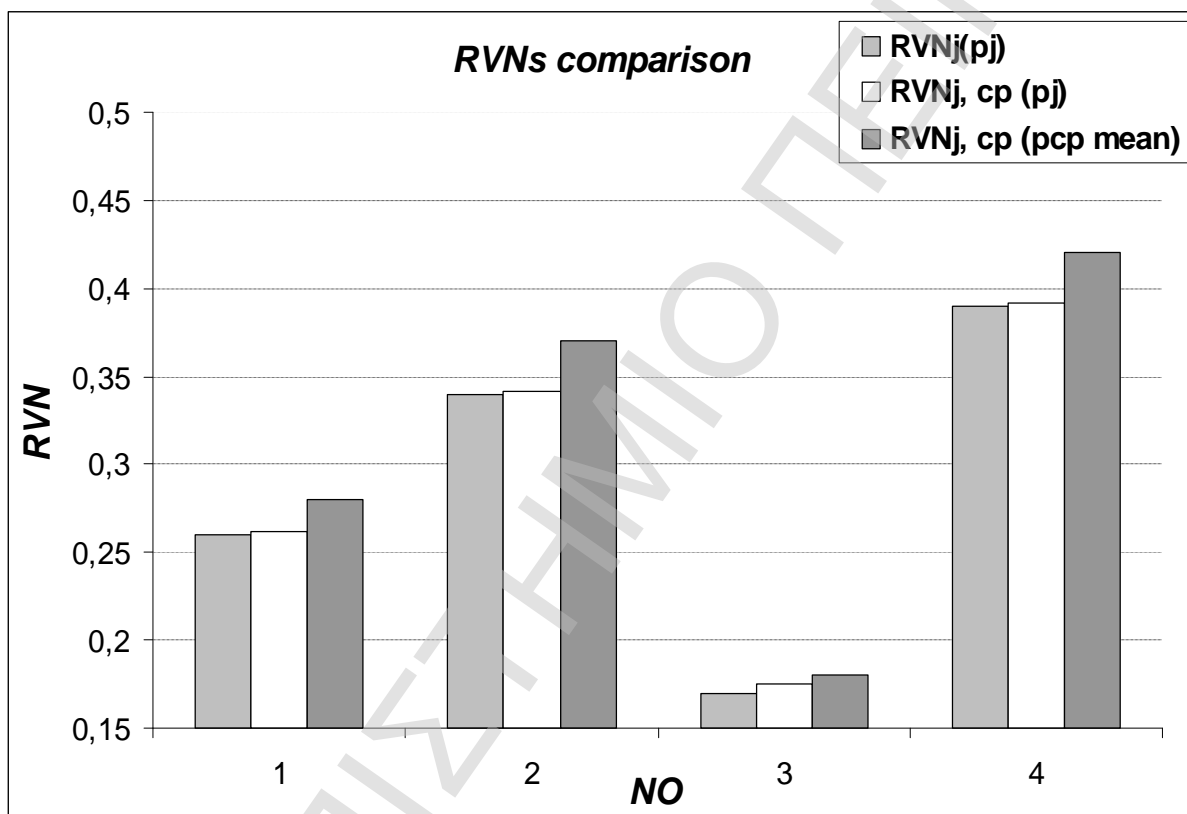
Σχήμα 6-3: Αξιολόγηση Spectrum Pooling – Σενάριο 2: αυτόνομη λειτουργία ενός NO έναντι του ανταγωνισμού

Παρατηρούμε τώρα ότι η δεξαμενή φάσματος αποδεικνύεται ωφέλιμη σε μια περισσότερο ευρεία κλίμακα από ό,τι προηγουμένως (το σημείο τομής μεταξύ των καμπυλών ολισθησε προς τα δεξιά, σε σύγκριση με το Σχήμα 6-2), λόγω της μικρότερης διακύμανσης στις τιμές που «απαιτεί» ο NO.

Σε γενικές γραμμές, ωστόσο, οι NOs αδυνατούν να επιτύχουν τόσο υψηλά κέρδη όσο στο προηγούμενο σενάριο, αλλά εναπόκειται στην πολιτική τους το να βελτιστοποιήσουν τα κέρδη τους, επιλέγοντας την κατάλληλη τιμή.

6.4.3 Σενάριο 3

Το τελευταίο σενάριο υποθέτει ότι ένας αριθμός από NOs συνενώνουν τις δεξαμενές τους μέσα σε μια μεγαλύτερη, κοινή δεξαμενή. Υποτίθεται επίσης ότι όλα τα πιθανά ζεύγη 2 NOs μπορούν να σχηματίσουν την κοινή δεξαμενή, ήτοι, $N_{cp} = (i, j)$, όπου $i, j = 1, \dots, 4$.

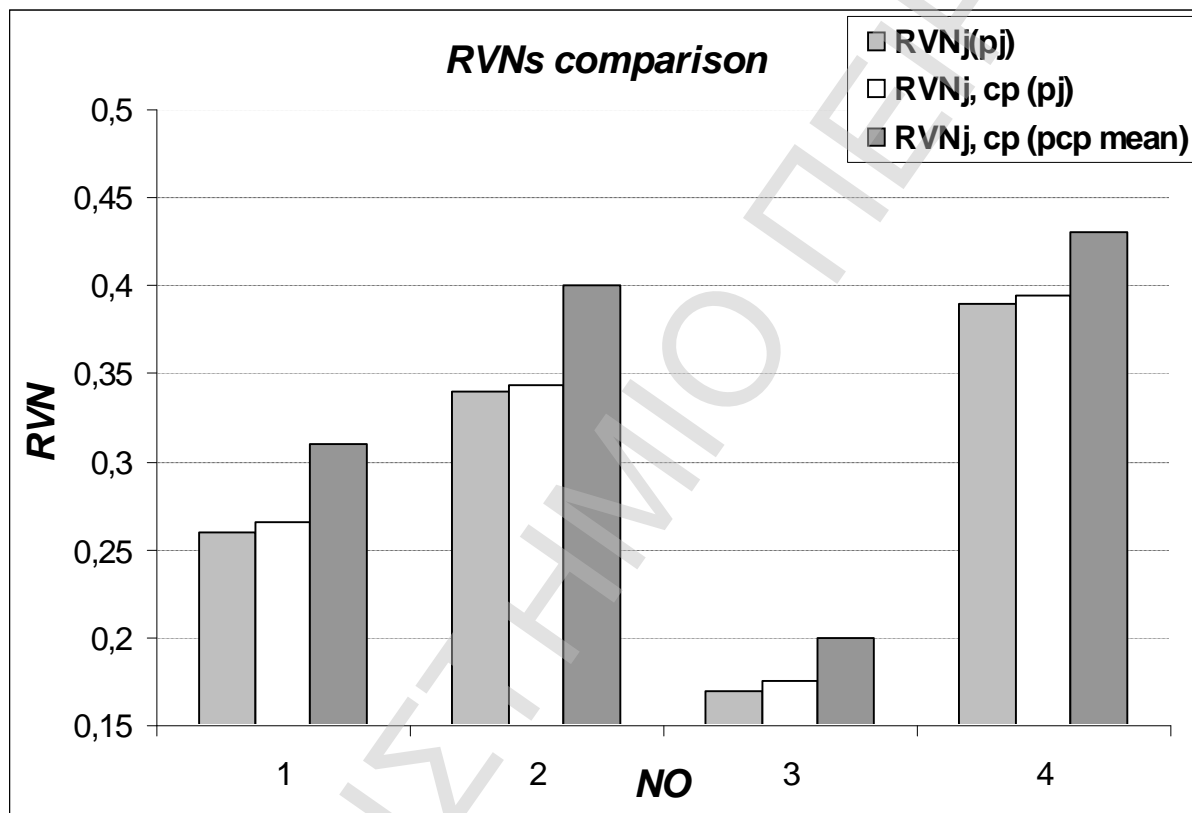


Σχήμα 6-4: Αξιολόγηση Spectrum Pooling – Σενάριο 3(α): Εκτίμηση κερδών στην περίπτωση κοινής δεξαμενής φάσματος

Το Σχήμα 6-4 και το Σχήμα 6-5 συγκρίνουν τα μέσα προσδοκώμενα κέρδη των NOs εντός της δεξαμενής με τα αντίστοιχα κέρδη εκτός αυτής, χρησιμοποιώντας τις τιμές των NOs του σεναρίου 1 και 2 αντίστοιχα, ως προς την επιλεγόμενη προς εφαρμογή p_{cp} .

Επικεντρώνοντας για παράδειγμα στον NO-1, παρατηρούμε ότι, διατηρώντας την p_{cp} στα ίδια επίπεδα ($p_{cp} = p_1$), το προσδοκώμενο κέρδος $RVN_1^{cp}(p_1)$ είναι περίπου το ίδιο με το

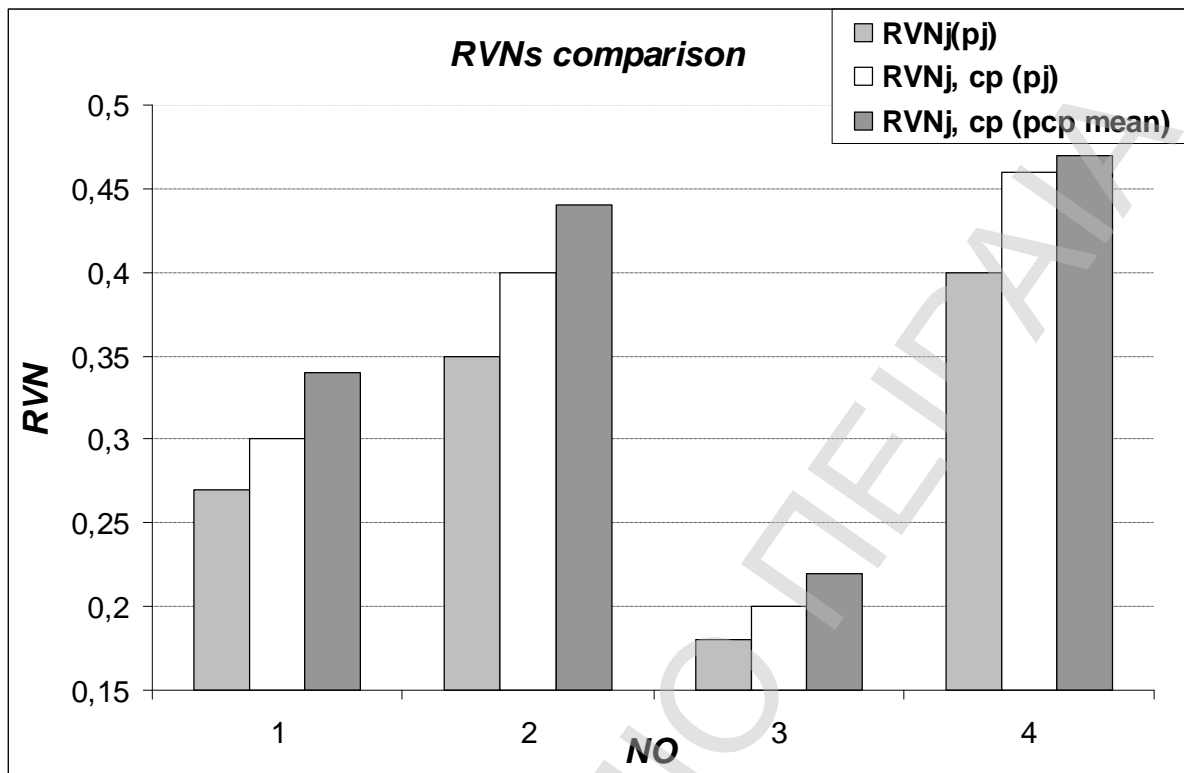
κέρδος $RVN_1(p_1)$ (στην περίπτωση αυτόνομης δραστηριότητας). Παρόλα αυτά, μια πιθανή αύξηση της τιμής p_{cp} είναι άκρως δελεαστική: υποθέτοντας μια αύξηση στην τιμή p_{cp} προς μια μέση τιμή (ήτοι $0.95 \cdot p$), το κέρδος $RVN_1^{cp}(p_{cp})$ αυξάνεται κατά περίπου 8% και 20% στα 2 σενάρια, με υπεροχή του σεναρίου όπου η διακύμανση των επιλεγόμενων τιμών είναι μικρότερη.



Σχήμα 6-5: Αξιολόγηση Spectrum Pooling – Σενάριο 3 (β): Εκτίμηση κερδών στην περίπτωση κοινής δεξαμενής φάσματος

Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται και για τους υπόλοιπους NOs, ενώ επιπλέον πρέπει να σημειωθεί ότι η δεξαμενή είναι περισσότερο επικερδής για τους λιγότερο ακριβούς NOs.

Τέλος, θα πρέπει να μελετηθεί και η περίπτωση που περισσότεροι των 2 NOs ενώνουν τις δεξαμενές φάσματος υπό μια ακόμα μεγαλύτερη δεξαμενή. Στην περίπτωση αυτή αναμένονται και τα θετικότερα αποτελέσματα από τη δημιουργία της δεξαμενής. Το Σχήμα 6-6 αποδεικνύει ότι τα αναμενόμενα κέρδη για έναν NO, πχ τον NO_1 , θα κυμανθού'ν από 14% έως 32%, με ταυτόχρονη αποδυνάμωση του εναπομείναντος ανταγωνιστή.



Σχήμα 6-6: Αξιολόγηση Spectrum Pooling – Σενάριο 3 (γ): Εκτίμηση κερδών στην περίπτωση μεγαλύτερης κοινής δεξαμενής φάσματος

6.5 Επιχειρηματικοί Ορίζοντες

Η πρόταση για υιοθέτηση μιας τεχνικής όπως το Spectrum Pooling αλλά και για συνασπισμό μεταξύ των παρόχων μπορεί σε πρώτη ματιά να απευθύνεται στους παρόχους αυτούς καθαυτούς, λόγω της άμεσης αύξησης των κερδών τους που συνεπάγεται, αλλά ακόμα και βραχυπρόθεσμα παρατηρούνται οφέλη αναφορικά με όλες τις οντότητες που εμπλέκονται στο πεδίο των τηλεπικοινωνιών, αφού η βελτιστοποίηση της χρήσης φάσματος απασχολεί τους πάντες. Τα οφέλη αυτά αποτελούν και το κυριότερο αντικείμενο αυτής της παραγράφου.

Οι χρήστες γενικά θα διαπιστώσουν άμεση βελτίωση στην ποιότητα των υπηρεσιών που λαμβάνουν, με αποτέλεσμα να καταστεί πραγματοποιήσιμο το όραμα της συνεχούς συνδεσιμότητας οπουδήποτε, οποτεδήποτε και με τα ιδανικότερα επίπεδα ποιότητας. Επιπλέον, η μετάδοση κινούμενης εικόνας (video) σε πραγματικό χρόνο, καθώς και οι πολύ υψηλές ταχύτητες πρόσβασης στον παγκόσμιο ιστό (internet) θα διευκολύνουν τις

δραστηριότητες των χρηστών. Εκτός των άλλων, η διαφαινόμενη αφθονία σε φάσμα απορρέουσα από την ορθή χρήση του, θα αποδειχτεί επωφελής αναφορικά με την παροχή καινοτόμων, υψηλού επιπέδου, υπηρεσιών.

Οι πάροχοι αποκτούν με την βέλτιστη χρήση του διαθέσιμου φάσματος περισσότερες επιλογές να εξυπηρετήσουν χρήστες, που σε διαφορετικές συνθήκες θα απέρριπταν και να προσφέρουν σε αυτούς ικανοποιητικότερες υπηρεσίες. Η εξυπηρέτηση αυτή μάλιστα θα πραγματοποιείται και με τρόπο οικονομικά συμφέροντα, λόγω της – ούτως ή άλλως αύξησης των κερδών των παρόχων, με αποτέλεσμα να πάψει να παρατηρείται η συνεχής αύξηση των τιμών των υπηρεσιών που προσφέρουν. Εκτός αυτού, σε γενικές γραμμές μια αποδοτική χρήση του διαθέσιμου φάσματος δύναται να διευκολύνει τους παρόχους και στην ενίσχυση της ανταγωνιστικότητάς τους μέσα στη Β3G εποχή που διανύουμε, καθόσον θα μπορούν να εισάγουν νέες υπηρεσίες και να διαφοροποιούνται από τους ανταγωνιστές τους. Αυτό αποτελεί μακροπρόθεσμα επιπλέον κίνητρο για τους χρήστες να χρησιμοποιούν τις προσφερόμενες υπηρεσίες, με τελικό αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός επικερδούς επιχειρηματικού κύκλου.

Η επιτυχής διαχείριση εκ μέρους των παρόχων του - μέχρι τούδε - υποχρησιμοποιούμενου φάσματος, θα δημιουργήσει μια επιχειρηματική αλυσίδα εκτεινόμενη από παρόχους – κολοσσούς μέχρι μικρού μεγέθους εταιρείες που χρησιμοποιούν το φάσμα. Το προτεινόμενο σχήμα του Spectrum Pooling θα ενισχύσει σημαντικά την από κοινού δράση παρόχων, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μεταξύ τους «συμμαχιών». Αυτό είναι όχι μόνο απολύτως θεμιτό, αλλά και απαραίτητο για την υλοποίηση του οράματος της από κοινού λειτουργίας, φαινομενικά διαφορετικής φύσης τεχνολογιών, πάνω σε μια γενική και ανεξάρτητη υποδομή, η οποία θα στηρίζει τη συνεργασία μεταξύ παρόχων, σε αντίθεση με τον εκ φύσεως ανταγωνισμό τους που διαπιστώνεται στη σημερινή εποχή και θα οδηγήσει μακροπρόθεσμα στην ανάπτυξη και στην παροχή ριζοσπαστικών και οικονομικά συμφερούσων λύσεων.

Γενικότερα, μια πλειάδα ερευνητικών δυνατοτήτων γεννιέται από την τεχνική που παρουσιάστηκε εδώ, ως προς τη γενικευμένη εκμετάλλευση επιχειρηματικών ευκαιριών που παρουσιάζονται σε περιβάλλοντα Β3G, αλλά και ως προς τη δημιουργία προκλήσεων για κάθε εμπλεκόμενη οντότητα στον κόσμο των ασυρμάτων επικοινωνιών, διαμέσου της σύστασης νέων θέσεων επιχειρηματικής απασχόλησης και καινοτόμων πεδίων συναλλαγών.

Σε τελική ανάλυση, ο απώτερος στόχος της από κοινού διαχείρισης του φάσματος (με όποιο – αποδοτικό – τρόπο και αν αυτή πραγματοποιείται) είναι όπως φαίνεται όχι τόσο η κερδοφορία ήδη επιτυχημένων επιχειρήσεων παρόχων δικτύου, όσο η λειτουργία του σχήματος ως μεσάζοντος για την αποδοτική χρήση του φάσματος εκ μέρους των χρηστών.

Η έκβαση μιας τέτοιας προσπάθειας θα είναι επομένως θετική, ταυτοχρόνως ως προς τη χρήση επαναστατικής φύσεως υπηρεσιών από τους χρήστες, αλλά και ως προς την ενίσχυση της επιχειρηματικότητας, που αποτελεί σημαντική κοινωνική συνεισφορά.

6.6 Συμπερασματικά Στοιχεία

Εν κατακλείδι, η ολοένα αυξανόμενη σύγκλιση μεταξύ των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στις ασύρματες επικοινωνίες αναπόφευκτα συντελεί στη ραγδαία αύξηση της ζήτησης για φάσμα, καθόσον οι χρήστες αδημονούν να γευτούν τις απολαβές της τεχνολογικής προόδου, στη μορφή καινοτόμων υπηρεσιών και υψηλών ρυθμών μετάδοσής τους. Ως εκ τούτου, αναγκαία καθίσταται η διενέργεια ερευνητικών προσπαθειών στον τομέα της βελτιστοποίησης του τρόπου με τον οποίο χειρίζονται το φάσμα οι κάτοχοί του. Σε αυτό το πλαίσιο εξετάστηκε σε αυτό το κεφάλαιο η δυνατότητα συνεργασίας των παρόχων δικτύου και της από κοινού εκμετάλλευσης αχρησιμοποίητων ζωνών φάσματος. Επιπλέον, προκειμένου να πεισθεί κάθε πάροχος για τη βιωσιμότητα ενός τέτοιου εγχειρήματος, παρουσιάστηκαν ενδεικτικά αποτελέσματα που αναδεικνύουν την ελκυστικότητα της προτεινόμενης μεθόδου, τόσο για τους παρόχους όσο και για τους τελικούς χρήστες ή και άλλες τρίτες πηγές.

Ειδικά στην περίπτωση τεχνολογιών OFDMA, μια τεχνική βελτίωσης της χρήσης του φάσματος είναι αυτή της δημιουργίας μιας δεξαμενής, από την οποία τρίτοι μπορούν να «δανείζονται» φάσμα. Έτσι, το παρόν κεφάλαιο προσπάθησε να αξιολογήσει την τεχνική αυτή από οικονομική σκοπιά. Τα σχετικά αποτελέσματα από προσομοιώσεις κατέδειξαν τα σημαντικά ευεργετικά αποτελέσματα που απορρέουν για τους NOs. Απομένει πλέον, μελλοντικές εργασίες να αναλύσουν διεξοδικά από τεχνικής σκοπιάς τη μέθοδο δημιουργίας δεξαμενής φάσματος, ώστε να πείσουν ακόμα περισσότερο περί της σημαντικότητάς της.

Σε γενικές γραμμές, οι μηχανισμοί ορθής και επωφελούς διαχείρισης – εκμετάλλευσης του φάσματος από τους κατόχους του που θα αποσκοπούν στην αύξηση της αποδοτικότητας της χρήσης του, θα αποτελέσουν αναπόσπαστο κομμάτι της έρευνας τα απόμεινα χρόνια. Παρά ταύτα, καμιά στρατηγική διαχείρισης δε θα είναι αποτελεσματική, εκτός εάν οι πάροχοι εξετάσουν τη δυναμική που θα προκύψει από μια πιθανή τους συνεργασία, ερχόμενη σε ορθή αντιπαράθεση με την υφιστάμενη κατάσταση ανταγωνισμού. Αυτό αναμφίβολα απαιτεί την ύπαρξη τόσο επιστημονικών όσο και οικονομικών κινήτρων που θα επηρεάσουν θετικά

τους ΝΟs προς αυτή την κατεύθυνση. Σε αυτό το πλαίσιο, η προταθείσα μέθοδος αποτελεί μονάχα το πρώτο βήμα προς την πραγματοποίηση αυτού του οράματος.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ

6.7 Βιβλιογραφία

- [1] G.Dimitrakopoulos, P.Demestichas, "Spectrum exchange in a reconfigurable radio context", in Proc. 1st IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2005), Baltimore, USA, November 2005.
- [2] The International Telecommunications Union (ITU) Web Site, <http://www.itu.int>, 2007.
- [3] Hellenic Telecommunications & Post Commission (EETT) Web Site, <http://www.eett.gr>, 2007.
- [4] European Radiocommunications Committee (ERC), "European table of frequency allocations and utilizations frequency range 9 kHz to 275 GHz," ERC Report 25, January 2002.
- [5] P. Leaves, D. Grandblaise, R. Tönjes, K. Moessner, M. Breveglieri, D. Bourse, R. Tafazolli, "Dynamic Spectrum Allocation in Composite Reconfigurable Wireless Networks", IEEE Communications Magazine, Vol. 42, No. 5, May 2004.
- [6] J. Mitola III, G. Q. Maguire, Jr., "Cognitive radio: Making software radios more personal," IEEE Personal Commun., pp. 13-18, August 1999.
- [7] Federal Communications Commission (FCC), "Notice of proposed rule making and order," FCC Et docket no. 03-322, Et docket no. 03-108, December 2003.
- [8] Secondary Markets Initiative, <http://wireless.fcc.gov/licensing/secondarymarkets>
- [9] T.A. Weiss, F.K. Jondral, "Spectrum Pooling: an innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency", IEEE Communications Magazine, vol. 42, pp. S8-14, March 2004.
- [10] M. J. Osborne, "An Introduction to Game Theory", Oxford University Press, 2003, ISBN: 0195128958.
- [11] 9. Brenner, Steffen H., "Hotelling Games with Three, Four, and More Players", Journal of Regional Science, Vol. 45, No. 4, pp. 851-864, November 2005.
- [12] J.Wright, "Access pricing under competition: An application to cellular networks", The Journal of Industrial Economics, Vol. L, No. 3, Sep. 2002, pp. 289-315.
- [13] P. Demestichas, V. Stavroulaki, "Issues in introducing resource brokerage functionality in B3G, composite radio, environments", IEEE Wireless Commun. Magazine, Vol. 11, No. 10, October 2004.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ

7. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ

Η παρούσα διατριβή κινήθηκε στα πλαίσια των φάσεων σχεδιασμού και διαχείρισης των πόρων (και δη του φάσματος) σε συστήματα επικοινωνιών πέραν της τρίτης γενιάς (B3G), με έμφαση σε reconfigurable (δυναμικά αναδιαρθρούμενα) και cognitive (γνωσιακά) δίκτυα. Συγκεκριμένα, προτάθηκαν και μελετήθηκαν μέθοδοι βελτιστοποίησης που λαμβάνουν χώρα σε όλες τις παραπάνω φάσεις λειτουργίας ενός συστήματος επικοινωνιών.

Υπό το πρίσμα αυτό παρουσιάστηκαν αρχικά οι σημερινές και μελλοντικές τάσεις στον κόσμο των ασυρμάτων επικοινωνιών, με έμφαση στο όραμα B3G και στο πώς ο κόσμος των ασυρμάτων επικοινωνιών θα κατορθώσει την πραγμάτωσή του. Προς τούτο, αναλύθηκαν τα σχετικά επιχειρησιακά μοντέλα για την είσοδο B3G συστημάτων στον εμπορικό τομέα και ακολούθως εισήχθησαν οι έννοιες των δικτύων επικοινωνιών με δυνατότητα δυναμικής αναδιάρθρωσης (reconfigurable networks), όπως και η έννοια της επίγνωσης (cognition) που καθοδηγεί τη συμπεριφορά ενός δικτύου, με στόχο την εκ των προτέρων γνώση του βέλτιστου τρόπου που συνιστάται για την προσαρμογή του στις επιταγές του περιβάλλοντος.

Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες των – νέας γενιάς – δικτύων, προτάθηκε μια γενική μορφή της αρχιτεκτονικής των αλγορίθμων διαχείρισης πόρων, ενώ κατόπιν ορίστηκε καταλλήλως η περιοχή λειτουργίας κάθε αλγορίθμου. Παράλληλα, έμφαση δόθηκε στην ανάγκη αυτόνομης – κατά το δυνατόν – λειτουργίας των συστημάτων διαχείρισης, ώστε να διευκολύνεται η ενσωμάτωση ολοένα καινοτόμων τεχνικών / τεχνολογιών και αναφορά δόθηκε και στις σχετικές μελλοντικές τάσεις.

Έτσι, καταλήξαμε στον πυρήνα της εργασίας αυτής, με την παρουσίαση του αλγορίθμου “RAT and Spectrum Selection”, που αποτελεί μια γενικευμένη τεχνική διαχείρισης πόρων και φάσματος, κατάλληλη για εφαρμογή σε συστήματα reconfigurable και cognitive δικτύων. Η εν λόγω τεχνική θεωρεί τυχούσες τεχνολογίες επικοινωνιών και κατανέμει αυτές, το διαθέσιμο φάσμα τους και τη σχετική ζήτηση σε ένα σύνολο από αναδιαρθρούμενους πομποδέκτες, σε ένα τμήμα δικτύου. Η γενική μορφή της μεθόδου μοντελοποιήθηκε μαθηματικά, ενώ παράλληλα παρουσιάστηκε και μια απλουστευμένη εκδοχή της, η οποία αποσκοπεί στην επίλυση του προβλήματος RDO-A, που αναφαιίνεται σε εμπορικά συστήματα, όπως UMTS/HSDPA και WLAN/WiMAX.

Πέραν της μαθηματικής μοντελοποίησης των αλγορίθμων, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις, τα αποτελέσματα των οποίων κατέδειξαν τη χρηστικότητά τους και τη δυνατότητα εύκολης ενσωμάτωσή τους σε οποιασδήποτε μορφής μελλοντικά συστήματα, αλλά και σε σημερινά εμπορικά, κυρίως λόγω της δυνατότητάς τους να συμβάλουν στη μείωση των CAPEX και OPEX ενός NO.

Έπειτα από τη γενική κατανομή τεχνολογιών σε πομποδέκτες, λογικά τίθεται το ερώτημα του τι γίνεται με τη διαχείριση των πόρων των επιλεχθέντων συστημάτων. Στο ερώτημα αυτό δόθηκε απάντηση με την ανάπτυξη μεθόδου για τη διαχείριση φάσματος σε συστήματα CDMA που έχουν επιλεχθεί προς λειτουργία με τους ανωτέρω αλγορίθμους. Η διαχείριση σχετίζεται με την κατανομή της ζήτησης στα διαθέσιμα CDMA φέροντα και η σχετική μέθοδος που αναπτύχθηκε κατορθώνει να πραγματοποιεί τη βέλτιστη επιλογή, προσαρμοσμένη στις ανάγκες και τα κριτήρια που θέτει ο εκάστοτε πάροχος.

Στο περιθώριο των παραπάνω μελετήθηκε αναλυτικά και το θέμα της εμπορικής εκμετάλλευσης του φάσματος, με έμφαση στο διαθέσιμο φάσμα για τεχνολογίες OFDMA. Συγκεκριμένα, αναλύθηκαν διάφορες παράμετροι του θέματος αναφορικά με τη δυνατότητα αξιοποίησης του OFDMA φάσματος και εκτιμήθηκε από επιχειρηματικής / εμπορικής σκοπιάς το αποτέλεσμα της εκμετάλλευσής του από έναν NO, όσο και της από κοινού εκμετάλλευσής του από μια μερίδα NOs, μέσω της δημιουργίας μιας δεξαμενής φάσματος (Spectrum Pooling). Τα σχετικά αποτελέσματα της (οικονομικής) ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε έδειξαν μια σημαντική αύξηση των οικονομικών απολαβών των παρόχων, που σίγουρα θα εγείρει το ενδιαφέρον τους προς την κατεύθυνση αυτή.

Έπειτα από τη σύνοψη που προηγήθηκε, θεωρούμε σωστό να σταθούμε λίγο στις προοπτικές εξέλιξης και μελλοντικής έρευνας που συνοδεύουν την παρούσα διατριβή. Στις αρχές του 21^{ου} αιώνα, ο κόσμος των τηλεπικοινωνιών βρίσκεται κάπου ανάμεσα στην καθολική αποδοχή του UMTS, το οποίο αποτέλεσε σημαντικό αντικείμενο μελέτης και έρευνας τα τελευταία χρόνια, και στην εξαιρετικά ταχεία πρόοδο προς συστήματα B3G, με κύριο εκφραστή τους τη δυναμική αναδιάρθρωση, η οποία αποτελεί στην ουσία εκφραστή της παγκοσμιοποίησης στο χώρο των επικοινωνιών. Η τάση αυτή επιφέρει αναμφίβολα την αναγκαιότητα μελέτης ενός τόσο πολυδιάστατου θέματος όσο αυτού της διαχείρισης των πόρων και κυρίως του φάσματος σε σύνθετα ραδιοδίκτυα.

Με γνώμονα τα παραπάνω, επιτακτική κρίνεται η ανάγκη συνέχισης των εργασιών που αποτέλεσαν αντικείμενο της διατριβής, με έμφαση στους εξής στόχους:

- Την ανάγκη αυτόνομης λειτουργίας των συστημάτων επικοινωνιών, στο βαθμό του εφικτού.
- Την ενσωμάτωση ολοκληρωμένων τεχνικών μάθησης που θα καθοδηγούν με τον καλύτερο τρόπο τη συμπεριφορά ενός δικτύου.
- Την αποτελεσματικότερη μελέτη νέων συστημάτων, όπως το WiMAX και την ενσωμάτωσή του σε περιβάλλοντα B3G.
- Την περαιτέρω εμβάθυνση και ολοκλήρωση της εργασίας ως προς το τεχνικό κομμάτι της διαχείρισης πόρων (συμπεριλαμβανομένου του φάσματος) μετά την επιλογή OFDMA RATs προς λειτουργία.
- Την περαιτέρω ενασχόληση με θέματα αξιοποίησης του διαθέσιμου φάσματος σε cognitive δίκτυα.

Αδιαμφισβήτητα, η ευρύτητα που χαρακτηρίζει τον τομέα των ασυρμάτων επικοινωνιών κάνει δυνατή τη συνεχή διεύρυνση της ανωτέρω λίστας και καθιστά πραγματοποιήσιμη την υπόσχεση συνέχισης των προσπαθειών μας για ανταπόκρισή μας στις επιταγές της – συνεχώς εξελισσόμενης - τεχνολογίας.

Με το σκεπτικό αυτό, μπορούμε να υποστηρίξουμε ότι ο δρόμος προς την πρόοδο είναι μεν ατέρμων, αλλά πάντοτε είναι επιθυμητή η συμβολή κατά ένα ελάχιστο, πλην όμως – πάντοτε σημαντικό – ποσοστό στην εξέλιξη του ανθρωπίνου πνεύματος αναφορικά με τη χρήση του στη σύγχρονη τεχνολογία. Η ελπίδα ότι προς αυτή την κατεύθυνση κινήθηκε και η ολοκληρωμένη πλέον παρούσα διατριβή θα συνοδεύει πάντοτε τις σκέψεις μας.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ

Ακρωνύμιο	Πλήρης όρος
3G	Τρίτης γενιάς (συστήματα)
4G	Τέταρτης γενιάς (συστήματα)
AMPS	Advanced Mobile Phone Service
AP	Access Point
APC	Allocation Policy Code
ASM	Advanced Spectrum Management
B3G	Beyond the 3 rd Generation – Πέραν της 3 ^{ης} Γενιάς
BRAN	Broadband Radio Access Network
BS	Base Station
CAPEX	Capital Expenditure – Έξοδα Υποδομής
CDMA	Code Division Multiple Access
CgAP	Cognitive Access Point
CgWNS	Cognitive Wireless Network Segment
DAB	Digital Audio Broadcasting
DAMC	Demand Allocation into Multiple Carriers
DCS	Digital Cellular System
DNPM	Dynamic Network Planning and Management
DS-CDMA	Direct Sequence Code Division Multiple Access
DVB	Digital Video Broadcasting

FA	Functional Architecture
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FM	Frequency Modulation
FWA	Fixed Wireless Access
GPRS	General Packet Radio Service
GSAM	Global Spectrum Allocation Manager
GSM	Global System for Mobile Communications
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IOEM	Inter-Operator Economic Manager
IORM	Inter-Operator Resource Manager
IPv4/IPv6	Internet Protocol Version 4 / 6
ITU	International Telecommunications Union
JRRM	Joint Radio Resource Management
LLC	Logical Link Control
LSAM	Local Spectrum Allocation Manager
LSEM	Local Spectrum Economic Manager
MAC	Medium Access Control
MOP	Meta – Operator
NO	Network Operator (Πάροχος Δικτύου)
OF	Objective Function – Αντικειμενική Συνάρτηση
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OPEX	Operational Expenditure – Λειτουργικά Έξοδα
PHY	Physical (layer)
RAT	Radio Access Technology – Τεχνολογία Ασύρματης Πρόσβασης
SDR	Software Defined Radio
SMCgAP	Self-Management of Cognitive Access Points
SMCgWNS	Self-Management of Cognitive Wireless Network Segments
SP	Spectrum Pooling – Δεξαμενή Φάσματος
TDMA	Time Division Multiple Access
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
WAP	Wireless Application Protocol
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiMAX	Worldwide Interoperability of Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Networks
WPAN	Wireless Personal Area Networks
WSN	Wireless Sensor Networks
WShRN	Wireless Short Range Networks
WWAN	Wireless Wide Area Networks
WWRF	Wireless World Research Forum
EETT	Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων

ΟΤΕ	Όργανισμός Τηλεπικοινωνιών Ελλάδος
-----	------------------------------------

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΛΙΣΤΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ (ΜΑΙΟΣ 2007)

Εργασίες σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά και βιβλία (κατόπιν κρίσεως)

1. P. Demestichas, G. Dimitrakopoulos, J. Strassner, D. Bourse, "Introducing Reconfigurability and Cognitive Networks Concepts in the Wireless World: Research Achievements and Challenges", IEEE Vehicular Technology Magazine, Vol. 1, No. 2, June 2006, pp. 32-39.
2. K. Tsagkaris, G. Dimitrakopoulos, P. Demestichas, A. Saatsakis, "Distributed Radio Access Technology Selection for Adaptive Networks in High-Speed, B3G Infrastructures", International Journal of Communication Systems, Wiley, October 2007.
3. G. Dimitrakopoulos, K. Moessner, C. Kloeck, D. Grandblaise, S. Gault, O. Sallent, K. Tsagkaris, P. Demestichas, "Adaptive Resource Management Platform for Reconfigurable Networks", ACM/Springer Mobile Networks and Applications journal, Vol. 11, N° 6, December 2006, pp. 799-811.
4. K. Moessner, P. Leaves, D. Grandblaise, F. Capar, E. Mohyeldin, P. Demestichas, G. Dimitrakopoulos, J. Luo, R. Tafazolli, "Reconfiguration Techniques to Enhance Network Efficiency", Frequenz (Journal of Telecommunications), ISSN 0016-1136, vol.58, 5-6/2004, pp.132-135.
5. P. Demestichas, G. Dimitrakopoulos, K. Moessner, T. Dodgson, D. Bourse (editors), "Reconfigurability", Technologies for the Wireless Future: Wireless World Research Forum (WWRF), Vol. 2, WILEY, 2006, ISBN: 0-470-02905-6.
6. V. Stavroulaki, G. Dimitrakopoulos, A. Katidiotis, P. Demestichas, D. Bourse, K. El Khazen, "Negotiation of Network Services and Spectrum in B3G, Composite Radio, Environments", Innovation and the Knowledge Economy: Issues, Applications, Case Studies, Part 2, pp. 1103- 1110, IOS Press, 2005, ISBN 1-58603-563-0.
7. K. Tsagkaris, G. Dimitrakopoulos, P. Demestichas, "Policies for the Reconfiguration of Cognitive Wireless Infrastructures to 3G Radio Access Technologies", submitted for publication in ACM/Springer Wireless Networks journal.
8. G. Dimitrakopoulos, P. Demestichas, K. Tsagkaris, A. Saatsakis, K. Moessner, M. Muck, D. Bourse, "Emerging Management Concepts for Introducing Cognition in the Wireless B3G World", submitted for publication to the Wireless Personal Communications journal.
9. G. Dimitrakopoulos, K. Tsagkaris, K. Demestichas, E. Adamopoulou, P. Demestichas, "Management Schemes for Distributed Cross-Layer Reconfigurations in the Context of

Cognitive B3G Infrastructures”, submitted for publication to the Computer Communications journal.

Εργασίες δημοσιευμένες στα πρακτικά διεθνών επιστημονικών συνεδρίων

1. G. Dimitrakopoulos, K. Tsagkaris, E. Adamopoulou, K. Demestichas, P. Demestichas, “Management Strategies for Distributed Cross-Layer Reconfigurations in the Context of Cognitive, B3G Infrastructures”, in Proc. 2007 IST Mobile Summit, Budapest, Hungary, July 2007.
2. P. Demestichas, G. Dimitrakopoulos, K. Tsagkaris, V. Stavroulaki, “Validation Approach for End-to-End Reconfigurable Systems”, in Proc. 2007 IST Mobile Summit, Budapest, Hungary, July 2007.
3. K. Tsagkaris, G. Dimitrakopoulos, P. Demestichas, “Spectrum Management Strategies for efficient UMTS Integration in Wireless B3G Infrastructures”, in Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC’06), Istanbul, Turkey, June 2006.
4. G. Dimitrakopoulos, M. Muck, D. Bourse, P. Demestichas, K. Tsagkaris, “Reconfigurations Selection in Cognitive, B3G Infrastructures: Principles, Management Paradigms, New Challenges”, in Proc. 2006 IST Mobile Summit, Mykonos, Greece, June 2006.
5. J. Luo, D. Grandblaise, C. Kloeck, G. Dimitrakopoulos, K. Moessner, “Reconfigurability Impacts to Resource Management in Future Wireless Communication Systems”, in Proc. 13th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON) 2006, Malaga, Spain, May 2006.
6. C. Kloeck, D. Grandblaise, J. Luo, G. Dimitrakopoulos, “Multi-Level Spectrum Auction through Radio Access”, in Proc. 13th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON) 2006, Malaga, Spain, May 2006.
7. K. Moessner, J. Luo, E. Mohyeldin, D. Grandblaise, C. Kloeck, I. Martoyo, O. Sallent, P. Demestichas, G. Dimitrakopoulos, K. Tsagkaris, N. Olaziregi, “Functional Architecture of End-to-End Reconfigurable Systems”, in Proc. IEEE VTC 2006 Spring, Melbourne, Australia, May 2006.
8. K. Tsagkaris, G. Dimitrakopoulos, P. Demestichas, “Load balancing oriented Spectrum Management for UMTS Networks operating in Adaptive B3G Environments”, in Proc. IEEE VTC 2006 Spring, Melbourne, Australia, May 2006.
9. G. Dimitrakopoulos, P. Demestichas, “Spectrum exchange in a reconfigurable radio context”, in Proc. 1st IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2005), Baltimore, USA, November 2005.

10. P.Demestichas, G.Dimitrakopoulos, D. Bourse, K.El.Khazen, "Dynamic planning and management of reconfigurable networks", in Proc. 1st IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2005), Baltimore, USA, November 2005.
11. V. Stavroulaki, A. Katidiotis, G. Dimitrakopoulos, P. Demestichas, S. Buljore, "Negotiation and selection of equipment reconfigurations in beyond 3G systems", in Proc. IEEE Personal Indoor Mobile Radio Communications 2005 (PIMRC 2005), Berlin, Germany, September 2005.
12. G.Dimitrakopoulos, D.Bourse, K.EIKhazen, P.Demestichas, A.Saatsakis, J.Luo, "Planning Reconfigurable Network Segments: Motivation, Benefits for Operators and Manufacturers, and Strategies", in Proc. IEEE Personal Indoor Mobile Radio Communications 2005 (PIMRC 2005), Berlin, Germany, September 2005.
13. P.Demestichas, G.Dimitrakopoulos, V.Stavroulaki, D.Bourse, "Introducing econfigurability in Wireless B3G Environments, in Proc. 2005 IST Mobile Summit, Dresden, June 19th-23rd, 2005.
14. G. Dimitrakopoulos, P. Demestichas, J.Luo, O.Sallent, R.Agusti, K.Moessner, "Dynamic Planning and Management of Reconfigurable Systems", in Proc. 2005 IST Mobile Summit, Dresden, June 19th-23rd, 2005.
15. P.Demestichas, K.Tsagkaris, G.Dimitrakopoulos, A.Saatsakis, G.Vivier, J.Luo, "Advanced Planning Strategies for Wireless Networks in a B3G Reconfigurable Radio Context", in Proc. IEEE VTC 2005 Spring, Stockholm, Sweden, May30th -June2nd, 2005.
16. G.Dimitrakopoulos, P.Demestichas, T.Wiebke, N.Alonistioti, Q.Wei, K.Moessner, S.Gultchev, R.Tafazolli, D.Gordon, R.K.Atukula, U.Lucking, T.Farnham, A.Kountouris " Requirements and Architecture of Management Functionality in Reconfigurable Equipment", in Proc. 2004 IST Mobile Summit, Lyon June 2004.
17. P.Demestichas, G.Dimitrakopoulos, J.Luo, R.Agusti, E.Mohyledin, O.Sallent, D.Grandblaise, R.Pintenet, P.Leaves, K.Moessner "Radio Resource Management and Network Planning in a Reconfigurability Context", in Proc. 2004 IST Mobile Summit, Lyon June 2004.
18. K. Moessner, G. Dimitrakopoulos, P. Demestichas, J. Luo, D. Grandblaise, O. Sallent, C. Kloeck, "Dynamic Resource Allocation Strategies and Time Scales", in Proc. SDR '05 Technical Conference, Anaheim, USA, November 2005.
19. J.Luo, C.Kloeck, G.Dimitrakopoulos, K.Moessner, D.Grandblaise, K.El-Khazen, D.Bourse, E.Mohyeldin, M.Dillinger,P.Demestichas, K.Tsagkaris, F.Capar, R.Agusti, O.Sallent, "Reconfigurability Facilitating Composite Radio", in Proc. SDR '04 Technical Conference and Product Exposition / 41st General Meeting, Phoenix, USA, November 2004.

20. P.Demestichas, T.Dodgson, D.Bourse, G.Dimitrakopoulos, V.Stavroulaki, "Issues in the introduction of Reconfigurability in B3G environments", in Proc. SDR '04 Technical Conference and Product Exposition / 41st General Meeting, Phoenix, USA, November 2004.
21. G. Dimitrakopoulos, Y. Kritikou, P. Demestichas, K. Tsagkaris, A. Saatsakis, K. Moessner, M. Muck, D. Bourse, "Management Mechanisms for Supporting Cognition in the Wireless, B3G World", in Proc. WWRF 18th meeting, Helsinki, June 2007.
22. Y. Kritikou, P. Demestichas, G. Dimitrakopoulos, F. Paraskeva, A. Kyriazis, M.Paradia and N. Mitsis, "Management Architecture for the Provision of e-Services in Cognitive Environments", In /Proc. of International Joint Conferences on Computer, Information, and Systems Sciences, and Engineering, International Conference on Engineering Education, Instructional Technology, Assessment, and E-learning, (CIS² E 06)/, December 4 - 14, 2006.
23. P. Demestichas, G. Dimitrakopoulos, K. Tsagkaris, A. Saatsakis, K. Moessner, J. Strassner, "From Reconfigurability Towards Cognition: Distributed, Policy-Based Selection of Reconfigurations", in Proc. WWRF 17th meeting, November 13-15, Heidelberg, Germany, November 13-15, 2006.
24. P.Demestichas, G.Dimitrakopoulos, K.Tsagkaris, K.Demestichas, J.Adamopoulou, J.Strassner, "Reconfiguration Discovery and Selection in the Context of Autonomic Management of Cognitive Wireless Infrastructures", in Proc. MACE conference (in the context of MANWEEK), Dublin, Ireland, October 2006.
25. G.Dimitrakopoulos, K.Tsagkaris, K.Demestichas, J.Adamopoulou, P.Demestichas, "Reconfigurations Selection in Cognitive, Beyond 3G, Radio Infrastructures", in Proc. 1st International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM 2006), Mykonos, Greece, June 2006.
26. G. Dimitrakopoulos, P. Demestichas, K. Tsagkaris, "Cognitive Networks Optimization In Computational Grid Environments", in Proc. WWRF 16th meeting, Shanghai, China, April 2006.
27. G. Dimitrakopoulos, C. Kloeck, P. Demestichas, K. Tsagkaris, K. Moessner, J. Luo, "Spectrum Management for B3G Infrastructures Operating in Adaptive Mode, in Proc. WSR' 06, Karlsruhe, Germany, March 2006.
28. G. Dimitrakopoulos, P. Demestichas, K. Tsagkaris, "Spectrum Management Methods for Adaptive Networks in High-Speed, B3G Infrastructures", in Proc. WWRF 15th meeting, Paris, France, December 8-9, 2005.
29. D. Grandblaise, K. Moessner, J. Luo, C. Kloeck, G. Dimitrakopoulos, J.L.Rodriguez, "Radio Resource Management for Reconfigurable Systems – An Overview of E2R Research Project Outcomes", in Proc. "Trends in Radio Resource Management" Workshop, Barcelona, November 2005.

30. C. Kloeck, I.Martoyo, D.Grandblaise, J.Luo, K.Moessner, O.Sallent, G.Dimitrakopoulos, P.Demestichas, "Functional Architecture of Reconfigurable systems", in Proc. WWRF 14th meeting, San Diego, USA, July 7th-8th, 2005.
31. G.Dimitrakopoulos, A.Alexiou, P.Demestichas, "Design and Management of Reconfigurable Networks: Smart Antennas Utilization", in Proc. WWRF 14th meeting, San Diego, USA, July 7th-8th, 2005.
32. K.Tsagkaris, G.Dimitrakopoulos, P.Demestichas, J.Luo, R.A.Jaoude, "Overview of Radio Network Reconfiguration Actions: Intra-RAT Reconfiguration Possibilities", in Proc. WWRF 14th meeting, San Diego, USA, July 7th-8th, 2005.
33. G.Dimitrakopoulos, P.Demestichas, "Spectrum Exchange in a Reconfigurable Radio Context", in Proc. WWRF 14th meeting, San Diego, USA, July 7th-8th, 2005.
34. G. Dimitrakopoulos, A. Katidiotis, P. Demestichas, J. Luo, R. A. Abou Jaoude, R. G. Perez, "Engineering Mechanisms for Planning a Reconfigurable Radio Network", in Proc. WWRF 13th meeting, Jeju Island, Korea, March 1st-2nd, 2005.
35. K.Tsagkaris, P.Demestichas, G.Dimitrakopoulos, A.Saatsakis, G.Vivier, d.Grandblaise, J.Luo, C.Kloeck, " Radio Access Technology Selection in an End-to-End Reconfigurability Context", in Proc. WWRF 12th meeting, Toronto, Canada, November 2004.
36. P.Demestichas, D.Grandblaise, J.Luo, R.G.Perez, G.Dimitrakopoulos, C.Kloeck, "Reconfigurable Networks Design – Requirements, Problems Description and Solution Methods", in Proc. E2R Workshop, Barcelona, Spain, September 2004.
37. G.Bravos, A.Kanatas, P.Demestichas, G.Dimitrakopoulos, "Energy Aware Wireless Sensor Networks Operating in an End-to-End Reconfigurability Context", in Proc. E2R Workshop, Barcelona, Spain, September 2004.
38. Demestichas P, Dimitrakopoulos G, Luo J, Sallent O, Agusti R, Perez R.G "Planning the reconfigurable Radio Network – Scenarios, Requirements and Methods", in Proc. WWRF 11th meeting, Oslo, June 2004.
39. Moessner K, Leaves P, Grandblaise D, Capar F, Mohyeldin E, Demestichas P, Dimitrakopoulos G, Luo J, Tafazolli R "Reconfiguration Techniques to Enhance Network Efficiency", in Proc. WSR 04, Karlsruhe, Germany, March 2004.
40. N. Alonistioti, A. Kaloxylou, P.Demestichas, G.Dimitrakopoulos, T. Wiebke, F. Berzosa, M. Dillinger "System and local level reconfigurability management and interactions", in Proc. WWRF 8bis, Beijing, February 2004.

41. L.Jijun, P.Demestichas, G.Dimitrakopoulos, M.Dillinger, K.Moessner, "Feasibility study of the dynamic network planning and management in an End to End Reconfiguration (E2R) context", in Proc. WWRF 8bis, Beijing, February 2004.
42. A.Kountouris, T.Wiebke, P.Demestichas, G.Dimitrakopoulos, "Equipment Management Concepts in Reconfigurable Networks", in Proc. WWRF 10th meeting, New York, October 2003.
43. M.Dillinger, E.Mohyeldin, P.Demestichas, G.Dimitrakopoulos, J.Luo, "Dynamic Network Planning and Functional Components supporting End to End Reconfigurability", in Proc. WWRF 10th meeting, New York, October 2003.
44. P.Demestichas, G.Dimitrakopoulos, G.Vivier, K.El Khazen, M.Theologou, "Wireless Systems' Management Concepts in Composite Reconfigurable Networks", in Proc. WWRF 10th meeting, New York, October 2003.
45. P.Demestichas, G.Dimitrakopoulos, G.Vivier, K.El Khazen, "Wireless Systems' Management Concepts in Composite Reconfigurable Networks", ANWIRE Workshop on Reconfigurability, Mykonos, Greece, September 2003.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ