

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Ρύθμιση Ισχύος Εκπομπής Βάσει Κινήτρων σε Ασύρματα Δίκτυα Αυτόνομων Οντοτήτων με Διάφορους Βαθμούς Συνεργασίας

Τα ασύρματα δίκτυα αναπτύσσονται με ραγδαίους ρυθμούς τα τελευταία χρόνια: Οι ασύρματες επικοινωνίες είναι διαθέσιμες οπουδήποτε και οποτεδήποτε, παρέχοντας διάφορα επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας στους χρήστες. Ολοένα και περισσότερες έξυπνες κινητές συσκευές καθώς και μικροί φορητοί υπολογιστές διεισδύουν στην αγορά, πραγματοποιώντας το όνειρο του απανταχού υπολογίζεин. Αναγκαία συνθήκη για να συνεχιστεί αυτή η τάση καθώς οδεύουμε προς την εποχή των δικτύων 5ης γενιάς (και πέραν αυτών) είναι η μετεξέλιξη των ασυρμάτων τηλεπικοινωνιακών προτύπων. Πιο συγκεκριμένα, τα κυψελωτά δίκτυα πολλαπλών επιπέδων που περιλαμβάνουν τόσο τις παραδοσιακές κυψέλες όσο και μικροκυψέλες, δίκτυα επικοινωνιών συσκευής προς συσκευή κλπ. αναμένεται να έχουν δεσπόζουσα θέση τα προσεχή χρόνια. Τα ετερογενή αυτά δίκτυα αποτελούνται από αυτόνομες οντότητες οι οποίες ελέγχουν και αποφασίζουν μόνες τους για τις παραμέτρους λειτουργίας τους (για παράδειγμα, σε ποιο κομμάτι του φάσματος και με ποια ισχύ θα εκπέμψουν), αντί να εξαρτώνται από τις αποφάσεις κάποιας κεντρικής οντότητας. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι οι επιλογές μιας ασύρματης συσκευής έχουν άμεσο αντίκτυπο τόσο στις επιδόσεις κάποιων (τουλάχιστον) συσκευών (που χρησιμοποιούν το ίδιο κομμάτι του φάσματος) όσο και στη συνολική απόδοση του δικτύου.

Με αφετηρία τις άνω συνθήκες, ο θεμελιώδης στόχος της διδακτορικής διατριβής είναι η σχεδίαση αποδοτικών κατανομημένων σχημάτων διαχείρισης ραδιοπόρων με στόχο την αρμονική συνύπαρξη των συσκευών που συνυπάρχουν σε αυτά τα αναδυόμενα πρότυπα ασυρμάτων δικτύων. Εφαρμόζουμε δύο κλασσικές τεχνικές διαχείρισης ραδιοπόρων: Τη ρύθμιση ισχύος εκπομπής (power control), δηλαδή με ποια ισχύ πρέπει να μεταδώσει η συσκευή και την πρόσβαση στο κανάλι (channel access), δηλαδή πότε να μεταδώσει. Μελετούμε μια σειρά από πρακτικά σενάρια που περιλαμβάνουν (α) την αρμονική συνύπαρξη συσκευών που συνδέονται με παραδοσιακά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και συσκευών που συνδέονται με μικροκυψέλες, με τα δύο αυτά είδη συσκευών να έχουν διαφορετικούς δικτυακούς στόχους, (β) το πρόβλημα του ανταγωνισμού για πρόσβαση στο κανάλι σε δίκτυα επικοινωνιών συσκευής προς συσκευή, όπου οι αυτόνομες ασύρματες συσκευές επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους, χωρίς τη μεσολάβηση του σταθμού βάσης ή κάποιου ασυρμάτου σημείου πρόσβασης και (γ) σενάρια από κοινού χρήσης του αδειοδοτημένου φάσματος, στα οποία οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας δεν έχουν την αποκλειστική χρήση σε τμήματα φάσματος και εφαρμόζουν ρύθμιση ισχύος εκπομπής με τεχνικές διαπραγμάτευσης για να βελτιώσουν τα έσοδά τους.

Αναλύουμε τις παραπάνω καταστάσεις υπό το πρίσμα της θεωρίας παιγνίων, η οποία είναι μια κλασσική και πετυχημένη επιλογή για τη μοντελοποίηση σεναρίων όπου οι οντότητες

έχουν αντικρουόμενα συμφέροντα και οι στρατηγικές της μιας έχουν άμεσο αντίκτυπο στις επιδόσεις της άλλης. Χρησιμοποιούμε τη μη-συνεργατική θεωρία παιγνίων με τους παίκτες να είναι οι ασύρματες συσκευές και εστιάζουμε στην εύρεση σημείων ισορροπίας κατά Nash, μια από τις κεντρικότερες έννοιες στη θεωρία παιγνίων. Εξετάζουμε την ύπαρξη και τη μοναδικότητα τέτοιων σημείων ισορροπίας και προτείνουμε μια σειρά από καταναμημένα σχήματα που συγκλίνουν σε κάποιο από αυτά. Επιπλέον, αποτιμούμε τις επιδόσεις των σχημάτων μέσω θεωρητικής ανάλυσης και εκτενών προσομοιώσεων. Σε περιπτώσεις που οι ισορροπίες είναι υποβέλτιστες, υπό την έννοια ότι οι ασύρματες συσκευές δεν είναι ευχαριστημένες με τις επιδόσεις τους, εισαγάγουμε τεχνικές διαπραγμάτευσης με στόχο τη δημιουργία κινήτρων στις συσκευές για να αλλάξουν περαιτέρω τις παραμέτρους μετάδοσής τους. Εκμεταλλευόμενοι αυτές τις τεχνικές, προτείνουμε καταναμημένα σχήματα και αποδεικνύουμε ότι οδηγούν σε καλύτερα σημεία λειτουργίας από τις ισορροπίες κατά Nash χωρίς αυτά.

Συνεισφορές Διατριβής

Ο κεντρικός στόχος της διατριβής είναι η σχεδίαση, με χρήση εργαλείων από τη θεωρία παιγνίων, αποδοτικών καταναμημένων αλγορίθμων ρύθμισης ισχύος εκπομπής και πρόσβασης στο κανάλι που επιτρέπουν στις αυτόνομες οντότητες σύγχρονων ετερογενών ασυρμάτων δικτύων να συνυπάρξουν αποδοτικά.

Προς την κατεύθυνση εκπλήρωσης αυτού του στόχου, στο Κεφάλαιο 2, προχωράμε σε μια εκτενή επισκόπηση θεμελιωδών προσεγγίσεων της ρύθμισης ισχύος εκπομπής σε ασύρματα δίκτυα, κατηγοριοποιώντας και συγκρίνοντας τις σχετικές προσεγγίσεις. Τα Κεφάλαια 3-6 αντιστοιχούν στον πυρήνα της έρευνάς μας, όπου πραγματοποιήσαμε τις ακόλουθες κεντρικές συνεισφορές:

- Στο Κεφάλαιο 3, μοντελοποιούμε ένα μη-συνεργατικό παίγνιο ρύθμισης ισχύος εκπομπής σε ασύρματα δίκτυα αυτόνομων οντοτήτων, όπου οι οντότητες στοχεύουν να πετύχουν μια εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας για κλήσεις φωνής, χρησιμοποιώντας τον περίφημο αλγόριθμο των Foschini-Miljanic [32] (τον οποίο αναλύουμε διεξοδικά στο Κεφάλαιο 2). Αποδεικνύουμε μέσω προσομοιώσεων ότι το μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash αυτού του παιγνίου είναι υποβέλτιστο, υπό την έννοια ότι κάποιες συσκευές δεν πετυχαίνουν την επιθυμητή ποιότητα υπηρεσίας. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται ακόμη και σε ασύρματα δίκτυα με λίγες συσκευές. Για να αντιμετωπίσουμε αυτό το πρόβλημα, εισαγάγουμε τεχνικές διαπραγμάτευσης και τις συνδυάζουμε με τη ρύθμιση ισχύος εκπομπής, παρέχοντας κίνητρα στις ασύρματες συσκευές για να επιλέξουν αποδοτικότερα σημεία λειτουργίας από το σημείο λειτουργίας κατά Nash χωρίς τις τεχνικές διαπραγμάτευσης. Προτείνουμε ένα καταναμημένο σχήμα που εντοπίζει τέτοια σημεία, απαιτώντας μικρά

επίπεδα συνεργασίας μεταξύ των ασυρμάτων συσκευών. Επιπλέον, δείχνουμε μέσω προσομοιώσεων ότι το σχήμα μας είναι πιο αποδοτικό και δίκαιο έναντι κλασικών τεχνικών που εντοπίζουν καλύτερα σημεία λειτουργίας από το σημείο λειτουργίας κατά Nash.

- Στο Κεφάλαιο 4, μελετούμε ένα μοντέρνο ασύρματο δίκτυο δύο επιπέδων, αποτελούμενο από συσκευές που έχουν συνδεθεί στο παραδοσιακό δίκτυο κινητής τηλεφωνίας και από συσκευές που έχουν συνδεθεί σε μικροκυψέλες. Μοντελοποιούμε το συγκεκριμένο δίκτυο με τη βοήθεια της μη-συνεργατικής θεωρίας παιγνίων με τις συσκευές να εφαρμόζουν ρύθμιση ισχύος εκπομπής και να στοχεύουν σε διαφορετικούς δικτυακούς στόχους. Σε αντίθεση με τις συνήθεις προσεγγίσεις, προτείνουμε διαφορετικές συναρτήσεις χρησιμότητας για τους δύο τύπους συσκευών ώστε να μοντελοποιήσουμε ακριβέστερα τους στόχους τους. Αποδεικνύουμε ότι το παίγνιο έχει ένα τουλάχιστον σημείο ισορροπίας κατά Nash και αναλύουμε τις συνθήκες που πρέπει να πληρούνται για τη μοναδικότητά του. Προτείνουμε ένα καταναμημένο σχήμα που συγκλίνει γρήγορο στο μοναδικό σημείο ισορροπίας και αποτιμούμε την αποδοτικότητα του σημείου μέσω εκτενών προσομοιώσεων, οι οποίες δείχνουν ότι οι δύο τύποι συσκευών συνυπάρχουν αρμονικά στην πλειονότητα των σεναρίων.
- Στο Κεφάλαιο 5, μελετούμε το θεμελιώδες πρόβλημα του ανταγωνισμού για την πρόσβαση στο κανάλι στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών συσκευής προς συσκευή. Οι αυτόνομες αυτές συσκευές πρέπει να αποφασίσουν από μόνες τους πότε να στείλουν τα δεδομένα τους. Εστιάζουμε σε γραμμικά και δενδρικά δίκτυα και προτείνουμε μια μη-συνεργατική παιγνιοθεωρητική μοντελοποίηση του προβλήματος, εξετάζοντας δύο παραλλαγές για τις συναρτήσεις χρησιμότητας των συσκευών. Αποδεικνύουμε ότι το παίγνιο έχει σημεία ισορροπίας κατά Nash, αναλύουμε τη δομή τους και προτείνουμε δύο καταναμημένους σχήματα με διαφορετικά επίπεδα συνεργασίας μεταξύ των συσκευών τα οποία συγκλίνουν σε κάποιο σημείο ισορροπίας. Συγκρίνουμε την αποδοτικότητα των σημείων ισορροπίας και αναλύουμε τις διαφορές της προσέγγισής μας με το κλασικό πρόβλημα του προγραμματισμού των μεταδόσεων (transmission scheduling), εξηγώντας ότι το τελευταίο μπορεί να οδηγήσει σε σημεία λειτουργίας που δεν είναι αποδεκτά για τις αυτόνομες οντότητες.
- Στο Κεφάλαιο 6, μελετούμε σενάρια μη αποκλειστικής χρήσης του αδειοδοτημένου φάσματος και ορίζουμε ένα μη-συνεργατικό παίγνιο στο οποίο οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας στοχεύουν να μεγιστοποιήσουν τα έσοδά τους. Δείχνουμε ότι το μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash είναι υποβέλτιστο, με τα έσοδα των παρόχων να είναι μικρά. Για να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα αυτό, συνδυάζουμε τη ρύθμιση ισχύος εκπομπής με τεχνικές διαπραγματεύσεως, αναλύοντας τις συνθήκες που πρέπει να πληρούνται για την εύρεση σημείων λειτουργίας που είναι πιο αποδοτικά από το σημείο ισορροπίας. Για την περίπτωση

ύπαρξης ακριβώς δύο παρόχων, υπολογίζουμε το σημείο λειτουργίας που βελτιστοποιεί την κοινωνική ευημερία, δηλαδή μεγιστοποιεί το άθροισμα των εσόδων των παρόχων. Επιπλέον, ορίζουμε απλές στρατηγικές διαπραγμάτευσης που οδηγούν εγγυημένα στο σημείο βελτιστοποίησης της κοινωνικής ευημερίας, απαιτώντας χαμηλότερο βαθμό συνεργασίας μεταξύ των παρόχων σε σχέση με άλλες προσεγγίσεις της βιβλιογραφίας. Παράλληλα, αποδεικνύουμε ότι η προσέγγισή μας υπερτερεί των σχημάτων γραμμικής τιμολόγησης της ισχύος εκπομπής [33] που υιοθετούνται κατά κόρον για την εύρεση τέτοιων σημείων λειτουργίας, τόσο σε ό,τι αφορά τα έσοδα ανά πάροχο όσο και στο άθροισμα των εσόδων τους.