

Ρύθμιση Ισχύος Εκπομπής Ασύρματων Τοπικών Δικτύων για Βελτιστοποίηση της Κοινωνικής Δικαιοσύνης

Ευάγγελος Γ. Δούρος, Γεώργιος Κ. Πολύζος

Εργαστήριο Ασύρματων Δικτύων και Πολυμεσικών Τηλεπικοινωνιών
Τμήμα Πληροφορικής, Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών
10434 Αθήνα

{douros06, polyzos}@aueb.gr

Περίληψη

Η ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων είναι περισσότερο εμφανής από ποτέ, ιδιαίτερα στα Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα (WLANs) τα οποία αναπτύσσονται «οργανικά», εξυπηρετώντας πλήθος χρηστών και χρησιμοποιώντας μη-αδειοδοτημένο (unlicensed) φάσμα. Ο αποτελεσματικός διαμοιρασμός του φάσματος (spectrum sharing) είναι ζήτημα κεφαλαιώδους σημασίας, δεδομένου ότι πρόκειται για πεπερασμένο πόρο. Η εύρεση όμως μη επικαλυπτόμενων καναλιών δεν είναι εύκολη—μάλλον ανέφικτη τις περισσότερες φορές λόγω των πολλών Access Points (APs) το ένα κοντά στο άλλο και της «οργανικής» τους ανάπτυξης. Η διαχείριση των παρεμβολών (interference management) είναι λοιπόν ζήτημα κεφαλαιώδους σημασίας. Εδώ προτείνουμε δύο μηχανισμούς οι οποίοι βασίζονται στην ταυτόχρονη και από κοινού μείωση της ισχύος εκπομπής όλων των APs που βρίσκονται στην ίδια γεωγραφική περιοχή και οδηγούν σε ένα αποτέλεσμα στο οποίο οι καταστάσεις των APs είναι όσο το δυνατόν περισσότερο αναλογικά κατανομημένες. Επιτυγχάνεται επομένως μια βελτιστοποίηση της κοινωνικής δικαιοσύνης (social fairness).

Κύρια Περιοχή Έρευνας: Δίκτυα Επικοινωνιών

Λέξεις Κλειδιά: Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα, Ρύθμιση Ισχύος Εκπομπής, Διαχείριση Παρεμβολών, Αναλογική Κατανομή Εσόδων.

1. Εισαγωγή

Η ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών και δικτύων είναι περισσότερο εμφανής από ποτέ. Χαρακτηριστικός εκπρόσωπος της εξέλιξης αυτής είναι δίχως άλλο η εγκαθίδρυση μιας πλειάδας ασύρματων τοπικών δικτύων (WLANs), τα οποία εμφανίζονται σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές (όπως αίθουσες κτιρίων,

αεροδρόμια, ξενοδοχεία), εξυπηρετώντας ένα πλήθος χρηστών. Βεβαίως, η διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση ασύρματων υπηρεσιών, υπαγορεύει την ανάγκη αποδοτικής χρήσης του φάσματος. Επομένως, είναι σαφές ότι ο διαμοιρασμός του φάσματος (spectrum sharing) είναι ζήτημα κεφαλαιώδους σημασίας, δεδομένου του πεπερασμένου μεγέθους αυτού του πόρου. Για το λόγο αυτό, υπάρχουν—σε κάθε χώρα—ανεξάρτητες αρχές (π.χ. FCC για τις Η.Π.Α., ΕΕΕΤ για την Ελλάδα), οι οποίες είναι επιφορτισμένες με την ευθύνη της κατανομής του φάσματος στη γεωγραφική τους περιοχή. Το φάσμα υποδιαιρείται σε σταθερού μεγέθους περιοχές συχνοτήτων (bands). Οι περιοχές αυτές χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις αδειοδοτημένες (licensed) και μη-αδειοδοτημένες (unlicensed) περιοχές φάσματος. Κυρίαρχο χαρακτηριστικό της πρώτης κατηγορίας είναι τα αποκλειστικά δικαιώματα χρήσης της περιοχής συχνοτήτων στους κατόχους της άδειας αυτής. Από την άλλη μεριά, η πρόσβαση στο unlicensed κομμάτι του φάσματος είναι ελεύθερη σε όποιον το επιθυμεί—αν και υφίστανται κάποιοι περιορισμοί χρήσης, όπως η υιοθέτηση τεχνικών διάχυσης φάσματος (spread spectrum)—γεγονός που δικαιολογεί την ευημερία των ασύρματων τεχνολογιών, όπως η δημοφιλής οικογένεια πρωτοκόλλων IEEE 802.11.

Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα είναι συνώνυμα με το πρωτόκολλο 802.11/ WiFi ([6],[7]). Τα πλέον χρησιμοποιούμενα πρότυπα είναι τα 802.11 b/g, τα οποία λειτουργούν ανάμεσα στα 2.4 GHz και 2.5 GHz. Η περιοχή αυτή συχνοτήτων χωρίζεται σε 14 κανάλια και χρησιμοποιείται η τεχνική spread spectrum για την αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου φάσματος. Το κανάλι 1 αντιστοιχεί στα 2.412 GHz, ενώ το τελευταίο κανάλι (κανάλι 14) έχει ανατεθεί στα 2.484 GHz. Επισημαίνεται ότι υπάρχει ένα κενό της τάξης των 5 MHz ανάμεσα σε κάθε κανάλι, για λόγους ασφαλείας. Η μετάδοση ενός σήματος σε ένα δίκτυο που έχει υιοθετήσει το πρότυπο 802.11 b/g, αντιστοιχεί σε ένα εύρος συχνοτήτων της τάξεως των 30 MHz. Ως εκ τούτου,

είναι προφανές ότι ένα σήμα στα δίκτυα αυτά *επικαλύπτει* αρκετά γειτονικά κανάλια.

Απόρροια της προηγούμενης ανάλυσης είναι ότι τα κανάλια που ανατίθενται σε σημεία πρόσβασης (APs) ασυρμάτων τοπικών δικτύων που ανήκουν στην ίδια γεωγραφική περιοχή πρέπει να *μην* είναι γειτονικά. Σε διαφορετική περίπτωση, θα παρατηρείται το φαινόμενο των *παρεμβολών* (interference), γεγονός που θα οδηγεί σε μείωση των επιδόσεων όλων των δικτύων που χρησιμοποιούν επικαλυπτόμενα κανάλια για τη μετάδοση των δεδομένων τους.

Βεβαίως, η εύρεση μη επικαλυπτόμενων καναλιών για ασύρματα τοπικά δίκτυα δεν είναι πάντοτε εφικτή (για την ακρίβεια, είναι μάλλον ανέφικτη τις περισσότερες φορές). Υπολογίζοντας αφενός το συνολικό διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων, αφετέρου το εύρος συχνοτήτων που αντιστοιχεί σε κάθε κανάλι και λαμβάνοντας υπ' όψιν το μέσο εύρος διάδοσης σήματος, είναι εύκολο να διαπιστώσουμε ότι δύο κανάλια είναι μη-επικαλυπτόμενα αν και μόνο αν διαχωρίζονται από *τουλάχιστον* 4 κανάλια [8]. Αν θέλαμε να εξετάσουμε τι συμβαίνει στην περίπτωση που είχαμε στη διάθεσή μας 3 APs και επιθυμούσαμε να τους αναθέσουμε μη-επικαλυπτόμενα κανάλια για τη μετάδοσή τους, θα διαπιστώναμε ότι υπάρχει *μία* μόνο τριπλέτα (κανάλι 1, κανάλι 6, κανάλι 11), η οποία ικανοποιεί την απαίτησή μας. Είναι προφανές ότι αν είχαμε στη διάθεσή μας περισσότερα των 3 APs, τότε θα ήταν *εξ* *ορισμού* αδύνατον να προχωρήσουμε σε ανάθεση μη-επικαλυπτόμενων καναλιών με βάση το πρότυπο 802.11.

Από την παραπάνω ανάλυση, εύκολα συνάγεται το συμπέρασμα ότι η *διαχείριση των παρεμβολών* (interference management) είναι ζήτημα κεφαλαιώδους σημασίας, πολλώ δε μάλλον όταν δεν μπορεί να εξαιρεθεί «εξ ορισμού». Προς την κατεύθυνση αυτή, έχουν προταθεί μια σειρά από λύσεις που ανήκουν στην ευρύτερη ερευνητική περιοχή της *ρύθμισης ισχύος για τον περιορισμό των παρεμβολών* ([1],[2]). Η γενική μοντελοποίηση των σεναρίων που μελετώνται περιλαμβάνει ένα σύνολο APs τα οποία μεταδίδουν στο ίδιο κανάλι συχνοτήτων, καθένα από τα οποία πρέπει να αποφασίσει την τιμή της ισχύος εκπομπής του. Είναι προφανές ότι η αναμενόμενη επιλογή θα είναι να εκπέμπει με τη *μέγιστη* δυνατή ισχύ εκπομπής. Αυτό οδηγεί στο όφελος ότι θα καλύπτει τη μέγιστη δυνατή γεωγραφική περιοχή (εφόσον η ακτίνα κάλυψης είναι ανάλογη της ισχύος εκπομπής), ως εκ τούτου θα εξυπηρετήσει τους περισσότερους δυνατούς χρήστες που μπορεί να καλύψει. Από την άλλη μεριά, υιοθετώντας αυτή την επιλογή, αφενός αυξάνονται σημαντικά τα λειτουργικά έξοδά του AP, αφετέρου αυξάνονται οι παρεμβολές που προκαλεί στα υπόλοιπα APs (αλλά και οι παρεμβολές που δέχεται, δεδομένου ότι αντίστοιχη επιλογή θα πραγματοποιήσουν και τα υπόλοιπα APs).

Κινούμενοι στο πλαίσιο της περιοχής αυτής, προτείνουμε δύο μηχανισμούς οι οποίοι προϋποθέτουν την *ταυτόχρονη και από κοινού μείωση* της ισχύος εκπομπής *όλων* των APs που βρίσκονται στην ίδια γεωγραφική περιοχή και οδηγούν σε αναλογικές κατανομές των εσόδων (ή των απωλειών από τα μέγιστα δυνατά έσοδα) για τους ιδιοκτήτες των APs. Επιτυγχάνεται επομένως μια *βελτιστοποίηση* της κοινωνικής δικαιοσύνης (social fairness).

Το υπόλοιπο κομμάτι της εργασίας οργανώνεται ως εξής: Στην ενότητα 2, παρουσιάζονται συναφείς ερευνητικές δραστηριότητες που εντάσσονται στην ευρύτερη περιοχή της ρύθμισης ισχύος. Στην ενότητα 3, σκιαγραφούνται τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά των προτεινόμενων μηχανισμών και αποτυπώνεται εποπτικά η λειτουργία τους. Στην ενότητα 4, ερμηνεύονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από την εφαρμογή των μηχανισμών και συγκρίνονται με την «καθεστηκιά» επιλογή, όπως αυτή εκφράζεται μέσω της εκπομπής όλων των APs στη μέγιστη ισχύ. Στην ενότητα 5, οριοθετούνται οι μελλοντικές επεκτάσεις και τα επόμενα βήματα της έρευνάς μας. Τέλος, στην ενότητα 6, προχωράμε σε μια σύνοψη της εργασίας, αποτιμώντας τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν.

2. Σχετικές Εργασίες

Στην ενότητα αυτή, θα παρουσιάσουμε κάποιες ενδιαφέρουσες εργασίες που σχετίζονται με την εφαρμογή power control για τον περιορισμό των παρεμβολών σε ασύρματα τοπικά δίκτυα.

Στο [1] παρουσιάζονται μέθοδοι βελτιστοποίησης για την αντιμετώπιση του φαινομένου των παρεμβολών μέσω power control. Ειδικότερα, χρησιμοποιείται ο Gibbs sampler για την προσέγγιση μιας βέλτιστης καθολικής λύσης (globally optimal solution) μέσω επίτευξης τοπικών βελτιστοποιήσεων (local optimizations).

Υπάρχουν αρκετές εργασίες που συνδυάζουν το power control με τη χρήση *θεωρίας παιγνίων* (Game Theory). Στο [2] χρησιμοποιείται συνεργατική θεωρία παιγνίων (cooperative game theory) για να αντιμετωπιστεί από κοινού το πρόβλημα της επιλογής καναλιού και power control σε cognitive radio networks [5]. Οι παίκτες (players) είναι cognitive radios και οι συναρτήσεις χρησιμότητας (utility functions) ορίζονται συναρτήσει των παρεμβολών που υφίστανται από τα υπόλοιπα APs που εκπέμπουν στο ίδιο κανάλι. Στο [4] οι παίκτες μπορούν να μεταδίδουν ταυτόχρονα σε πέραν του ενός κανάλια και οι συναρτήσεις χρησιμότητάς τους εξαρτώνται από το λόγο σήμα- προς- θόρυβο (SNR) που αντιλαμβάνονται. Πέρα από τη συνεργατική θεωρία παιγνίων, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η μη-συνεργατική θεωρία παιγνίων (non-cooperative game theory) έχει εφαρμοστεί σε ασύρματα τοπικά δίκτυα. Στο [3] αναπτύσσονται διάφορες στρατηγικές (πλήρης

συνεργασία, tit-for-tat) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα παίγνιο 2-παικτών για να επιτευχθεί η μεγιστοποίηση των συναρτήσεων χρησιμότητάς τους.

Τέλος, έχουν υπάρξει εργασίες σχετικές με την εφαρμογή της τεχνικής *cell breathing* (συρρίκνωση του μεγέθους ενός κελιού όταν παρουσιάζεται αυξημένος φόρτος σε αυτό) [10] στα ασύρματα τοπικά δίκτυα -η τεχνική αυτή έχει εφαρμοστεί επανειλημμένως σε κυβελωτά δίκτυα (cellular networks). Στόχος είναι ο συνδυασμός του cell breathing με το power control για την ανάπτυξη αλγορίθμων εξισορρόπησης φόρτου (load balancing) σε περιπτώσεις που προκύπτει σποραδική συμφόρηση (congestion) χρηστών σε ένα ασύρματο δίκτυο [9].

3. Προτεινόμενοι Μηχανισμοί

Στην ενότητα αυτή, θα παρουσιάσουμε τις προϋποθέσεις και τα δεδομένα που αντιστοιχούν στη μοντελοποίηση του προβλήματός μας και θα περιγράψουμε διεξοδικά τις τεχνικές που προτείνουμε.

3.1 Προϋποθέσεις Σεναρίων

Ας υποθέσουμε ότι σε κάποια περιοχή υπάρχουν M APs, τα οποία εξυπηρετούν τους N χρήστες που βρίσκονται εντός των γεωγραφικών ορίων της. Τα APs χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι (ή γειτονικά κανάλια), όπως αυτά είναι διαθέσιμα από το πρότυπο 802.11 b/g, γεγονός που συνεπάγεται ότι υπάρχουν χρήστες οι οποίοι υφίστανται παρεμβολές, εφόσον βρίσκονται στις επικαλυπτόμενες περιοχές κάλυψης των APs. Υποθέτουμε επίσης ότι καθένα από τα APs εκπέμπει αρχικά με τη μέγιστη δυνατή ισχύ, έστω P_{max} , που σημαίνει ότι καλύπτει τη μέγιστη δυνατή περιοχή (εφόσον η ακτίνα κάλυψης είναι η μέγιστη). Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι εξυπηρετεί τους πλέον απομακρυσμένους χρήστες που δύναται να καλύψει. Επιπλέον, θεωρούμε ότι οι τιμές που μπορεί να λάβει η ισχύς εκπομπής κάθε AP είναι διακριτές (discrete values). Τέλος, υποθέτουμε ότι κάθε AP ανήκει σε διαφορετικό ιδιοκτήτη.

Οι προσεγγίσεις που ακολουθούμε είναι *ap-κεντρικές*. Με άλλα λόγια, ενδιαφερόμαστε να μελετήσουμε και να εντοπίσουμε τις συνθήκες που πρέπει να συντρέχουν ώστε τα έσοδα των APs να αντιστοιχούν σε όσο το δυνατόν πιο δίκαιες (fair) καταστάσεις, στις οποίες τα ποσοστά των απωλειών από τα μέγιστα έσοδα των APs θα είναι όσο το δυνατόν περισσότερο ομοιόμορφα (αναλογικά) κατανομημένα. Για να συμβεί κάτι τέτοιο, είναι προφανές ότι τα APs θα πρέπει να προχωρήσουν σε μια μορφή «αγαστής συνεργασίας», όπου ο όρος αυτός αντιστοιχεί στην οικοδόμηση πλήρους εμπιστοσύνης μεταξύ όλων των APs, όπως αυτή εκφράζεται μέσω της απαρέγκλιτης εφαρμογής των αλγορίθμων, οι οποίοι

σκιαγραφούνται στις επόμενες παραγράφους. Φυσικά, θεωρούμε ότι κάθε AP ανακοινώνει με ακρίβεια τα έσοδα που αντιστοιχούν σε κάθε τιμή της ισχύος εκπομπής του.

3.2 Υπολογισμός Εσόδων APs

Έστω λοιπόν ότι καθένας από τους N χρήστες έχει συνδεθεί σε κάποιο από τα M APs, τα οποία εκπέμπουν στη μέγιστη ισχύ (ισοδύναμα, χρησιμοποιούν τη μέγιστη δυνατή ακτίνα κάλυψης).

Την ίδια χρονική στιγμή, όλα τα APs μειώνουν την ισχύ εκπομπής τους κατά μια σταθερή ποσότητα (ή ένα σταθερό ποσοστό), εφαρμόζοντας ρύθμιση ισχύος. Τα APs θεωρούνται ότι είναι πλήρως συγχρονισμένα, ως εκ τούτου η προηγούμενη απαίτηση είναι εφικτή (αρκεί απλώς η ανταλλαγή ενός μηνύματος σηματοδότησης στο δίκτυο). Στη νέα κατάσταση, είναι πιθανό να υπάρξουν μεταβολές για τους χρήστες ως εξής:

i) Ο χρήστης να μην ανήκει πλέον στην περιοχή κάλυψης του AP με το οποίο ήταν συνδεδεμένος. Ως εκ τούτου, πρέπει να συνδεθεί με κάποιο από τα υπόλοιπα APs, εφόσον ανήκει στην περιοχή κάλυψης έστω ενός εξ αυτών. Σε διαφορετική περίπτωση, ο χρήστης δε θα μπορεί να εξυπηρετηθεί από τα υπάρχοντα APs.

ii) Ο χρήστης να ανήκει σε περιοχή όπου δέχονταν παρεμβολές από ένα ή περισσότερα APs και με την ταυτόχρονη μείωση των ακτινών κάλυψης όλων των APs να δέχεται πλέον παρεμβολές από λιγότερα (και στην ιδανική περίπτωση από κανένα) από αυτά.

Στη νέα κατάσταση και μετά από αυτές τις πιθανές μεταβολές στους χρήστες, τα APs πρέπει να υπολογίσουν τα έσοδά τους και να τα συγκρίνουν με αυτά της αρχικής κατάστασης. Για να συμβεί αυτό, θα πρέπει να αθροίσουν τα έσοδα που αντιστοιχούν σε κάθε χρήστη που εξυπηρετούν. Ορίζουμε ότι η συνάρτηση εσόδων $C_{i,k}$ για έναν χρήστη i που είναι συνδεδεμένος με το AP k , είναι ανάλογη της ποσότητας $u_{i,k}(d)$ που ορίζεται από την (3.1):

$$u_{i,k}(d) = \begin{cases} \frac{c}{d_{i,k}}, & \text{ι δε δέχεται παρεμβολές} \\ \frac{c}{d_{i,k}} - \sum_{j \neq k} \frac{c}{d_{i,j}}, & \text{ι δέχεται παρεμβολές} \end{cases} \quad (3.1)$$

όπου c μια σταθερά, ενώ η ποσότητα $d_{i,j}$ εκφράζει την ευκλείδεια απόσταση ανάμεσα σε έναν χρήστη i και σε ένα AP j με το οποίο μπορεί δυνητικά να συνδεθεί (είτε είναι συνδεδεμένος με το AP, είτε δέχεται παρεμβολές από αυτό) και ορίζεται συναρτήσει των συντεταγμένων (x_i, y_i) του χρήστη και του AP (x_j, y_j) με τη βοήθεια της εξίσωσης (3.2).

$$d_{i,j} = \begin{cases} \infty, & i \notin \text{περιοχή κάλυψης } j \\ \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, & i \in \text{περιοχή κάλυψης } j \end{cases} \quad (3.2)$$

Αφορμή για τον ορισμό των εξισώσεων (3.1) και (3.2) υπήρξε η συσχέτιση των εσόδων των APs με το συνολικό λόγο σήματος-προς-θόρυβο (SNR) όλων των χρηστών που εξυπηρετούν και η αντιστρόφως ανάλογη εξάρτηση του μεγέθους αυτού με την απόσταση, όπως αυτή ορίζεται από τη (3.2).

Ο στόχος επομένως για κάθε AP k , είναι ο υπολογισμός της ποσότητας C_k η οποία ορίζεται με τη βοήθεια της (3.3) ως

$$C_k = \sum_{i=1}^{N_k} C_{i,k} \quad (3.3)$$

όπου το όριο N_k αντιστοιχεί στο πλήθος των χρηστών που έχουν συνδεθεί στο AP k .

3.3 Αλγόριθμος Εύρεσης 1^{ου} Τοπικού Μεγίστου (First Max)

Ακολουθεί η περιγραφή του αλγορίθμου: Άπαξ και κάθε AP υπολογίσει τα συνολικά του έσοδα, όπως ορίζονται από την ποσότητα (3.3), αρκεί να τα συγκρίνει με την αντίστοιχη συνάρτηση εσόδων στο προηγούμενο βήμα του αλγορίθμου. Αν τα έσοδά του είναι περισσότερα ή ίσα από αυτά που αντιστοιχούσαν στην προηγούμενη κατάσταση, τότε το AP ήταν *ωφελημένο* από τη μείωση της ισχύος του (είναι ωφελημένο ακόμη και στην ισότητα γιατί μειώνοντας την ισχύ εκπομπής, έχει μειώσει και τα λειτουργικά του έξοδα). Αν τα έσοδα για καθένα από τα M APs είναι μεγαλύτερα ή ίσα σε σχέση με αυτά της προηγούμενης κατάστασης, τότε ο αλγόριθμος συνεχίζεται μειώνοντας ξανά την ισχύ κατά την ίδια ποσότητα (ή ποσοστό). Την πρώτη φορά που για ένα τουλάχιστον από τα APs θα μειωθούν τα έσοδά του, η διαδικασία θα τερματιστεί («Πρώτη Μη Αποδεκτή Κατάσταση») και θα επανέλθουν στην τελευταία αποδεκτή κατάσταση (δηλ. στην προηγούμενη κατάσταση) από όλα τα APs.

Είναι προφανές ότι ο αλγόριθμος First Max αντιστοιχεί στην εύρεση του πρώτου σημείου που τα έσοδα ενός AP παρουσιάζουν τοπικό μέγιστο. Αυτό συμβαίνει γιατί στην επόμενη τιμή της ισχύος εκπομπής, τα έσοδά του είναι μειωμένα σε σχέση με πριν.

3.4 Αλγόριθμος Εύρεσης του Καλύτερου Μεγίστου (Best Max)

Ο αλγόριθμος Best Max προσπαθεί να εντοπίσει μια καλύτερη κατανομή εσόδων για τα APs. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, χρειάζεται να τροποποιηθεί η *συνθήκη διακοπής* του αλγορίθμου ως εξής: Αντί να ολοκληρώνεται την πρώτη φορά που τα έσοδα ενός AP μειωθούν, να συνεχίζεται μέχρι το σημείο που τα έσοδα όλων των APs αποκλείεται να αυξηθούν περαιτέρω. Η κατάσταση αυτή αντιστοιχεί σε εκείνη την τιμή ισχύος εκπομπής για όλα τα APs για την οποία κανένας από τους

χρήστες που έχουν συνδεθεί σε αυτά δεν υφίσταται παρεμβολές από κάποιο AP. Από το σημείο αυτό και μετά, περαιτέρω μείωση της ισχύος εκπομπής δεν είναι δυνατό να οδηγήσει σε αύξηση των εσόδων των APs, αφενός γιατί αποκλείεται να μπορέσουν να αποκτήσουν κάποιον επιπλέον χρήστη (εφόσον δεν ανήκει στην περιοχή κάλυψής τους –αν άνηκε θα του προκαλούσαν παρεμβολές), αφετέρου γιατί δεν υπάρχει η δυνατότητα να αυξήσουν τα έσοδά τους από τους υπάρχοντες τους χρήστες (επειδή κανένας από αυτούς δε δέχεται παρεμβολές από κάποιο AP που θα μπορούσαν να εξαλειφθούν με πιθανή μείωση της ισχύος εκπομπής).

Στη συνέχεια, ακολουθείται η εξής διαδικασία:

α) Από το σύνολο των δυνατών καταστάσεων ταυτόχρονης ισχύος εκπομπής όλων των APs, κάθε AP υπολογίζει εκείνη την κατάσταση που *μεγιστοποιεί* τα έσοδά του, ανεξαρτήτως των εσόδων που αντιστοιχούν στα υπόλοιπα APs.

β) Εντοπίζεται εκείνη η τιμή ισχύος εκπομπής, για την οποία το *άθροισμα των ποσοστιαίων απωλειών* που έχουν τα APs από τις μέγιστες τιμές των εσόδων τους είναι το *ελάχιστο*.

Με άλλα λόγια, ο αλγόριθμος προσπαθεί να καταναείμει τις ποσοστιαίες απώλειες των εσόδων των APs από τις μέγιστες δυνατές τιμές τους ώστε αυτές να είναι αθροιστικά οι ελάχιστες δυνατές.

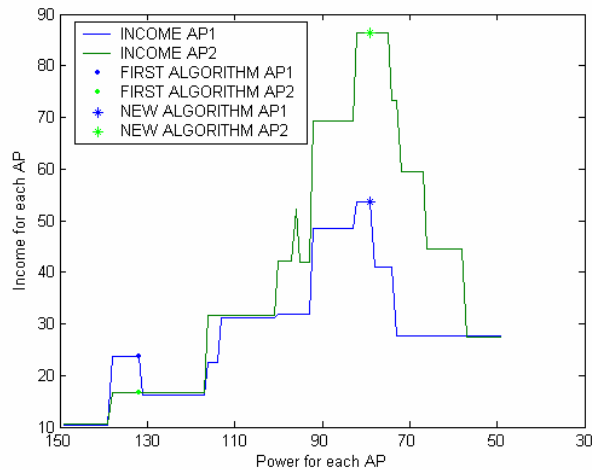
Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι στην περίπτωση κατά την οποία τα ολικά μέγιστα όλων των APs της τοπολογίας αντιστοιχούν στην ίδια τιμή της ισχύος εκπομπής, τότε οι αθροιστικές ποσοστιαίες απώλειες είναι 0%. Σε αυτή την περίπτωση, η εφικτή λύση που προκύπτει από τον αλγόριθμο συμπίπτει με τη θεωρητικά βέλτιστη λύση που αντιστοιχεί στην εξιδανικευμένη κατάσταση όπου τα έσοδα των APs μεγιστοποιούνται στην ίδια τιμή της ισχύος εκπομπής (που αποτελεί το κριτήριο για την εύρεση της λύσης του αλγορίθμου).

3.5 Σύγκριση Εσόδων Αλγορίθμων First Max και Best Max

Στην ενότητα αυτή θα εξετάσουμε εποπτικά τα έσοδα που αντιστοιχούν στα APs μετά την εφαρμογή των αλγορίθμων First Max και Best Max και θα προσπαθήσουμε να δικαιολογήσουμε με τη βοήθεια διαγραμμάτων τις επιδόσεις τους.

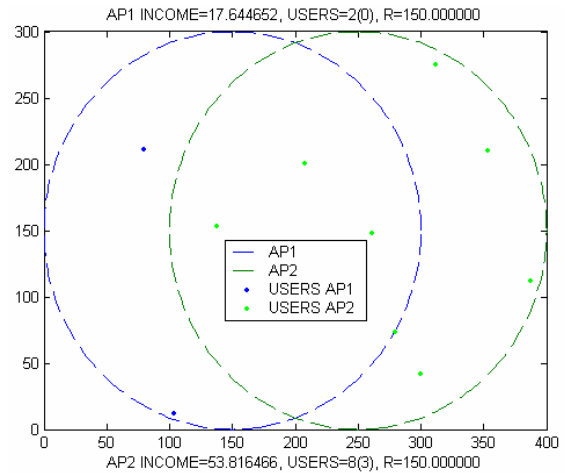
Η εικόνα 3.1 αντιστοιχεί στη γραφική παράσταση των εσόδων 2 APs. Έχουν σημειωθεί οι τιμές της ισχύος εκπομπής τις οποίες επιλέγουν οι αλγόριθμοι First Max και Best Max. Παρατηρώντας την εικόνα 3.1, διαπιστώνουμε ότι ο αλγόριθμος First Max σταμάτησε σε αρκετά αρχικό σημείο (απόρροια της εύρεσης του 1^{ου} τοπικού μεγίστου για τα έσοδα του AP₁). Το γεγονός αυτό, οδήγησε σε αρκετά χαμηλά έσοδα για τα 2 APs (περί τα 20\$). Όπως είναι προφανές από το διάγραμμα, υπάρχουν μια πλειάδα καλύτερων σημείων (δηλ. τιμών

της ισχύος εκπομπής) στις οποίες τα έσοδα των 2 APs είναι σημαντικά καλύτερα. Από την άλλη μεριά, η εφαρμογή του αλγορίθμου Best Max οδηγεί σε μια λύση που αντιστοιχεί στη *μεγιστοποίηση* των εσόδων και των 2 APs, εφόσον τυγχάνει να συμπίπτει η τιμή της ισχύος εκπομπής για την οποία μεγιστοποιούνται τα έσοδά τους. Φυσικά, αυτή η περίπτωση δεν είναι πάντα ο κανόνας, οπότε ο Best Max θα έβρισκε -απλώς- τη λύση που ελαχιστοποιεί (αλλά όχι μηδενίζει) τις αθροιστικές ποσοστιαίες απώλειες από τα μέγιστα έσοδα των 2 APs.

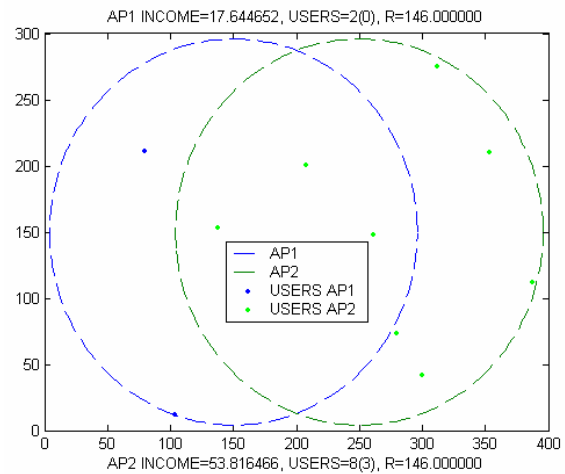


Εικόνα 3.1: Σύγκριση Εσόδων APs

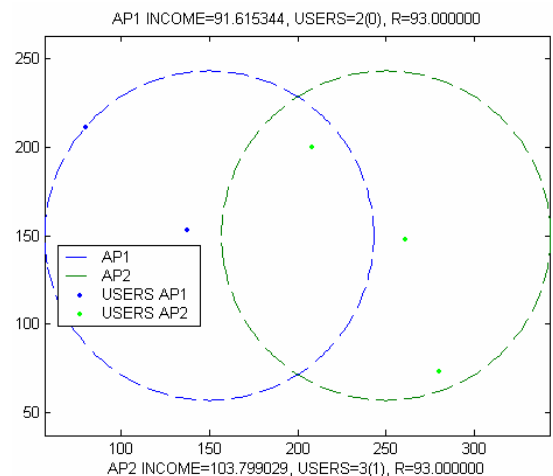
Ας προσπαθήσουμε τώρα, με τη βοήθεια των εικόνων 3.2-3.5, να ερμηνεύσουμε τις διαφορετικές τιμές στα έσοδα στις οποίες καταλήγουν οι αλγόριθμοι First Max και Best Max. Στην εικόνα 3.2 παρουσιάζονται τα αρχικά έσοδα των APs, όπως αυτά προκύπτουν μετά την εκπομπή όλων με τη μέγιστη δυνατή ισχύ. Στην εικόνα 3.3, αποτυπώνονται οι θέσεις των χρηστών και τα έσοδα των APs μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου First Max. Συγκρίνοντας τις συνοδευτικές ετικέτες στις δύο εικόνες, διαπιστώνουμε ότι συμπίπτουν σχεδόν πλήρως. Η μόνη διαφορά έγκειται στην ακτίνα κάλυψης των APs που είναι πλέον 146m (έναντι 150m που ήταν στην αρχική κατάσταση). Αυτό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος First Max δεν οδήγησε σε καλύτερα αποτελέσματα από την εκπομπή όλων στο Pmax (απλώς προσέφερε μερική μείωση των λειτουργικών εξόδων, απόρροια της μείωσης της ισχύος εκπομπής για κάθε AP). Ο λόγος για τον οποίο στο σημείο αυτό αντιστοιχεί *τοπικό* μέγιστο (ως εκ τούτου οδηγεί στη διακοπή του αλγορίθμου) είναι επειδή ο κάτω αριστερά χρήστης του AP₁ βρίσκεται πλέον στα όρια της περιοχής κάλυψης και στο επόμενο βήμα του αλγορίθμου δε θα μπορεί να εξυπηρετηθεί από το AP₁, χωρίς -ταυτόχρονα- να προκύψει κάποια βελτίωση των εσόδων του μέσω απόκτησης κάποιου καινούργιου χρήστη ή εξάλειψη των παρεμβολών για κάποιον από τους ήδη υπάρχοντες. Ως εκ τούτου, *σίγουρα* θα μειωθούν τα έσοδά του.



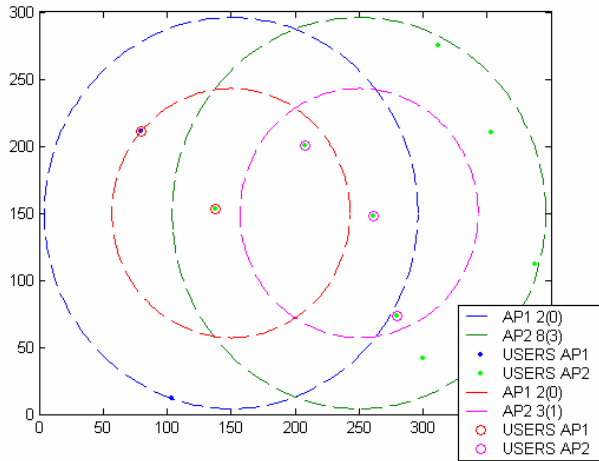
Εικόνα 3.2: Αλγόριθμος Pmax



Εικόνα 3.3: Αλγόριθμος First Max



Εικόνα 3.4: Αλγόριθμος Best Max



Εικόνα 3.5: Αλγόριθμοι First Max και Best Max

Στην εικόνα 3.4, αποτυπώνονται οι θέσεις των χρηστών και τα έσοδα των APs μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου Best Max. Παρατηρούμε ότι τα έσοδα για το AP₁ έχουν αυξηθεί από 17\$ σε 91\$ ενώ του AP₂ από 53\$ σε 103\$. Επιπλέον, διαπιστώνουμε ότι οι χρήστες που εξυπηρετούνται από τα 2 APs έχουν πλέον μειωθεί σημαντικά (από 10 που ήταν στις προηγούμενες καταστάσεις, έχουν μείνει μόνο 5). Το ερώτημα που γεννιέται είναι αν και πώς δικαιολογείται το «οξύμωρο σχήμα» η μείωση των χρηστών να συνεπάγεται σημαντική αύξηση των εσόδων και των 2 APs.

Για να απαντήσουμε στο ερώτημα αυτό, πρέπει να τοποθετήσουμε τις εικόνες 3.3 και 3.4, στο ίδιο διάγραμμα (εικόνα 3.5). Στο διάγραμμα αυτό, οι δύο μεγάλοι κύκλοι (ο μπλε και ο πράσινος) αντιστοιχούν στα AP₁ και AP₂ αντίστοιχα, μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου First Max. Με τα ίδια χρώματα συμβολίζονται και οι χρήστες που έχουν συνδεθεί σε αυτά. Με τον ίδιο τρόπο, αλλά με τα χρώματα κόκκινο και ροζ, συμβολίζονται τα APs και οι χρήστες που έχουν συνδεθεί στα AP₁ και AP₂ μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου Best Max.

Σε σχέση με το AP₁, παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος Best Max έχει διαφοροποιηθεί από τον αλγόριθμο First Max κατά ένα χρήστη. Ο νέος χρήστης στον Best Max βρίσκεται πολύ κοντά στο κέντρο του AP₁ και επιπλέον δε δέχεται παρεμβολές από το AP₂ (ροζ κύκλος). Ως εκ τούτου, και βάσει των εξισώσεων (3.1) και (3.2) -που ορίστηκαν στο εδάφιο 3.2- διαπιστώνουμε ότι αποφέρει σημαντικά περισσότερα έσοδα από το χρήστη που βρίσκονταν στα όρια της περιοχής κάλυψής του, μετά την εφαρμογή του First Max (μπλε κύκλος, κάτω αριστερά χρήστης).

Σε σχέση με το AP₂, παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος Best Max έχει διαφοροποιηθεί από τον αλγόριθμο First Max κατά πέντε χρήστες. Πρόκειται για τους χρήστες που συμβολίζονται με κουκκίδες πράσινου χρώματος χωρίς όμως να βρίσκονται στο εσωτερικό ροζ μικρών κύκλων.

Παρατηρούμε ότι οι χρήστες αυτοί είναι αρκετά μακριά από το κέντρο του AP₂, ως εκ τούτου δεν προσέφεραν σημαντικά έσοδα σε αυτό, κατά την εφαρμογή του First Max. Το όφελος που έχει το AP₂ με τη χρήση του Best Max είναι ότι οι δύο δεξιότεροι χρήστες του, δε δέχονται πλέον παρεμβολές από το AP₁ (κόκκινος κύκλος). Συνεπώς, το γεγονός ότι μπορεί πλέον να εξυπηρετεί δύο χρήστες που βρίσκονται κοντά σε αυτό χωρίς να δέχονται παρεμβολές, είναι οικονομικά επικερδέστερο από το να εξυπηρετεί 5 επιπλέον χρήστες που βρίσκονται μακριά από αυτό χωρίς να δέχονται παρεμβολές ενώ ταυτόχρονα οι 2 πλέον κοντινοί του χρήστες να δέχονται παρεμβολές (περίπτωση εφαρμογής του First Max).

Από όλα τα παραπάνω, καθίσταται σαφές ότι ο στόχος για τα APs είναι να εξυπηρετούν καλύτερα (δηλ. με το να δέχονται λιγότερες ή καθόλου παρεμβολές) τους χρήστες που βρίσκονται πιο κοντά σε αυτά, παρά να εξυπηρετούν περισσότερους χρήστες αλλά να υφίστανται παρεμβολές εκείνοι που μπορούν να τους αποφέρουν μεγαλύτερα έσοδα. Επιπλέον, είναι προφανές ότι τα APs (και πιο συγκεκριμένα οι ιδιοκτήτες τους) δε χρειάζεται να «φοβηθούν» από πρόσκαιρη μείωση των εσόδων τους όσο μειώνεται η ισχύς εκπομπής τους. Αποδεικνύεται ότι η μείωση αυτή λειτουργεί προς όφελός τους, εφόσον μπορούν να αυξήσουν σημαντικά τα έσοδά τους εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο Best Max.

4. Πειράματα- Αποτίμηση Αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή, θα παρουσιάσουμε και θα σχολιάσουμε τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από τις προσομοιώσεις που διεξήχθησαν για την αποτίμηση της επίδοσης των προτεινόμενων σχημάτων.

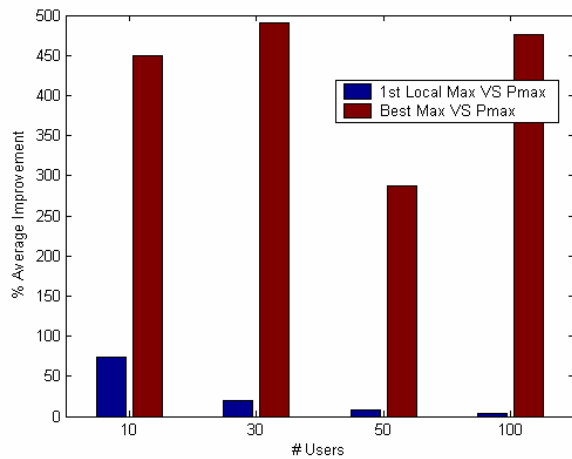
4.1 Περιγραφή Σcenarίων

Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για 2 και 3 APs. Η τοπολογία των 2 APs χρησιμοποίησε τα AP₁ και AP₂, τα κέντρα των οποίων βρίσκονται στην ίδια ευθεία και έχουν την ίδια ακτίνα κάλυψης. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε τοπολογία 3 APs, οι συντεταγμένες των οποίων σχηματίζουν ένα ισόπλευρο τρίγωνο στη γεωγραφική περιοχή που καλύπτουν. Οι χρήστες (στα πλαίσια της προσομοίωσης ήταν 10 ή 30 ή 50 ή 100) τοποθετούνταν στο χώρο, ακολουθώντας ομοιόμορφη κατανομή. Η κινητικότητα των χρηστών θεωρείται περιορισμένη κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των προσομοιώσεων, ακολουθώντας το πρότυπο quasi-static, σύμφωνα με το οποίο οι χρήστες κινούνται ελεύθερα, αλλά ως επί το πλείστον τείνουν να παραμένουν σε μια περιοχή για μεγάλα χρονικά διαστήματα [11]. Η υπόθεση αυτή είναι συμβατή με προηγούμενες μελέτες σχετικές με την κινητικότητα των χρηστών σε ασύρματα δίκτυα [12]. Επίσης, υποθέτουμε ότι δεν υπάρχουν αφίξεις ή εθελοντικές αποχωρήσεις χρηστών κατά τη διάρκεια της

εκτέλεσης των πειραμάτων. Με άλλα λόγια, όλοι οι χρήστες εμφανίζονται την ίδια χρονική στιγμή στην τοπολογία (στιγμή έναρξης του αλγορίθμου), ενώ εξυπηρετούνται για όσο χρονικό διάστημα ανήκουν στην περιοχή κάλυψης ενός έστω AP. Τα προγραμματιστικά περιβάλλοντα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η γλώσσα C και το Matlab. Για καθέναν από τους δυνατούς συνδυασμούς πλήθους APs (2 ή 3) και πλήθους χρηστών (10,30,50,100) που υλοποιήθηκαν, διεξήχθησαν 10000 προσομοιώσεις. Τέλος, η σταθερά c που ορίστηκε στην εξίσωση (3.1) είχε την τιμή 1000.

4.2 Μέση % Βελτίωση Επιδόσεων First Max vs Pmax, Best Max vs Pmax

Με τη βοήθεια των εικόνων 4.1 και 4.2, θα συγκρίνουμε τις μέσες ποσοστιαίες βελτιώσεις που προκύπτουν αν εφαρμόσουμε τους αλγορίθμους First Max και Best Max αντί της εκπομπής όλων των APs στη μέγιστη δυνατή ισχύ. Διαπιστώνουμε ότι, στα 2 APs, ο αλγόριθμος Best Max οδηγεί σε σημαντικά μεγαλύτερα έσοδα από τον Pmax, εφόσον τα έσοδα κάθε AP αυξάνονται κατά μέσο όρο από 300% έως 500% (ανάλογα με το πλήθος χρηστών που υπάρχουν στην τοπολογία)!. Από την άλλη μεριά, η μέση ποσοστιαία αύξηση ανά AP μετά την εφαρμογή του First Max είναι πολύ μικρότερη (10% με 70%) και επιπλέον είναι αξιόλογη μόνο στην περίπτωση που το πλήθος χρηστών της τοπολογίας είναι 10.

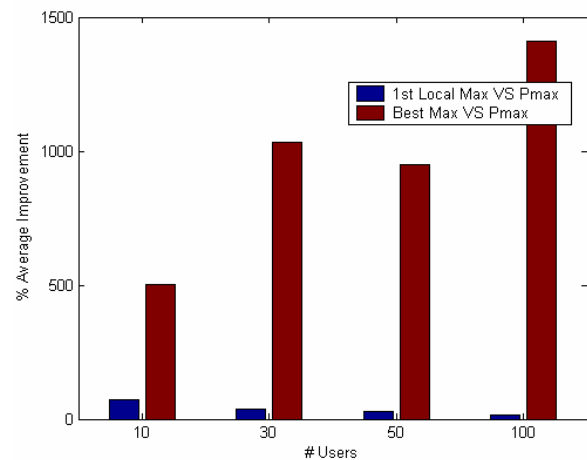


Εικόνα 4.1: Μέση % Βελτίωση των Αλγορίθμων στα 2 APs

Αντιστοίχως, όταν η τοπολογία αποτελείται από 3 APs, ο αλγόριθμος Best Max οδηγεί σε ακόμη μεγαλύτερα έσοδα από τον Pmax, εφόσον τα έσοδα κάθε AP αυξάνονται κατά μέσο όρο από 500% έως 1400% (ανάλογα με το πλήθος χρηστών που υπάρχουν στην τοπολογία)!. Από την άλλη μεριά, η μέση ποσοστιαία αύξηση ανά AP μετά την εφαρμογή του First Max είναι

πολύ μικρότερη (10% με 70%) και επιπλέον είναι αξιόλογη μόνο στην περίπτωση που το πλήθος χρηστών της τοπολογίας είναι 10. Συγκρίνοντας τις δύο εικόνες, είναι σαφής η συντριπτική υπεροχή του αλγορίθμου Best Max έναντι του First Max, επιβεβαιώνοντας τις παρατηρήσεις στις οποίες είχαμε προχωρήσει στην προηγούμενη ενότητα, για τα οφέλη που προκύπτουν από την υιοθέτησή του. Επιπλέον, διαπιστώνουμε ότι οι επιδόσεις του αλγορίθμου Best Max έχουν βελτιωθεί ακόμη περισσότερο στα 3 APs, ενώ αυτές του First Max είναι παραπλήσιες.

Επισημαίνουμε τέλος ότι οι επιδόσεις του αλγορίθμου Best Max χαρακτηρίζονται από μεγάλη πιθανότητα τα έσοδα όλων των ιδιοκτητών των APs να αυξηθούν τουλάχιστον κατά 50%, καθώς και να αυξηθούν τουλάχιστον κατά 100%. Τα συμπεράσματα αυτά, που προέκυψαν από κατάλληλη στατιστική ανάλυση των επιδόσεων των αλγορίθμων (και δεν παρατίθενται λόγω έλλειψης χώρου), ισχύουν σε μεγάλο βαθμό για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς APs και χρηστών, αποδεικνύοντας ότι η σημαντική μέση ποσοστιαία βελτίωση των εσόδων των APs που παρουσιάστηκε στις εικόνες 4.1 και 4.2 είναι μια καλή προσέγγιση των επιδόσεών του, με την έννοια του ότι δεν είναι ένα συγκυριακό αποτέλεσμα (απόρροια πολύ καλών επιδόσεων που συμβαίνουν σπάνια), αλλά ο κανόνας.



Εικόνα 4.2: Μέση % Βελτίωση των Αλγορίθμων στα 3 APs

5. Συζήτηση- Μελλοντική Έρευνα

Στο εδάφιο αυτό, θα σκιαγραφήσουμε τα επόμενα βήματα της ερευνητικής μας δραστηριότητας. Καταρχήν, επιθυμούμε να εφαρμόσουμε το μοντέλο μας σε τοπολογίες όπου οι χρήστες θα είναι –σε μεγαλύτερο βαθμό– κινητοί (mobile). Σε αυτή την περίπτωση, κλιμακώνοντας το βαθμό κινητικότητας, θα εξετάσουμε τα αποτελέσματα που προκύπτουν στις υπάρχουσες τοπολογίες. Επίσης, είναι σε εξέλιξη ο σχεδιασμός

συστημάτων *εισροής χρηστών* (ή και APs) σε διάφορες χρονικές στιγμές της προσομοίωσης (και όχι μόνο στην αρχή της διαδικασίας). Με αυτό τον τρόπο, θα προχωρήσουμε στην αποτίμηση ακόμη πιο ρεαλιστικών σεναρίων. Είναι στις προθέσεις μας να εφαρμόσουμε τα παραπάνω προσομοιώνοντας διάφορες κατανομές χρηστών (πέραν της ομοιόμορφης κατανομής). Τέλος, εξετάζονται εναλλακτικές μετρικές για να συσχετιστούν με τα έσοδα των APs και να συγκριθούν τα αποτελέσματά τους με την υπάρχουσα θεώρηση – εξίσωση (3.1).

Σε επόμενο στάδιο της έρευνάς μας, θα ασχοληθούμε με το ακόλουθο σενάριο: Αντί σε κάθε βήμα του αλγορίθμου να μειώνουν την ισχύ εκπομπής τους *όλα* τα APs, να δίνεται η δυνατότητα ύπαρξης κάποιας μορφής *διαπραγμάτευσης* (bargaining). Η διαπραγμάτευση αυτή θα περιλαμβάνει τη δυνατότητα ένα AP να προσφέρει κάποιους χρήστες σε ένα άλλο AP (πιθανότατα αυτούς που βρίσκονται στα όρια της περιοχής κάλυψής του) ή/και χρήματα, με αντάλλαγμα ότι το άλλο AP θα μειώσει την ισχύ του (ώστε να μειωθούν/ μηδενιστούν οι παρεμβολές σε κάποιους χρήστες του) και να αυξηθούν τα έσοδά του. Είναι προφανές ότι αναγκαία συνθήκη για να συμβούν τα παραπάνω, είναι η τελική κατάσταση που θα οδηγηθούν τα APs (αν αποδέχονταν τη διαπραγμάτευση) να είναι τουλάχιστον εξίσου οικονομικά συμφέρουσα με την τρέχουσα κατάσταση τους.

Τέλος, σκοπεύουμε να «χαλαρώσουμε» την απαίτηση που διατυπώσαμε περί *απαρέγκλιτης* εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας από *όλα* τα APs. Επιθυμούμε να εξετάσουμε τι θα συμβεί σε περιπτώσεις που κάποια APs παρεκκλίνουν από τον προτεινόμενο μηχανισμό, μειώνοντας λιγότερο από το συμφωνημένο την ισχύ εκπομπής τους σε κάποιον από τους γύρους του αλγορίθμου, ακόμη-ακόμη και διατηρώντας τη σταθερή ή αυξάνοντάς τη.

6. Σύνοψη

Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν η παρουσίαση δύο μηχανισμών *ρύθμισης ισχύος εκπομπής* με στόχο την αναλογική κατανομή των εσόδων όλων των APs που συνυπάρχουν σε μια τοπολογία. Αφού σκιαγραφήθηκαν και αναλύθηκαν τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά των μηχανισμών και οι προϋποθέσεις για την εφαρμογή τους, παρουσιάστηκαν μια σειρά από συμπεράσματα, όπως αυτά προέκυψαν από την ανάλυση συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων που περιλάμβαναν στοιχεία από προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν για την αποτίμηση της επίδοσής τους. Τα συμπεράσματα έδειξαν μια *αναμφισβήτητη* υπεροχή των προτεινόμενων μηχανισμών (ιδίως του αλγορίθμου Best Max) έναντι της «εγωιστικής» προσέγγισης, όπως αυτή εκφράζεται μέσω της εκπομπής κάθε AP στη μέγιστη δυνατή ισχύ,

αποδεικνύοντας ότι εφόσον τα APs συνεργαστούν (δηλ. ακολουθήσουν πιστά τα προτεινόμενα σχήματα) θα επωφεληθούν αφενός από την αύξηση των εσόδων τους, αφετέρου από τη μείωση των λειτουργικών τους εξόδων.

7. Βιβλιογραφία

- [1] Mhatre, V. P.; Papagiannaki, K.; Baccelli, F., "Interference Mitigation Through Power Control in High Density 802.11 WLANs," Proc. 26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007), pp. 535-543, May 2007.
- [2] Nie, N.; Comaniciu, C.; Agrawal, P., "A Game Theoretic Approach to Interference Management in Cognitive Networks," IMA Volumes of Mathematics and its Applications, Springer 2006.
- [3] Berlemann, L.; Hiertz, G.R.; Walke, B.; Mangold, S., "Strategies for distributed QoS support in radio spectrum sharing," Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC'05), pp. 3271-3277, May 2005.
- [4] Suris, J. E.; DaSilva, L. A.; Han, Z.; MacKenzie, A. B., "Cooperative Game Theory for Distributed Spectrum Sharing," Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC'07), pp. 5282-5287, June 2007.
- [5] Mitola, J., III; Maguire, G.Q., Jr., "Cognitive radio: making software radios more personal," *IEEE Personal Communications*, vol.6, no.4, pp.13-18, Aug 1999.
- [6] IEEE, "Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications - Amendment 2: Higher speed physical layer (PHY) extension in the 2.4 GHz band," IEEE Standard 802.11b, 1999.
- [7] IEEE, "Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications - Amendment 4: Further higher-speed physical layer extension in the 2.4 GHz band," IEEE Standard 802.11g, 2003.
- [8] Kurose, J.; Ross, K., *Computer Networking: A Top-Down Approach Featuring the Internet*, Addison Wesley, 2005.
- [9] Bahl, P.; Hajiaghay, M.T.; Jain, K.; Mirrokni, S.V.; Qiu, L.; Saberi, A., "Cell Breathing in Wireless LANs: Algorithms and Evaluation," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 6, no. 2, pp. 164-178, Feb. 2007.
- [10] Lin Du; Biahm, J.; Cuthbert, L., "A bubble oscillation algorithm for distributed geographic load balancing in mobile networks," Proc. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2004), pp. 330-338, March 2004.
- [11] Balazinska, M; Castro, P., "Characterizing mobility and network usage in a corporate wireless local-area network," Proc. ACM MobiSys, 2003.
- [12] Henderson, T.; Kotz, D.; Abyzov, I., "The Changing Usage of a Mature Campus-wide Wireless Network," Proc. ACM MobiCom 2004, pp. 187-201, Philadelphia, PA, USA, September 2004.