



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Επιλογή Κυψέλης και Βέλτιστη Κατανομή Πόρων σε
Διεπίπεδα Φεμτοκυψελωτά Δίκτυα με Υποστήριξη
Πολλαπλών Υπηρεσιών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Φίλιου Αλέξανδρου

Επιβλέπων: Σ. Παπαβασιλείου

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Επιλογή Κυψέλης και Βέλτιστη Κατανομή Πόρων σε
Διεπίπεδα Φεμτοκυψελωτά Δίκτυα με Υποστήριξη
Πολλαπλών Υπηρεσιών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Φίλιου Αλέξανδρου

Επιβλέπων: Σ. Παπαβασιλείου

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2014

.....
Συμεών Παπαβασιλείου
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μιχαήλ Θεολόγου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννα Ρουσσάκη
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2014

.....

Αλέξανδρος Φίλιος

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

Copyright © Αλέξανδρος Φίλιος, 2014.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει θέμα: **«Επιλογή Κυψέλης και Βέλτιστη Κατανομή Πόρων σε Διεπίπεδα Φεμτοκυβελωτά Δίκτυα με Υποστήριξη Πολλαπλών Υπηρεσιών»**

Μετά την ολοκλήρωση της διπλωματικής αυτής εργασίας, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν καθ' οιονδήποτε τρόπο στην επιτυχή εκπόνησή της. Πιο συγκεκριμένα, θα πρέπει να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Σ. Παπαβασιλείου, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π., ο οποίος μου εμπιστεύθηκε την εκπόνησή της στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου του εργαστηρίου Διαχείρισης και Βέλτιστου Σχεδιασμού Δικτύων Τηλεματικής (NETMODE).

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Δρ. Ειρήνη Ελένη Τσιροπούλου, εμπνεύστρια αυτής της διπλωματικής, για την πολύτιμη βοήθειά της, την καθοδήγηση, τις συμβουλές και τις χρήσιμες υποδείξεις της σε όλα τα στάδια της συγγραφής της, καθώς ήταν πάντοτε πρόθυμη να μου παράσχει κάθε βοήθεια για οποιοδήποτε πρόβλημα ή δυσκολία ανέκυπτε κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της, μοιραζόμενη με εμένα τις γνώσεις και την εμπειρία της με στόχο τη βαθύτερη διαισθητική προσέγγιση του υπό μελέτη θέματος.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Επιλογή κυψέλης (cell selection) ονομάζουμε τη διαδικασία προσδιορισμού πόρων σε ασύρματα κυψελωτά δίκτυα, που παρέχουν υπηρεσίες σε κινητούς χρήστες. Η βελτιστοποίηση αυτών των διαδικασιών είναι ένα σημαντικό βήμα με στόχο τη μεγιστοποίηση της χρησιμοποίησης των σύγχρονων, αλλά και των μελλοντικών δικτύων. Παρ' όλα αυτά, υποστηρίζεται συχνά ότι οι κεντρικές οντότητες που εκτελούν σήμερα τις εργασίες σχετικά με τον συντονισμό των παρεμβολών και τον μετριασμό τους με σφαιρική γνώση (global knowledge) θα πρέπει γενικά να αποφεύγονται, κυρίως λόγω των προβλημάτων που συχνά εγείρονται ως αποτέλεσμα της έλλειψης της απαιτούμενης αυτής σφαιρικής γνώσης, της μεγάλης υπολογιστικής πολυπλοκότητας κ.τ.λ. Έτσι, το κατισχύον όραμα που αφορά τα μελλοντικά δίκτυα δίνει έμφαση σε χρηστο-κεντρικές (user-centric) προσεγγίσεις, όπου ο χρήστης είναι υπεύθυνος για την επιλογή της στρατηγικής του και, κατ' επέκταση, η αναζήτηση επικεντρώνεται σε καταναμημένους αλγορίθμους (distributed algorithms). Έχοντας θέσει ως στόχο την επίτευξη αυτού του οράματος των μελλοντικών δικτύων, προτείνονται αποκεντρωμένοι (decentralized) αλγόριθμοι εκμάθησης για την επιλογή κυψέλης που επιτρέπουν στους κινητούς χρήστες να διαλέγουν μέσα από μία δεξαμενή ευνοϊκών πόρων με χαμηλό επίπεδο παρεμβολών, βάσει μόνο τοπικής γνώσης. Πιο συγκεκριμένα, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναλύουμε και αξιολογούμε τους προτεινόμενους αλγορίθμους επιλογής κυψέλης εισάγοντας ένα απλοποιημένο μοντέλο ασύρματου δικτύου και εφαρμόζοντας μεθόδους από τη θεωρία παιγνίων, π.χ. παίγνια δυναμικού (potential games). Αναλυτικότερα, κάθε χρήστης σχετίζεται με μία κατάλληλα ορισμένη συνάρτηση χρησιμότητας (utility function) σχετική με την ποιότητα υπηρεσίας που εξαρτάται τόσο από τη διεπίπεδη αρχιτεκτονική του δικτύου, όσο και από την κατηγορία της ζητούμενης υπηρεσίας –πραγματικού ή μη πραγματικού χρόνου, με βασική απαίτηση των χρηστών τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης. Αρχικά διατυπώνουμε το πρόβλημα βελτιστοποίησης για την επιλογή κυψέλης σε συνδυασμό με την κατανομή ισχύος εκπομπής και στη συνέχεια αποδεικνύουμε ότι η λύση του αποτελεί ένα σημείο ισορροπίας, γεγονός που εγγυάται ότι οι κινητοί χρήστες θα επιλέξουν την καταλληλότερη κυψέλη για να εξυπηρετηθούν, προκειμένου να μεγιστοποιήσουν την απόδοσή τους σε όρους ποιότητας υπηρεσίας. Η απόδειξη της ύπαρξης σημείων ισορροπίας καταδεικνύει ότι μία σταθερή επιλογή κυψέλης μπορεί να

επιτευχθεί από εγωιστές παίκτες (selfish agents). Η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης προσέγγισης αξιολογείται μέσω μοντελοποίησης και στη συνέχεια προσομοίωσης.

Λέξεις-Κλειδιά: Επιλογή Κυψέλης; Παίγνιο Δυναμικού; Διεπίπεδα Δίκτυα Φεμτο-κυψελών; Ισορροπία Nash; Αλγόριθμος Εκμάθησης

ABSTRACT

Cell selection is the process of determining cell resource which provides service to mobile users. Optimizing these processes is an important step towards maximizing the utilization of current and future networks. However, it is assumed that central entities performing the task of interference coordination and mitigation with global knowledge should be avoided due to the problems that frequently arise as a result of the lack of global knowledge, high computational complexity etc. Henceforth, the prevailing vision of future networking focuses on user-centric approaches, where the user is responsible to decide his/her strategy and, as a consequence, distributed algorithms are sought for. Towards realizing the vision of future networking, decentralized cell selection learning algorithms enabling mobile users to select a pool of favorable resources with low interference based on local knowledge only are proposed. Specifically, we analyze and evaluate the proposed cell selection algorithms by introducing a simplified wireless network model and applying methods from game theory, e.g. potential games. More analytically, each user is associated with a properly defined QoS aware utility function, which depends both on the two tier architecture, as well as the class of requested service, i.e. real or non-real time service, requested bitrate. A cell selection optimization problem is formulated and its solution is shown to constitute a feasible equilibrium point, which guarantees that the mobile users select the most appropriate cell to be served from in order to maximize their QoS-aware performance. Proving the existence of an equilibrium shows that stable cell selections can be reached by selfish agents. The effectiveness of the proposed approach is evaluated through modeling and simulation.

Keywords: Cell Selection; Potential Game; Two-Tier Femto-cell Networks; Nash Equilibrium; Learning Algorithm

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	8
Περιεχόμενα.....	9
Πίνακας Σχημάτων.....	12
1. Εισαγωγή.....	14
1.1. Πώς εκτελείται η επιλογή κυψέλης στα συστήματα GSM, 3G και 4G	15
1.2. Κεντροποιημένη έναντι αποκεντρωμένης προσέγγισης	19
1.3. Τύποι μικρών κυψελών	20
1.4. Ορισμοί.....	21
1.5. Σκοπός	22
1.6. Δομή του κειμένου	22
2. Θεωρητική προσέγγιση με χρήση της θεωρίας παιγνίων.....	24
2.1. Στρατηγικά παίγνια	24
2.2. Παίγνια Stackelberg.....	28
2.3. Παίγνια δυναμικού	29
2.4. Παίγνια συμφόρησης.....	31
2.5. Εξελικτική θεωρία παιγνίων	32
2.6. Βιβλιογραφικά παραδείγματα.....	35
2.6.1. Αποκεντρωμένος συντονισμός διακυψελικής παρεμβολής από αποφάσεις αυτόνομης επαναχρησιμοποίησης φάσματος.....	35
2.6.2. Επιλογή δικτύου σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα με χρήση αυτομάτων εκμάθησης.....	36
2.6.3. Παιγνιοθεωρητικό μοντέλο και ύπαρξη περιπτώσεων ωφέλιμων για όλους (win-win) σε φεμτο-κυψελωτά δίκτυα.....	36

2.6.4.	Παίγνια δυναμικής επιλογής υπηρεσίας σε ετερογενή δίκτυα μικρών κυψελών με πολλαπλούς παρόχους.....	37
2.6.5.	Παίγνια συμμόρφωσης για κατανομημένη επιλογή ραδιοδιαύλων σε ευρυζωνικά δίκτυα.....	37
2.6.6.	Επιλογή κυψέλης σε διεπίπεδα δίκτυα φεμτο-κυψελών με δυνατότητα ανοικτής/κλειστής πρόσβασης με χρήση εξελικτικών παιγνίων.....	38
3.	Θεωρητική ανάλυση	40
3.1.	Πρώτη προσέγγιση (NOCES: NOn-cooperative CEll Selection game)	40
3.1.1.	Μοντελοποίηση του συστήματος	40
3.1.2.	Συναρτήσεις χρησιμότητας.....	42
3.1.3.	Ορισμός του παγινίου	44
3.1.4.	Παίγνιο δυναμικού και ύπαρξη ισορροπίας Nash.....	45
3.2.	Δεύτερη προσέγγιση (CSPA)	48
3.2.1.	Μοντελοποίηση του συστήματος	48
3.2.2.	Συναρτήσεις απόδοσης.....	50
3.2.3.	Διατύπωση του προβλήματος.....	51
4.	Προσομοιώσεις	54
4.1.	Πρώτη προσέγγιση.....	57
4.1.1.	Αλγόριθμος.....	57
4.1.2.	Σενάριο προσομοίωσης και παράμετροι	60
4.1.3.	Αποτελέσματα προσομοίωσης	61
4.2.	Δεύτερη προσέγγιση (CSPA: Cell Selection and Power Allocation).....	65
4.2.1.	Αλγόριθμος.....	65
4.2.2.	Σενάριο προσομοίωσης και παράμετροι	66
4.2.3.	Αποτελέσματα προσομοίωσης	67
5.	Συμπεράσματα.....	79
5.1.	Σχετική έρευνα	79

5.2. Συνεισφορά.....	83
5.3. Σύγκριση των δύο προσεγγίσεων.....	83
5.4. Επίλογος.....	85
Βιβλιογραφία	86

Πίνακας Σχημάτων

Σχ. 1 Κακή συμπεριφορά του αλγορίθμου ανίχνευσης βέλτιστου λόγου SNR σε δίκτυο με μεγάλο φορτίο	18
Σχ. 2 Διεπίπεδη τοπολογία δικτύου	41
Σχ. 3 Σύγκλιση πιθανότητας επιλογής κυψέλης υπό διαφορετικές τιμές της παραμέτρου βηματικής αύξησης b για τον χρήστη $i = 1$	62
Σχ. 4 Πλήθος απαιτούμενων επαναλήψεων του αλγορίθμου NOCES για σύγκλιση ως συνάρτηση της τιμής της παραμέτρου b	63
Σχ. 5 Σύγκλιση των επιπέδων ισχύος μετάδοσης άνω ζεύξης για διάφορους χρήστες ...	64
Σχ. 6 Κατανομή χρηστών και σημείων πρόσβασης μετά την πρώτη εκτέλεση του αλγορίθμου CSPA για $\sigma = 0.03$	69
Σχ. 7 Κατανομή χρηστών και σημείων πρόσβασης μετά τη δεύτερη εκτέλεση του αλγορίθμου CSPA για $\sigma = 0.03$	70
Σχ. 8 Κατανομή χρηστών και σημείων πρόσβασης μετά την Τρίτη εκτέλεση του αλγορίθμου CSPA για $\sigma = 0.03$	71
Σχ. 9 Συγκριτικό διάγραμμα σύγκλισης πιθανότητας επιλογής κυψέλης για έναν χρήστη $i \in \mathcal{M}$ για διάφορες τιμές της τιμής της περιοχής σύγκλισης $\sigma = 0.03$, $\sigma = 0.1$ και $\sigma = 0.15$	73
Σχ. 10 Πλήθος χρηστών που έχουν συγκλίνει σε μία κυψέλη ως συνάρτηση των επαναλήψεων του αλγορίθμου CSPA για $\sigma = 0.03$	74
Σχ. 11 Αριθμός απαιτούμενων επαναλήψεων του αλγορίθμου CSPA για επίτευξη σύγκλισης συναρτήσει της περιοχής σύγκλισης, σ	75
Σχ. 12 Σύγκλιση εκπεμπόμενης ισχύος συναρτήσει αριθμού επαναλήψεων	76
Σχ. 13 Συγκριτικό διάγραμμα σύγκλισης εκπεμπόμενης ισχύος συναρτήσει αριθμού επαναλήψεων για τις δύο προσεγγίσεις	77

1. Εισαγωγή

Το σύστημα κινητών επικοινωνιών έχει διέλθει από τρεις εξελικτικές γενεές. Η πρώτη γενιά χαρακτηριζόταν από μετάδοση φωνής αναλογικής διαμόρφωσης συχνότητας. Η δεύτερη γενιά εφαρμόζει μετάδοση ψηφιακής φωνής. Αυτή η γενιά χρησιμοποιεί κανάλια αφιερωμένα στη μετάδοση δεδομένων ελέγχου του δικτύου μεταξύ των κινητών τερματικών (mobile terminals) και των σταθμών βάσης (base stations).

Τα συστήματα τρίτης γενιάς επιτρέπουν στο κινητό τερματικό να φέρει διάφορους τύπους πληροφοριών. Αυτά τα συστήματα έχουν τη δυνατότητα εξυπηρέτησης τόσο πυκνοκατοικημένων αστικών περιοχών, όσο και περισσότερο αραιοκατοικημένων αγροτικών περιοχών. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν μικρο-κυψέλες σε αστικές περιοχές με διάμετρο περίπου 100 m, ενώ τα συστήματα πρώτης και δεύτερης γενιάς χρησιμοποιούσαν τυποποιημένες κυψέλες με διάμετρο μερικών χιλιομέτρων. Αυτό το μικρότερο μέγεθος κυψελών οδήγησε στα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Αποδοτικότερη χρήση του φάσματος για την ικανοποίηση της αύξησης της ζήτησης. Κατέστη δυνατή η επαναχρησιμοποίηση των ίδιων ραδιοσυχνοτήτων σε έναν μεγάλο αριθμό κυψελών, υπό την προϋπόθεση αυτές οι κυψέλες να διατηρούν μεταξύ τους επαρκή απόσταση για την εμπόδιση των παρεμβολών.
- Απαιτούνται χαμηλότερα επίπεδα ισχύος από τους σταθμούς βάσης, αλλά και από τα κινητά τερματικά, το οποίο μεταφράζεται σε μεγαλύτερη διάρκεια λειτουργίας της μπαταρίας και ασφαλέστερη λειτουργία [1].

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων της εξελισσόμενης τέταρτης γενιάς (4G) είναι η χρήση ετερογενών ασύρματων δικτύων, στα οποία ο κινητός χρήστης έχει τη δυνατότητα σύνδεσης σε διαφορετικά δίκτυα πρόσβασης (π.χ. WiMAX, LTE και WiFi). Στο πλαίσιο της ετερογενούς αυτής ασύρματης πρόσβασης, προκειμένου να ικανοποιηθεί η απαίτηση ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service, QoS), καθώς και η απαίτηση κερδών του παρόχου υπηρεσιών (service provider), είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός ενός μηχανισμού ταυτόχρονα επιλογής κυψέλης (cell selection), διαχείρισης ραδιοπόρων (radio resource management), ελέγχου συμφόρησης (congestion control), ελέγχου αποδοχής υπηρεσίας (admission control), κ.λπ.

Σε όλα τα καλά σχεδιασμένα συστήματα κινητών επικοινωνιών, η ομοδιαυλική παρεμβολή μεταξύ γειτονικών κυψελών (co-channel inter-cell interference) είναι ο αποφασιστικός παράγοντας που τελικά θα περιορίσει τη συνολική χωρητικότητα του συστήματος, δεδομένου ενός σταθερού τμήματος του φάσματος συχνοτήτων. Η μείωση των παρεμβολών μέσω τεχνικών άμβλυσης (mitigation techniques) και διαχείρισης παρεμβολών (interference management) είναι, λοιπόν, ένας τρόπος βελτίωσης της χωρητικότητας ενός συστήματος κινητών επικοινωνιών. Μία κλασική προσέγγιση που εφαρμόζεται για τη μείωση των παρεμβολών, π.χ. στα GSM συστήματα δεύτερης γενιάς, είναι ο προγραμματισμός συχνοτήτων (frequency planning) [2]. Με τον προγραμματισμό συχνοτήτων, το σύνολο των διαθέσιμων πόρων (συχνοτήτων) δεν επαναχρησιμοποιείται πλήρως σε κάθε κυψέλη, με αποτέλεσμα να μην επαναχρησιμοποιούν όλες –ή ακόμη και καμία- οι γειτονικές κυψέλες τους ίδιους πόρους.

Από μία μεριά, ένας χαμηλός βαθμός επαναχρησιμοποίησης επιτρέπει μία υψηλότερη απόσταση επαναχρησιμοποίησης μεταξύ των κυψελών που χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες, έτσι ώστε τα παρεμβάλλοντα σήματα να υφίστανται μεγαλύτερη απόσβεση. Το γεγονός αυτό βελτιώνει τον λόγο σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (Signal to Interference and Noise Ration, SINR), παραχωρώντας μεγαλύτερη αποδοτικότητα καναλιού, δεδομένου ενός συγκεκριμένου τμήματος του φάσματος. Από την άλλη, ο περιορισμός των συχνοτικών πόρων που είναι διαθέσιμοι σε κάθε κυψέλη μειώνει το τμήμα του διαθέσιμου φάσματος και κατ' επέκταση τη χωρητικότητα του συστήματος ανά κυψέλη [3]. Ανταλλάσσοντας (trade off) το επίπεδο παρεμβολών έναντι του φάσματος, ένας διαχειριστής συστήματος στοχεύει στη μεγιστοποίηση της συνολικής χωρητικότητας του συστήματος χρησιμοποιώντας ένα σχήμα παραχώρησης πόρων, όπως αναλύεται στα [4] και [5].

1.1. Πώς εκτελείται η επιλογή κυψέλης στα συστήματα GSM, 3G και 4G

Στα περισσότερα σύγχρονα κινητά συστήματα, η διαδικασία επιλογής κυψέλης εκτελείται από μία τοπική διαδικασία που αρχικοποιείται από μία κινητή συσκευή, σύμφωνα με τον καλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ration, SNR) που ανιχνεύεται. Σε αυτήν τη διαδικασία, το κινητό τερματικό μετρά τον λόγο SNR από

διάφορους σταθμούς βάσης (base stations) που βρίσκονται μεταξύ της ακτίνας εκπομπής τους, διατηρεί μία «σειρά προτεραιότητας» αυτών που ανιχνεύθηκαν να παρουσιάζουν τις καλύτερες τιμές (ονομάζονται ενεργό σύνολο) και αποστέλλει ένα επίσημο αίτημα εγγραφής υπηρεσίας στους σταθμούς βάσης με τη σειρά που υποδεικνύεται από αυτήν τη λίστα. Η κινητή συσκευή συνδέεται στον πρώτο σταθμό βάσης που θα επιβεβαιώσει θετικά το αίτημά της [6]. Πιο συγκεκριμένα:

Σε **δίκτυα GSM**, όταν ο χρήστης δεν έχει προηγούμενη γνώση σχετικά με το σε ποιες συχνότητες συστήματος GSM 900 ή GSM 1800 βρίσκονται φέροντα καναλιών ελέγχου ευρυεκπομπής (Broadcast Control Channel, BCCH), το κινητό τερματικό πρέπει να αναζητήσει αρχικά όλα τα φέροντα ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency, RF) του αντίστοιχου συστήματος, καθώς και να πραγματοποιήσει μετρήσεις της ισχύος του σήματος για κάθε φέρον RF. Με βάση τις μετρήσεις αυτές, ο χρήστης μπορεί να εκτιμήσει αν μία κυψέλη θα έχει τη δυνατότητα να παράσχει κατάλληλη εξυπηρέτηση από άποψη ραδιοδιάδοσης, δηλαδή αν θα υπάρχει κατάλληλη «ποιότητα ζεύξης». Συνεπώς, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επιλογής κυψέλης, το κινητό θα επιλέξει, παραδείγματος χάριν, μόνο εκείνες τις κυψέλες που έχουν επιδείξει μέσο λαμβανόμενο επίπεδο κάτω ζεύξης μεγαλύτερο από το κατώφλι [7].

Όσον αφορά τα **δίκτυα 3G**, η αρχική επιλογή κυψέλης είναι διαφορετική από τις διαδικασίες επιλογής του GSM. Ο στόχος της διαδικασίας αρχικής επιλογής κυψέλης είναι η εύρεση μίας κυψέλης, όχι απαραίτητα της καλύτερης, αλλά χρησιμοποιήσιμης κυψέλης, για το κινητό τερματικό, ή όπως ονομάζεται στα δίκτυα 3G, τον εξοπλισμό του χρήστη (User Equipment, UE), προκειμένου να συνδεθεί μετά την έναρξη της λειτουργίας.

Η διαδικασία επανεπιλογής κυψέλης ή, όπως αποκαλείται από το 3GPP, η διαδικασία αξιολόγησης επανεπιλογής κυψέλης (cell reselection evaluation process), εκτελείται στην κατάσταση αδράνειας προκειμένου να διατηρεί τον χρήστη συνδεδεμένο στη βέλτιστη κυψέλη. Αν το τερματικό μετακινηθεί ή οι συνθήκες του δικτύου μεταβληθούν, ίσως κριθεί απαραίτητο για τη συσκευή να αλλάξει την κυψέλη στην οποία έχει συνδεθεί. Αυτή η διαδικασία ελέγχει ότι ο χρήστης είναι συνδεδεμένος στην καλύτερη κυψέλη, ή τουλάχιστον σε μία κυψέλη που είναι αρκετά καλή για τις ανάγκες του

χρήστη. Στην κανονική κατάσταση αδράνειας (normal idle mode), το κινητό τερματικό θα πρέπει να παρατηρεί τις πληροφορίες ανίχνευσης (paging information), καθώς και τις πληροφορίες συστήματος και να πραγματοποιεί μετρήσεις στην κυψέλη. Η διαδικασία επανεπιλογής κυψέλης θα κληθεί αν οι μετρήσεις υποδείξουν ότι έχει βρεθεί μία καλύτερη κυψέλη, ή αν οι πληροφορίες συστήματος σχετικά με την τρέχουσα κυψέλη υποδείξουν ότι έχουν εφαρμοστεί νέοι περιορισμοί όσον αφορά την πρόσβαση στην κυψέλη [8].

Σε ένα **δίκτυο 4G**, μετά την επιλογή κινητού δημόσιου δικτύου εδάφους (Public Land Mobile Network, PLMN), το τερματικό χρησιμοποιεί την «επιλογή κυψέλης» για τη γρήγορη αναζήτηση κυψέλης προκειμένου να συνδεθεί. Για να λαμβάνει πληροφορίες συστήματος, η συσκευή συντονίζεται στα κανάλια ελέγχου. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται «εγκατάσταση σε δίκτυο» (camping on a cell).

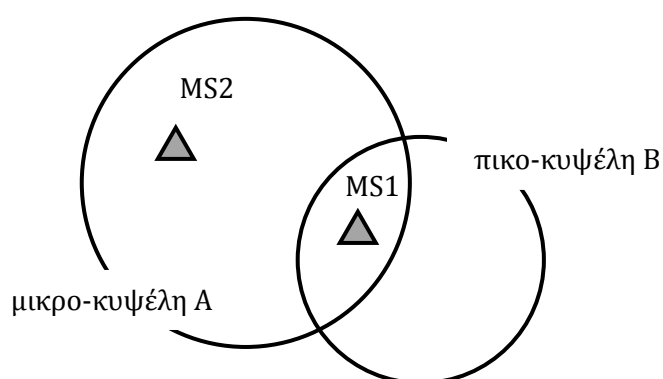
Αν ο χρήστης βρει μία «καλύτερη» κυψέλη, τότε την επιλέγει και συνδέεται σε αυτήν. Μετά τη σύνδεσή του, το τερματικό παρακολουθεί τις πληροφορίες συστήματος για να λάβει το κατώφλι ποιότητας και πραγματοποιεί μετρήσεις για τη διαδικασία αξιολόγησης επανεπιλογής κυψέλης. Η συσκευή αξιολογεί αν υπάρχει ή όχι μία καλύτερη κυψέλη.

Το δίκτυο πρόσβασης (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network, E-UTRAN) ελέγχει τις μετρήσεις σχετικά με την ποιότητα των κυψελών που θα συμμετάσχουν στη διαδικασία επανεπιλογής. Η πραγματοποίηση μετρήσεων του τερματικού καλείται σύμφωνα με την ποιότητα της κυψέλης εξυπηρέτησης και του κατωφλίου, όπως υποδεικνύονται από τις πληροφορίες συστήματος. Η μέτρηση πρέπει να ικανοποιεί διαφορετικές απαιτήσεις όσον αφορά εκτιμήσεις ποιότητας για παρεμβολές από κανάλια ίδιας συχνότητας, κανάλια διαφορετικής συχνότητας και διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης (Radio Access Technology, RAT).

Η επιλογή κυψέλης εκτελείται στην αδρανή κατάσταση ελέγχου ραδιοπόρων (Radio Resource Control, RRC). Η σύνδεση σε κυψέλη κατά την αδρανή κατάσταση επιτρέπει στο κινητό τερματικό να λαμβάνει πληροφορίες από το δίκτυο. Η συσκευή παραμένει σε αδρανή κατάσταση μέχρι να μεταδώσει αίτημα εγκατάστασης σύνδεσης RRC. Μετά

τη λήψη του μηνύματος εγκατάστασης της σύνδεσης, η κατάσταση αλλάζει σε συνδεδεμένη [9].

Η βελτιστοποίηση της επιλογής κυψέλης είναι καθοριστικής σημασίας στα δίκτυα τέταρτης γενιάς λόγω όχι μόνο της περιορισμένης χωρητικότητας που είναι διαθέσιμη στους σταθμούς βάσης (π.χ. στην περίπτωση των φεμτο-κυψελών), αλλά και της αυξημένης ζήτησης από τους κινητούς χρήστες.



Σχ. 1 Κακή συμπεριφορά του αλγορίθμου ανίχνευσης βέλτιστου λόγου SNR σε δίκτυο με μεγάλο φορτίο

Ας θεωρήσουμε, για παράδειγμα, την τοπολογία του **Error! Reference source not found.** Υποθέτουμε ότι ο βέλτιστος λόγος SNR για τον κινητό σταθμό 1 (Mobile Station 1, MS1) ανιχνεύεται από την μικρο-κυψέλη A, και έτσι το MS1 εξυπηρετείται από αυτήν την κυψέλη. Όταν έρθει ο κινητός σταθμός 2 (Mobile Station 2, MS2), ο καλύτερος σηματοθορυβικός λόγος προέρχεται επίσης από την μικρο-κυψέλη A, η οποία είναι και η μοναδική κυψέλη που μπορεί να καλύψει το MS2. Ωστόσο, μετά την αποδοχή εξυπηρέτησης του MS1, η μικρο-κυψέλη A δεν διαθέτει αρκετή χωρητικότητα για να ικανοποιήσει τη ζήτηση του MS2 που έχει ήδη υψηλές απαιτήσεις δεδομένων. Όμως, αν ο χρήστης MS1 μπορούσε να εξυπηρετηθεί από την πικο-κυψέλη B, τότε και οι δύο πελάτες, MS1 και MS2, θα μπορούσαν να εξυπηρετηθούν. Αξίζει να σημειώσουμε ότι οι MS1 και MS2 θα μπορούσαν να αντιπροσωπεύουν ένα σύνολο πελατών.

Αυτό το απλό παράδειγμα εξηγεί την ανάγκη για μία σφαιρική, και όχι τοπική, λύση στο πρόβλημα της επιλογής κυψέλης που προσπαθεί να μεγιστοποιήσει τη μέγιστη χρησιμοποίηση του δικτύου και όχι απλά τον σηματοθορυβικό λόγο ενός μόνο χρήστη [6].

1.2. Κεντριοποιημένη έναντι αποκεντρωμένης προσέγγισης

Κοινό σημείο αναφοράς γενικά στην πλειονότητα των σχημάτων επιλογής κυψέλης και ανάθεσης πόρων είναι ο κεντρικός έλεγχος της διαδικασίας συντονισμού από μία κεντρική οντότητα όπως, π.χ. ένας ελεγκτής δικτύου ραδιοσυχνοτήτων (Radio Network Controller, RNC). Εν αντιθέσει με αυτό, τα τελευταία χρόνια εξετάζονται όλο και περισσότερες πλήρως αποκεντρωμένες διαδικασίες συντονισμού. Υπάρχουν πολλαπλά κίνητρα που υποδεικνύουν την κατεύθυνση αυτή.

- Πρώτα απ' όλα, το πρόβλημα της συνολικής ανάθεσης πόρων είναι εγγενώς πολύπλοκο, υπό την έννοια ότι απαιτεί σφαιρική γνώση (global knowledge). Κατά συνέπεια, απαιτείται μεγάλος όγκος πληροφορίας σηματοδότησης, το οποίο μπορεί να μεταφραστεί σε επιπλέον δέσμευση πόρων, αυξημένη κατανάλωση ισχύος και μεγαλύτερους χρόνους καθυστέρησης. Παράλληλα, η συνολική ανάθεση πόρων είναι υπολογιστικά εφικτή αποκλειστικά με τη χρήση ευριστικών μεθόδων βελτιστοποίησης (optimization heuristics), οι οποίες τελικά μπορεί να μην επιτύχουν το συνολικό βέλτιστο. Έτσι, αντίστοιχα με την πρόσφατη έρευνα στην αλγοριθμική θεωρία παιγνίων, φαίνεται εύλογη η εξέταση της ανάθεσης του συντονισμού σε παίκτες που δρουν εγωιστικά (selfishly acting agents), δεδομένου ότι μία τέτοια τεχνική δεν εμπλέκει μεγάλο κόστος αναρχίας (price of anarchy) και τελικά μεγάλη απόκλιση από τη βέλτιστη λύση.
- Δεύτερον, οι σχεδιαστές των μελλοντικών δικτύων LTE και LTE-Advanced στοχεύουν στην κατάργηση των ελεγκτών RNC, το οποίο σημαίνει ότι δεν θα υπάρχουν πλέον φυσικές κεντρικές οντότητες βελτιστοποίησης που θα μπορούσαν να υποχρεώσουν τους σταθμούς βάσης να τηρήσουν ένα σχέδιο κατανομής συχνοτήτων. Για να μειωθεί η πολυπλοκότητα του σχεδιασμού του δικτύου κατά την εγκατάσταση και την επέκτασή του, ο αποκεντρωμένος συντονισμός εκτελούμενος από σταθμούς βάσης ή κινητά τερματικά αναμένεται να επιτρέψει τη λειτουργία plug-and-play της διαχείρισης ραδιοπόρων μέσω της αυτόνομης αυτοδιαχείρισης των ραδιοπόρων.
- Τρίτον, οι αποκεντρωμένοι αλγόριθμοι μπορούν να γίνουν πολύ απλοί και να επιτρέπουν ως εκ τούτου μία πολύ πιο γρήγορη προσαρμογή, π.χ. σε

μεταβαλλόμενες ανάγκες κίνησης, σε σχέση με κεντρικοποιημένες προσεγγίσεις [3].

1.3. Τύποι μικρών κυψελών

Ο όρος μικρές κυψέλες περιλαμβάνει τις φεμτο-κυψέλες, τις πικο-κυψέλες και τις μικρο-κυψέλες. Τα δίκτυα μικρών κυψελών μπορούν να επιτευχθούν με χρήση καταναμημένης ραδιοτεχνολογίας που αποτελείται από κεντρικοποιημένες μονάδες που λειτουργούν στη βασική ζώνη (baseband). Τεχνολογίες διαμόρφωσης δέσμης (beamforming technologies), οι οποίες συγκεντρώνουν το ραδιοσήμα σε μία πολύ συγκεκριμένη και εντοπισμένη περιοχή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περαιτέρω ενισχυμένη ή εστιασμένη κάλυψη της κυψέλης. Ένας κοινός παράγοντας σε όλες αυτές τις προσεγγίσεις των μικρών κυψελών είναι η κεντρική διαχείρισή τους από διαχειριστές κινητών δικτύων.

Οι μικρές κυψέλες παρέχουν μικρό εμβαδόν κάλυψης, το οποίο μπορεί να κυμαίνεται από 10 m σε αστικές περιοχές και σε περιοχές εντός κτιρίων, έως 2 km σε αγροτικές περιοχές. Οι πικο-κυψέλες και οι μικρο-κυψέλες μπορούν επίσης να έχουν μία διακύμανση από μερικές εκατοντάδες μέτρων έως μερικά χιλιόμετρα, αλλά διαφέρουν από τις φεμτο-κυψέλες, λόγω του ότι δεν έχουν πάντα δυνατότητα αυτο-οργάνωσης και αυτο-διαχείρισης.

Οι μικρές κυψέλες είναι διαθέσιμες για ένα μεγάλο εύρος ραδιο-διεπαφών, μεταξύ άλλων GSM, CDMA2000, SCDMA, W-CDMA, LTE και WiMax. Στην τεχνολογία 3GPP, ο όρος Home Node B (HNB) αναφέρεται σε μία φεμτο-κυψέλη 3G, ενώ ο όρος Home eNode B (HeNB) σε μία φεμτο-κυψέλη LTE. Ένα δίκτυο WiFi είναι μία μικρή κυψέλη, αλλά δεν λειτουργεί σε εξουσιοδοτημένο φάσμα και κατ' επέκταση δεν είναι δυνατή η διαχείρισή του τόσο αποδοτικά όσο είναι σε μικρές κυψέλες που χρησιμοποιούν εξουσιοδοτημένο φάσμα. Η λεπτομέρεια και η βέλτιστη τακτική που σχετίζεται με την εγκατάσταση μικρών κυψελών ποικίλλει ανάλογα με την περίπτωση χρήσης και τη χρησιμοποιούμενη ραδιοτεχνολογία.

Οι μικρές κυψέλες είναι ένα αναπόσπαστο τμήμα των μελλοντικών δικτύων LTE. Στα δίκτυα τρίτης γενιάς, οι μικρές κυψέλες αντιμετωπίζονται ως τεχνική αποσυμφόρησης. Στα δίκτυα τέταρτης γενιάς, η κύρια αρχή του ετερογενούς δικτύου (heterogeneous

network, HetNet) εισάγεται όπου το κινητό δίκτυο έχει κατασκευαστεί με επίπεδα (layers, tiers) μικρών και μεγάλων κυψελών. Στο LTE, όλες οι κυψέλες είναι αυτο-οργανωνόμενες, αντλώντας από τις βασικές αρχές που έχουν εφαρμοστεί στο Home NodeB (HNB), όπως είναι ο ορισμός στο 3GPP που αντιστοιχεί στις οικιακές φεμτο-κυψέλες [10].

1.4. Ορισμοί

Ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service, QoS) είναι η συνολική απόδοση ενός δικτύου τηλεφωνίας ή υπολογιστών, και ιδιαίτερα η απόδοση που γίνεται αντιληπτή από τους χρήστες του δικτύου.

Σταθμός βάσης (Base Station) ή πομποδέκτης βάσης (Base Transceiver Station, BTS) στις ασύρματες επικοινωνίες είναι ένας πομποδέκτης που συνδέει έναν αριθμό συσκευών μεταξύ τους ή/και με μία ευρύτερη περιοχή. Στις κινητές τηλεπικοινωνίες, παρέχει τη σύνδεση μεταξύ των κινητών τηλεφώνων και του ευρύτερου τηλεφωνικού δικτύου PLMN.

Κανάλι ελέγχου ευρυεκπομπής (Broadcast Control Channel, BCCH) είναι ένα point-to-multipoint κανάλι μίας κατεύθυνσης (downlink) που χρησιμοποιείται στο τερματικό της διεπαφής του χρήστη, έτσι ώστε να περιγράφει την ταυτότητα, τη δομή και διαμόρφωση, καθώς και τα διαθέσιμα χαρακτηριστικά του σταθμού βάσης.

Το πρωτόκολλο **ελέγχου ραδιοπόρων (Radio Resource Control, RRC)** ανήκει στη στοίβα πρωτοκόλλων του UMTS και διαχειρίζεται το επίπεδο ελέγχου (control plane) του στρώματος 3 μεταξύ του εξοπλισμού του χρήστη και του δικτύου πρόσβασης (Universal Terrestrial Radio Access Network, UTRAN), συμπεριλαμβανομένων των συναρτήσεων για την εγκατάσταση και απόλυση σύνδεσης, την ευρυεκπομπή πληροφοριών συστήματος, την ενημέρωση θέσης κ.τ.λ.

Επίπεδο (Tier) στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας είναι το επίπεδο ή βαθμός εντός μίας ιεραρχίας από επικαλυπτόμενα δίκτυα διαφορετικής ακτίνας. Το πιο κοινό **διεπίπεδο δίκτυο (two-tier network)** που συναντάται συνηθέστερα αναφέρεται σε ένα δίκτυο που αποτελείται από μία κεντρική μακρο-κυψέλη που έχει ως υπόστρωμα φεμτο-κυψέλες μικρότερης ακτίνας κάλυψης.

1.5. Σκοπός

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής κυψέλης σε διεπίπεδα δίκτυα με φεμτο-κυψέλες ανοικτής πρόσβασης, τα οποία υποστηρίζουν πολλαπλούς τύπους υπηρεσιών, δηλ. πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου, με διαφορετικές απαιτήσεις ως προς το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων κ.λπ.) με διάφορες και συχνά διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας μέσω ενός πλαισίου βασισμένου στη θεωρία παιγνίων. Στη συνέχεια, θα προτείνουμε δύο εναλλακτικές λύσεις στο προαναφερθέν πρόβλημα.

- Στην **πρώτη προσέγγιση**, ο χρήστης θα απαιτεί υπηρεσίες είτε πραγματικού χρόνου είτε μη πραγματικού χρόνου, οι οποίες αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικούς τύπους ποιότητας υπηρεσίας. Στη συνέχεια θα επιχειρήσουμε να αποδείξουμε την ύπαρξη ενός σημείου ισορροπίας Nash, επιλύοντας έτσι το πρόβλημα σε ένα παιγνιοθεωρητικό πλαίσιο με βάση τη θεωρία παιγνίων.
- Στη **δεύτερη προσέγγιση**, ο χρήστης θα έχει μία απαίτηση ποιότητας υπηρεσίας εκφρασμένη ως το επιθυμητό επίπεδο ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, κάτω από το οποίο η υπηρεσία δεν θα κρίνεται αποδεκτή. Έτσι, θα διατυπώσουμε το αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης, για το οποίο θα δείξουμε με αναλυτικά αποτελέσματα ότι το σύστημα συγκλίνει σε μία κατάσταση ισορροπίας.

Και στις δύο προσεγγίσεις, ο κύριος στόχος είναι η από κοινού επίλυση των προβλημάτων επιλογής κυψέλης σύμφωνα με τις προϋποθέσεις που έχει θέσει σχετικά με την ποιότητα υπηρεσίας ο κάθε χρήστης, σε συνδυασμό με αυτό της υιοθέτησης ενός βέλτιστου επιπέδου ισχύος εκπομπής.

1.6. Δομή του κειμένου

Το υπόλοιπο του κειμένου έχει οργανωθεί ως ακολούθως:

Κεφάλαιο 2: Αρχικά, θα παρουσιάσουμε την προσέγγιση που βασίζεται στη θεωρία παιγνίων, όπως επίσης και μερικές χαρακτηριστικές εφαρμογές που είναι ήδη διαθέσιμες στην τρέχουσα βιβλιογραφία.

Κεφάλαιο 3: Στη συνέχεια, προτείνεται μία καινοτόμα, καλά σχεδιασμένη συνάρτηση χρησιμότητας, η οποία αντανακλά την αποτελεσματικότητα της απόδοσης του χρήστη, όσον αφορά τη λαμβανόμενη από αυτόν ποιότητα υπηρεσίας, η οποία καθορίζεται από δύο βασικές παραμέτρους:

- το επίπεδο, στο οποίο είναι συνδεδεμένος ο χρήστης (φεμτο-κυψέλη ή μακρο-κυψέλη), αλλά και τον τύπο υπηρεσίας που ζητά, στην πρώτη προσέγγιση
- τον ελάχιστο απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, για τη δεύτερη προσέγγιση

Τότε, θα διατυπώσουμε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης για την επιλογή κυψέλης που στοχεύει στη μεγιστοποίηση της απόδοσης του κάθε χρήστη, θα ορίσουμε τη συνάρτηση δυναμικού του παιγνίου της πρώτης προσέγγισης και θα αποδείξουμε την ύπαρξη μίας κατάστασης ισορροπίας στο διπλό πρόβλημα για όλους τους χρήστες που βρίσκονται στο διεπίπεδο δίκτυο φεμτο-κυψελών.

Κεφάλαιο 4: Ακόμη, θα προτείνουμε έναν μη συνεργατικό αλγόριθμο επιλογής κυψέλης, βασισμένο στη διαδικασία εκμάθησης για κάθε μία εκ των δύο προσεγγίσεων. Επιπλέον, θα εξαγάγουμε αντίστοιχα αναλυτικά αριθμητικά αποτελέσματα που καταδεικνύουν την αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης προσέγγισης.

Κεφάλαιο 5: Τέλος, θα συνοψίσουμε την εργασία και τη συνεισφορά της στην τρέχουσα έρευνα και βιβλιογραφία.

2. Θεωρητική προσέγγιση με χρήση της θεωρίας παιγνίων

Σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα, όλα τα κινητά τερματικά ανταγωνίζονται για την απόκτηση ραδιοπόρων. Στο πλαίσιο αυτό, η συνολική βέλτιστη λύση δεν είναι και αυτή, την οποία όλα τα κινητά τερματικά επιθυμούν να επιτύχουν. Αν ο πρωταρχικός στόχος είναι η μεγιστοποίηση του γενικού ρυθμού απόδοσης δεδομένων συνολικά του ετερογενούς δικτύου, η λύση του παιγνίου σε πολλές περιπτώσεις δεν αναμένεται να αποτελεί και μία ικανοποιητική λύση και για όλα τα κινητά τερματικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί ο ρυθμός απόδοσης δεδομένων, το σύστημα αυτό θα απονεμίει περισσότερους πόρους σε αυτά τα κινητά τερματικά που παρουσιάζουν καλές συνθήκες ραδιοδιαύλου και επομένως μπορεί να μην καταφέρει να επιτρέψει στα κινητά τερματικά με δυσμενέστερες συνθήκες διαύλου να αποκτήσουν επαρκείς πόρους ή ικανοποιητικές υπηρεσίες.

Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος, θα πρέπει να εισαχθεί η μη συνεργατική θεωρία παιγνίων (non-cooperative game theory) στη μελέτη του προβλήματος της επιλογής πρόσβασης στα ετερογενή ασύρματα δίκτυα. Σε αυτά τα ετερογενή ασύρματα δίκτυα, κάθε κινητό τερματικό θα επιλέξει αυτό το δίκτυο που θα του παράσχει τον μεγαλύτερο ρυθμό πρόσβασης για το ίδιο και ως εκ τούτου όλα τα κινητά τερματικά θα συμπεριφέρονται ορθολογικά.

Στη μη συνεργατική θεωρία παιγνίων, η βασική ιδέα συμπεριλαμβάνει παίκτες, στρατηγικές, ενέργειες, αποδόσεις, αποτελέσματα και σημεία ισορροπίας [4].

2.1. Στρατηγικά παίγνια

Ένα στρατηγικό παίγνιο (strategic game) είναι ένα μοντέλο αλληλεπίδρασης, στο οποίο ο κάθε παίκτης επιλέγει μία ενέργεια (action), χωρίς να έχει όμως ενημερωθεί για τις ενέργειες των υπόλοιπων παικτών και χωρίς να υπάρχει συνεργασία μεταξύ των παικτών. Μπορούμε να αντιληφθούμε τις ενέργειες των παικτών σαν να αποφασίζονται ταυτόχρονα. Παρά το γεγονός ότι οι παίκτες δεν έχουν πληροφορηθεί

σχετικά με τις ενέργειες των υπολοίπων, μπορούν να «γνωρίζουν» ποιες θα είναι αυτές, με βάση την πρότερη εμπειρία τους. Για το λόγο αυτό, χρειάζεται να προσδιοριστεί

- ποιος εμπλέκεται (παίκτες)
- τι μπορεί να κάνει (ενέργειες)
- τις προτιμήσεις καθενός σχετικά με τα πιθανά αποτελέσματα (συνάρτηση χρησιμότητας)

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, ο τύπος των παιγνίων που θα εξετάσουμε είναι τα μη συνεργατικά, όπου οι παίκτες λαμβάνουν τις αποφάσεις τους ανεξάρτητα και με κατανομημένο τρόπο. Έτσι, παρόλο που οι παίκτες θα μπορούσαν να συνεργαστούν, κάθε συνεργασία θα πρέπει να είναι αυτο-επιβαλλόμενη, το οποίο σημαίνει ότι οι παίκτες αντιδρούν εγωιστικά και επομένως αναφέρονται ως εγωιστές παίκτες (selfish agents).

Οι **παίκτες** που ανήκουν στο σύνολο $\mathcal{M} = \{1, 2, \dots, n\}$ είναι αυτοί που λαμβάνουν τις αποφάσεις στο μοντελοποιημένο παίγνιο και πάντοτε επιλέγουν τις στρατηγικές τους με στόχο τη μεγιστοποίηση του κέρδους τους.

Η **στρατηγική** ενός παίκτη αναφέρεται σε μία από τις εναλλακτικές από τις οποίες μπορούν να επιλέξουν σε περιβάλλον όπου το αποτέλεσμα εξαρτάται όχι μόνο από τις δικές του πράξεις, αλλά και από τις πράξεις των υπολοίπων [11]. Η στρατηγική ενός παίκτη θα καθορίσει την ενέργεια που θα εκτελέσει ο κάθε παίκτης σε κάθε στάδιο του παιγνίου. Η ιδέα της στρατηγικής μερικές φορές (λανθασμένα) συγχέεται με την ιδέα της κίνησης. Η κίνηση είναι μία ενέργεια που εκτελείται από έναν παίκτη σε κάποια χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια ενός παιχνιδιού. Η στρατηγική, από την άλλη πλευρά, είναι ένας πλήρης αλγόριθμος που ακολουθεί ένας παίκτης για να παίξει ένα παίγνιο, υποδεικνύοντάς του τι να κάνει για κάθε δυνατή κατάσταση καθ' όλο το παίγνιο.

Το σύνολο στρατηγικών S_i ενός παίκτη προσδιορίζει ποιες στρατηγικές είναι διαθέσιμες για να ακολουθήσει. Ένας παίκτης λέγεται ότι έχει ένα **πεπερασμένο σύνολο στρατηγικών**, αν έχει έναν αριθμό διακριτών διαθέσιμων στρατηγικών. Ακόμη, ορίζουμε το σύνολο των στρατηγικών προφίλ ή περιγραμμάτων στρατηγικών (strategy profiles), όπως φαίνεται παρακάτω

$$S = S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n$$

Ένα **στρατηγικό προφίλ** ή **περίγραμμα στρατηγικής** $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in S$ είναι ένα σύνολο στρατηγικών για όλους τους παίκτες που προσδιορίζει πλήρως όλες τις

ενέργειες μέσα σε ένα παίγνιο. Ένα στρατηγικό προφίλ θα πρέπει να περιλαμβάνει μία και μόνο μία στρατηγική για κάθε παίκτη. Αν $x_i \in S_i$ είναι το στρατηγικό προφίλ του παίκτη $i \in \mathcal{M}$, τότε $\mathbf{x}_{-i} = (x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)$ είναι το στρατηγικό προφίλ όλων των παικτών, εκτός του παίκτη i .

Μία ιδέα κρίσιμης σημασίας προκειμένου να κατανοήσουμε τα στρατηγικά παίγνια είναι αυτή της **συνάρτησης χρησιμότητας (utility function ή payoff function)** $U_i(\mathbf{x})$. Σε οποιοδήποτε παίγνιο, η συνάρτηση χρησιμότητας αναπαριστά τα κίνητρα ενός παίκτη. Μία συνάρτηση χρησιμότητας για έναν δεδομένο παίκτη αναθέτει μία τιμή για κάθε δυνατό αποτέλεσμα του παιγνίου με την ιδιότητα ότι μία υψηλότερη τιμή συνεπάγεται ότι το αποτέλεσμα είναι περισσότερο επιθυμητό [12]. Έτσι, όταν κάθε παίκτης $i \in \mathcal{M}$ επιλέξει μία στρατηγική $x_i \in S_i$, οπότε καταλήγουμε σε ένα στρατηγικό προφίλ $\mathbf{x} \in S$, τότε ο παίκτης i επιτυγχάνει τιμή της συνάρτησης χρησιμότητας $U_i(\mathbf{x})$, που εξαρτάται όχι μόνο στη στρατηγική που επιλέχθηκε από τον παίκτη i , αλλά και από αυτήν που επέλεξαν όλοι οι υπόλοιποι παίκτες. Δεδομένου του στρατηγικού προφίλ \mathbf{x} , συμβολίζουμε το σύνολο των συναρτήσεων χρησιμότητας για όλους τους χρήστες ως ακολούθως

$$U = (U_1(\mathbf{x}), U_2(\mathbf{x}), \dots, U_n(\mathbf{x}))$$

Το ερώτημα που εγείρεται είναι το εξής: Τι ενέργειες θα επιλέξουν οι παίκτες σε ένα στρατηγικό παίγνιο; Υποθέτουμε ότι ο κάθε παίκτης έχει επαρκή εμπειρία: έχει παίξει το δεδομένο παίγνιο, ή παρόμοια παίγνια, πολλές φορές στο παρελθόν και έχει μία καλή ιδέα σχετικά με το ποιες ενέργειες θα επιλέξουν οι υπόλοιποι παίκτες. Σε μία σταθερή κατάσταση, όπου ο κάθε παίκτης έχει μία καλή ιδέα σχετικά με τις ενέργειες των υπόλοιπων παικτών, η ενέργεια του κάθε παίκτη θα πρέπει να είναι βέλτιστη, δεδομένων των ενεργειών των υπόλοιπων παικτών.

Η **ισορροπία Nash** στη θεωρία παιγνίων είναι μία μεθοδολογία λύσης ενός μη συνεργατικού παιγνίου που εμπλέκει δύο ή περισσότερους παίκτες, στο οποίο κάνουμε την υπόθεση ότι κάθε παίκτης γνωρίζει τις στρατηγικές ισορροπίας των υπόλοιπων παικτών και κανένας παίκτης δεν μπορεί να βελτιώσει τα κέρδη του με τη μονομερή και ανεξάρτητη μεταβολή της στρατηγικής του [13]. Αν κάθε παίκτης έχει επιλέξει μία στρατηγική και κανένας παίκτης δεν μπορεί να επωφεληθεί μεταβάλλοντας τη στρατηγική του, ενώ οι υπόλοιποι παίκτες διατηρήσουν τις δικές τους στρατηγικές

αμετάβλητες, τότε το τρέχον σύνολο των στρατηγικών επιλογών και οι αντίστοιχες αποδόσεις συνιστούν ένα σημείο ισορροπίας Nash.

Ο παραπάνω ορισμός δεν συνεπάγεται ωστόσο ούτε ότι ένα στρατηγικό παίγνιο έχει απαραίτητα ένα σημείο ισορροπίας Nash, ούτε και ότι έχει κατά μέγιστον ένα. Μερικά παίγνια δεν διαθέτουν κανένα σημείο ισορροπίας, ενώ άλλα διαθέτουν περισσότερα από ένα σημεία ισορροπίας.

Για να ορίσουμε και επίσημα την έννοια του σημείου ισορροπίας Nash, αναπαριστούμε ένα στρατηγικό παίγνιο ως την ακόλουθη τριάδα

$$G = (\mathcal{M}, S, U)$$

Ένα στρατηγικό προφίλ $x^* \in S$ είναι ένα σημείο ισορροπίας Nash, αν δεν υπάρχει καμία μονομερής απόκλιση στη στρατηγική από έναν μόνο παίκτη που να αποδίδει κέρδος για τον παίκτη αυτό, δηλαδή

$$U_i(x_i^*, x_{-i}^*) \geq U_i(x_i, x_{-i}^*), \quad \forall i \in \mathcal{M}, x_i \in S_i$$

Ένα παίγνιο μπορεί να παρουσιάζει ισορροπία Nash είτε αγνής στρατηγικής είτε μικτής στρατηγικής, δηλαδή στην πρώτη περίπτωση έναν πλήρη ορισμό του πώς θα πρέπει να ενεργήσει ένας παίκτης σε ένα παίγνιο, προσδιορίζοντας κάθε κίνηση που θα κάνει ο παίκτης για κάθε δυνατή κατάσταση που μπορεί να αντιμετωπίσει, ενώ στη δεύτερη περίπτωση μία στοχαστική επιλογή μίας αγνής στρατηγικής με μία δεδομένη πιθανότητα.

Σύμφωνα με τον Nash αποδείχθηκε ότι αν επιτρέψουμε μικτές στρατηγικές, τότε κάθε παίγνιο με πεπερασμένο πλήθος παικτών, στο οποίο κάθε παίκτης μπορεί να επιλέξει από πεπερασμένα πολλές αγνές στρατηγικές διαθέτει τουλάχιστον ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash.

Πριν τη μελέτη των εφαρμογών της θεωρίας παιγνίων στο πρόβλημα της επιλογής κυψέλης, θα πρέπει πρώτα να εξηγηθούν οι βασικές αρχές των παιγνίων Stackelberg, των παιγνίων δυναμικού, των παιγνίων συμφόρησης και της ισορροπίας Wardrop, καθώς και η κλάση των εξελικτικών παιγνίων που χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στη σύγχρονη βιβλιογραφία. Άλλωστε, η θεωρία παιγνίων δυναμικού θα αποτελέσει και το εργαλείο που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για τη θεωρητική προσέγγιση της λύσης στο παρόν πρόβλημα.

2.2. Παίγνια Stackelberg

Ένα παίγνιο Stackelberg (Stackelberg game) μπορεί να θεωρηθεί ένα παίγνιο αλληλεπίδρασης μεταξύ ενός πωλητή και ενός αγοραστή. Ο πωλητής έχει ως στόχο τη μεγιστοποίηση των κερδών του, μέσω του βέλτιστου προσδιορισμού της τιμής μίας μονάδας αγαθού για κάθε αγοραστή. Αφού ο πωλητής έχει ορίσει τη στρατηγική του, κάθε χρήστης προσπαθεί να βελτιώσει την απόδοσή του. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του πωλητή και των αγοραστών μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα παίγνιο δύο επιπέδων [14].

Υπάρχουν μερικοί περαιτέρω περιορισμοί για την τεκμηρίωση ενός σημείου ισορροπίας κατά Stackelberg. Ο αρχηγός (leader) του παιγνίου θα πρέπει να γνωρίζει εκ των προτέρων ότι ο ακόλουθος ή οπαδός (follower) παρατηρεί τη δραστηριότητά του και τις ενέργειές του. Ο ακόλουθος δεν θα πρέπει να έχει κανέναν τρόπο να πραγματοποιήσει μελλοντικά μία ενέργεια που δεν θα αρμόζει σε έναν ακόλουθο παιγνίου Stackelberg, πράγμα το οποίο ο ηγέτης θα πρέπει να γνωρίζει. Πράγματι, αν ο ακόλουθος μπορούσε να πραγματοποιήσει μία ενέργεια που αντιστοιχεί σε ηγέτη παιγνίου Stackelberg και ο ηγέτης του τρέχοντος παιγνίου το γνώριζε, τότε η βέλτιστη απόκριση του ηγέτη θα ήταν να δρα ως οπαδός παιγνίου Stackelberg [15].

Για να παραθέσουμε ένα αντίστοιχο παράδειγμα, σε ένα παίγνιο Stackelberg, δύο εταιρείες προσφέρουν το ίδιο προϊόν χωρίς διαφοροποιήσεις με γνωστή ζήτηση. Οι εταιρείες θα πρέπει να ανταγωνιστούν μεταξύ τους, επιλέγοντας την ποσότητα της τελικής παραγωγής, Q_1 και Q_2 , αλλά μία από τις δύο εταιρείες θα πρέπει να ξεκινήσει πρώτη. Η εταιρεία 2 μπορεί να παρατηρεί τι έχει επιλέξει η εταιρεία 1 για την ποσότητα της παραγωγής Q_1 και να επιλέξει την ποσότητα Q_2 κατά τέτοιον τρόπο, ώστε να μεγιστοποιήσει τα κέρδη της. Παράλληλα, η εταιρεία 1 γνωρίζει ότι η εταιρεία 2 θα ακολουθήσει τη στρατηγική της, γεγονός που συνάγει βασιζόμενη στον οικονομικό ορθολογισμό της άλλης εταιρείας.

Σε ένα μοντέλο Stackelberg, επιτυγχάνεται ισορροπία όταν η εταιρεία 1 προληπτικά αυξάνει την παραγωγή της και εξασφαλίζει μεγαλύτερα κέρδη. Έτσι προκύπτει ο όρος «πλεονέκτημα του πρώτου παίκτη». Πράγματι, η εταιρεία 2 αναγκάζεται να περιορίσει την παραγωγή δεδομένου ότι ο ηγέτης, δηλαδή η εταιρεία 1, έχει ήδη παραγάγει μεγάλη ποσότητα προϊόντος («Αφού εγώ παράγω περισσότερα, θα αντιδράσεις παράγοντας λιγότερα») [16].

2.3. Παίγνια δυναμικού

Στη θεωρία παιγνίων, ένα παίγνιο λέγεται ότι είναι παίγνιο δυναμικού (potential game) όταν το κίνητρο όλων των παικτών να μεταβάλουν τη στρατηγική τους μπορεί να εκφραστεί μέσω της χρήσης μίας μοναδικής και καθολικής συνάρτησης που ονομάζουμε συνάρτηση δυναμικού (potential function). Η ιδέα αυτή προτάθηκε το 1973 από τον Robert W. Rosenthal.

Έκτοτε έχουν αποτελέσει αντικείμενο μελέτης οι ιδιότητες των διαφόρων τύπων παιγνίων δυναμικού. Τα παίγνια μπορεί να είναι είτε τακτικά (ordinal potential games) είτε απόλυτα (cardinal potential games). Στα τελευταία, η διαφορά μεταξύ των επιμέρους αποδόσεων για κάθε παίκτη από τη μονομερή και ανεξάρτητη μεταβολή της στρατηγικής του *ceteris paribus* (δηλ. κρατώντας όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους και συνθήκες σταθερές) θα πρέπει να δώσει την ίδια τιμή με τη διαφορά τιμών που θα έδινε η καθολική συνάρτηση δυναμικού. Στα τακτικά, από την άλλη, μόνο τα πρόσημα των διαφορών οφείλουν να είναι τα ίδια.

Η συνάρτηση δυναμικού είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την ανάλυση των ιδιοτήτων ισορροπίας των παιγνίων, αφού τα κίνητρα όλων των παικτών αντιστοιχίζονται σε μία συνάρτηση, ενώ το σύνολο των σημείων ισορροπίας κατά Nash αγνής στρατηγικής μπορούν να εντοπιστούν με την εύρεση των τοπικών μεγίστων της συνάρτησης δυναμικού. Η σύγκλιση και η σύγκλιση σε πεπερασμένο χρόνο ενός επαναληπτικού παιγνίου προς ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash μπορεί να γίνει κατανοητή με τη μελέτη της συνάρτησης δυναμικού.

Μία συνάρτηση $\Phi: S \rightarrow \mathbb{R}$ είναι ένα **ακριβές δυναμικό** για το παίγνιο \mathcal{G} , αν η αλλαγή που υφίσταται η απόδοση του παίκτη i ισούται ακριβώς με την αλλαγή που υφίσταται η καθολική συνάρτηση δυναμικού:

$$\Phi(b_i, \mathbf{a}_{-i}) - \Phi(a_i, \mathbf{a}_{-i}) = U_i(b_i, \mathbf{a}_{-i}) - U_i(a_i, \mathbf{a}_{-i}), \forall \mathbf{a} \in S, \forall a_i, b_i \in S_i$$

Το αντίστοιχο παίγνιο θα είναι απόλυτο (cardinal potential game).

Κατ' ανάλογο τρόπο, μία συνάρτηση $\Phi: S \rightarrow \mathbb{R}$ είναι ένα **τακτικό** δυναμικό για ένα ελάχιστο παίγνιο \mathcal{G} (minimum game), αν

$$\Phi(b_i, \mathbf{a}_{-i}) - \Phi(a_i, \mathbf{a}_{-i}) < 0 \implies U_i(b_i, \mathbf{a}_{-i}) - U_i(a_i, \mathbf{a}_{-i}) < 0, \forall \mathbf{a} \in S, \forall a_i, b_i \in S_i$$

ενώ το αντίστοιχο θα πρέπει να ισχύει για ένα μέγιστο παίγνιο (maximum game). Η συνάρτηση αυτή αντιστοιχεί σε ένα τακτικό παίγνιο (ordinal potential game). Όπως μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε, ένα ακριβές δυναμικό αποτελεί ταυτόχρονα και ένα τακτικό δυναμικό.

Αναλυτικά, τα παίγνια δυναμικού είναι το μέσο για την παρουσίαση με ενιαίο τρόπο, μέσω της συνάρτησης δυναμικού, των αποκλίσεων από τις ενέργειες του οποιουδήποτε χρήστη σε ένα διεπίπεδο ασύρματο δίκτυο φεμτο-κυψελών. Ακόμη, πρέπει να σημειωθεί ότι από τον παραπάνω ορισμό, προκύπτει ότι είναι δυνατό να υπάρχουν πολλές συναρτήσεις δυναμικού για το ίδιο παίγνιο. Ωστόσο, η διαφορά μεταξύ οποιωνδήποτε δύο συναρτήσεων δυναμικού για το ίδιο παίγνιο θα πρέπει να είναι μία σταθερά [17].

Όλα τα παίγνια δυναμικού έχουν την ιδιότητα του **πεπερασμένου μονοπατιού βελτίωσης (finite improvement path)**, η οποία χρησιμοποιείται για να αποδείξουμε ύπαρξη ενός σημείου ισορροπίας κατά Nash, καθώς και για να δείξουμε πώς μπορεί να επιτευχθεί ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash από ένα σύνολο παικτών. Για να αντιληφθούμε την παραπάνω πρόταση, υποθέτουμε ότι όλοι οι παίκτες ενεργούν σειριακά, επιλέγοντας τις ενέργειές τους ένας κάθε φορά, έχοντας βέβαια τη δυνατότητα να παρατηρήσουμε το αποτέλεσμα (παρεμβολή, εύρος ζώνης, ρυθμός μετάδοσης, κλπ.) που προέκυψε από τις ενέργειες απονομής πόρων που εκτέλεσαν οι υπόλοιποι παίκτες. Τότε, αν ένας παίκτης i έχει μία καλύτερη απόκριση x'_i που δίνει μεγαλύτερη απόδοση, μπορεί να αυξήσει την απόδοσή του κατά $U_i(x'_i, \mathbf{x}_{-i}) - U_i(x_i, \mathbf{x}_{-i})$, το οποίο ισούται ακριβώς με την αντίστοιχη αύξηση στο δυναμικό του παιγνίου. Θα πρέπει να γίνει φυσικά η παραδοχή ότι η απονομή πόρων από τους άλλους παίκτες, \mathbf{x}_{-i} , θα πρέπει να παραμένει σταθερή κατά το διάστημα προσαρμογής του παίκτη i . Τώρα, αν κάποιος άλλος παίκτης j διαθέτει κάποια απόκριση που αποδίδει περισσότερο στην υποψήφια νέα κατάσταση, τότε θα αυξήσει περαιτέρω το καθολικό δυναμικό Φ , βελτιώνοντας ταυτόχρονα και τη δική του απόδοση. Καθώς το πλήθος των παικτών, όπως επίσης και το μέγεθος των συνόλων των δυνατών ενεργειών τους, είναι πεπερασμένα, η διαδικασία σειριακής βελτίωσης (sequential improvement process) θα πρέπει να φτάσει σε μία κατάσταση, όπου κανένας παίκτης δεν είναι δυνατό να βελτιώσει τη συνάρτηση χρησιμότητάς του μέσω μονομερούς μεταβολής της ενέργειάς του από x_i σε x'_i , θεωρώντας ως σταθερές όλες τις υπόλοιπες ενέργειες, το οποίο αποτελεί και τον ορισμό του σημείου ισορροπίας Nash [18].

Η εγωιστική συμπεριφορά των παικτών δεν τους επιτρέπει να προσαρμοστούν σε μία κατανομή πόρων που δίνει χαμηλότερη απόδοση, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα τη μονοτονική αύξηση σε κάθε γύρο. Έτσι εμποδίζονται αποτελεσματικά οι κύκλοι στην κατανομημένη διαδικασία κατανομής πόρων από το να φτάσει περισσότερες από μία φορές σε ένα προφίλ κατανομής που δεν αποτελεί σημείο ισορροπίας [3].

2.4. Παίγνια συμφόρησης

Παίγνιο συμφόρησης (congestion game) ονομάζουμε ένα παίγνιο με n παίκτες, στο οποίο η στρατηγική κάθε παίκτη αποτελείται από ένα σύνολο πόρων και το κόστος του συνόλου της στρατηγικής εξαρτάται μόνο από το πλήθος των παικτών που χρησιμοποιούν τον κάθε πόρο, π.χ. το κόστος είναι της μορφής $\sum_e d_e(x_e(s))$, όπου $x_e(s)$ είναι το πλήθος των παικτών που χρησιμοποιούν τον πόρο e και d_e είναι μία μη αρνητική αύξουσα συνάρτηση. Ένα κλασικό παράδειγμα είναι τα παίγνια συμφόρησης ενός δικτύου σε έναν κατευθυνόμενο γράφο (π.χ. δρόμος ή δίκτυο μεταφορών), στο οποίο κάθε παίκτης θα πρέπει να επιλέξει μία διαδρομή από μία πηγή προς έναν προορισμό και σε κάθε ακμή έχει αποδοθεί μία συνάρτηση «καθυστερήσης», η οποία αυξάνεται με το πλήθος των παικτών που χρησιμοποιούν την ακμή. Είναι ευρέως γνωστό ότι το παίγνιο επιδέχεται συνάρτηση δυναμικού

$$\Phi(s) = - \sum_e \int_0^{x_e(s)} d_e(z) dz$$

Η τιμή του s που μεγιστοποιεί την τιμή της $\Phi(s)$ αποτελεί σημείο ισορροπίας κατά Nash [19].

Τα παίγνια συμφόρησης είναι μία ειδική περίπτωση των παιγνίων δυναμικού. Ο Rosenthal απέδειξε ότι οποιοδήποτε παίγνιο συμφόρησης είναι ταυτόχρονα και παίγνιο δυναμικού, ενώ ο Monderer και ο Shapley απέδειξαν το αντίστροφο: για κάθε παίγνιο δυναμικού, υπάρχει ένα παίγνιο συμφόρησης με την ίδια συνάρτηση δυναμικού.

Για παράδειγμα, θεωρούμε ένα κυκλοφοριακό δίκτυο, όπου δύο παίκτες προέρχονται από ένα σημείο O και πρέπει να φτάσουν στο σημείο T . Υποθέτουμε ακόμη ότι ο κόμβος O είναι συνδεδεμένος με τον κόμβο T μέσω των σημείων σύνδεσης A και B , όπου το A βρίσκεται λίγο πιο κοντά απ' ό,τι το B (δηλ. το A είναι πιο πιθανό να επιλεγεί από τον παίκτη). Ωστόσο, και τα δύο σημεία σύνδεσης εύκολα μπορούν να

συμφορηθούν, το οποίο σημαίνει ότι όσο περισσότεροι παίκτες περνούν από ένα σημείο, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η καθυστέρηση που θα υποστεί ο κάθε παίκτης. Έτσι, υποχρεώνοντας και τους δύο παίκτες να περάσουν από το ίδιο σημείο σύνδεσης θα προκαλέσει επιπλέον καθυστέρηση. Ένα επιθυμητό αποτέλεσμα στο παίγνιο αυτό θα είναι ο συντονισμός των δύο παικτών, έτσι ώστε να περάσουν από διαφορετικά σημεία σύνδεσης [20].

Σε έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί για το διαμοιρασμό της κίνησης, τα μοντέλα ισορροπίας του δικτύου χρησιμοποιούνται ευρέως για την πρόβλεψη των προτύπων κίνησης σε δίκτυα μεταφορών που μπορούν να υποστούν συμφόρηση. Το 1952, ο Wardrop διατύπωσε δύο βασικές αρχές που προσδιορίζουν αυτήν την ιδέα της ισορροπίας και εισήγαγε την υπόθεση της εναλλακτικής συμπεριφοράς με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους μετακίνησης.

Η πρώτη αρχή του Wardrop έχει ως εξής: «Ο χρόνος ταξιδιού σε όλους τους δρόμους που χρησιμοποιούνται είναι ίσος ή και μικρότερος από αυτόν που θα αντιμετώπιζε ένα οποιοδήποτε όχημα σε έναν δρόμο που δεν χρησιμοποιείται.» Κάθε χρήστης μη συνεργατικά προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει το κόστος μεταφοράς του. Οι ροές της κίνησης που ικανοποιούν αυτήν την αρχή αναφέρονται συνήθως σαν ροές ισορροπίας του χρήστη ή ροές **ισορροπίας Wardrop**, αφού κάθε χρήστης επιλέγει τον δρόμο που είναι καλύτερος για αυτόν. Ειδικότερα, μπορεί να επιτευχθεί ένα σημείο ισορροπίας βελτιστοποιημένο για τον κάθε χρήστη, όταν κανένας χρήστης δεν μπορεί να μειώσει το κόστος της διαδρομής του μέσω κάποιας μονομερούς ενέργειας.

Σύμφωνα με τη δεύτερη αρχή του Wardrop: «Υπό συνθήκες ισορροπίας, ο μέσος χρόνος ταξιδιού είναι ελάχιστος.» Αυτό συνεπάγεται ότι κάθε χρήστης συμπεριφέρεται συνεργατικά στην επιλογή του δρόμου που θα ακολουθήσει, ώστε να εξασφαλίσει ότι θα έχει διαλέξει την πιο αποτελεσματική χρήση ολόκληρου του συστήματος. Οι ροές κίνησης που ικανοποιούν τη δεύτερη αρχή του Wardrop θεωρούνται γενικά ως βέλτιστες για το σύστημα [21].

2.5. Εξελικτική θεωρία παιγνίων

Η κλασική θεωρία παιγνίων ουσιαστικά προϋποθέτει ότι όλοι οι παίκτες κάνουν ορθολογιστικές επιλογές, δηλ. ότι πραγματοποιούν τις στρατηγικές τους επιλογές βασιζόμενοι σε μία πλήρως ορθολογιστικά προσδιορισμένη εκτίμηση των πιθανών

αποτελεσμάτων. Κατά συνέπεια, είναι θεμελιώδους σημασίας στη θεωρία παιγνίων για τον κάθε παίκτη να λάβει υπόψη του τη στρατηγική ανάλυση που θα ακολουθήσουν οι αντίπαλοι του χρήστη κατά τον προσδιορισμό του αν οι στρατηγικές του επιλογές είναι τελικά κατάλληλες [22].

Ωστόσο, οι βασικές έννοιες της θεωρίας παιγνίων μπορούν να εφαρμοστούν ακόμη και σε περιπτώσεις, στις οποίες κανένας συμμετέχων δεν δρα καθαρά ορθολογιστικά και δεν λαμβάνει καν σαφείς αποφάσεις. Τότε η θεωρητική ανάλυση με βάση τη θεωρία παιγνίων μπορεί να εφαρμοστεί σε περιβάλλοντα, στα οποία τα άτομα μπορούν να επιδείξουν διάφορες μορφές συμπεριφοράς (συμπεριλαμβανομένων εκείνων που μπορεί να μην συνιστούν αποτέλεσμα συνειδητών επιλογών) και έτσι θα υπολογίσουμε ποιες μορφές συμπεριφοράς έχουν τη δυνατότητα να επιβιώνουν μέσα στον πληθυσμό, καθώς και ποιες μορφές συμπεριφοράς έχουν την τάση να απωθούνται από άλλους.

Όπως υποδεικνύει και το όνομά της, αυτή η προσέγγιση έχει εφαρμοστεί ευρέως στο πεδίο της εξελικτικής βιολογίας, το οποίο βασίζεται στην ιδέα ότι τα γονίδια ενός οργανισμού προσδιορίζουν κατά μείζονα λόγο τα παρατηρήσιμα χαρακτηριστικά του και κατ' επέκταση την ποιότητα (fitness) μέσα σε ένα δεδομένο περιβάλλον. Οι οργανισμοί που είναι πιο «εύρωστοι» (fit) θα τείνουν να παραγάγουν και περισσότερους απογόνους, δημιουργώντας έτσι γονίδια που παρέχουν μεγαλύτερη ποιότητα, ώστε να αυξήσουν την εκπροσώπησή τους στον πληθυσμό. Κατ' αυτόν τον τρόπο, πιο εύρωστα γονίδια τείνουν να επικρατούν στο πέρασμα του χρόνου, επειδή παρουσιάζουν υψηλότερα ποσοστά αναπαραγωγής.

Η ιδέα σε ένα εξελικτικό περιβάλλον που παρουσιάζει αναλογίες με την ισορροπία Nash στην κλασική θεωρία παιγνίων είναι αυτή της **σταθερής εξελικτικής στρατηγικής (evolutionary stable strategy)** –μία γενετικά προσδιορισμένη στρατηγική που τείνει να επιβιώνει από τη στιγμή που είναι η επικρατούσα (prevalent) σε έναν πληθυσμό. Λέμε ότι μία δεδομένη στρατηγική είναι εξελικτικά σταθερή (evolutionary stable) αν, όταν ολόκληρος ο πληθυσμός ακολουθεί αυτήν τη στρατηγική, οποιαδήποτε μικρή ομάδα εισβολέων χρησιμοποιεί διαφορετική στρατηγική σταδιακά θα εξαφανιστεί μετά από μερικές γενεές. Μπορούμε να συλλάβουμε την έννοια αυτή σε όρους απόλυτης αριθμητικής απόδοσης, λέγοντας ότι όταν ολόκληρος ο πληθυσμός χρησιμοποιεί μία στρατηγική S , τότε μία μικρή ομάδα εισβολέων που ακολουθούν οποιαδήποτε εναλλακτική στρατηγική T , θα πρέπει να έχει αυστηρά χαμηλότερη ποιότητα από αυτήν των χρηστών που ακολουθούν την κυριαρχούσα στρατηγική S .

Με μεγαλύτερη ακρίβεια, μπορούμε να διατυπώσουμε μερικούς βασικούς ορισμούς ως ακολούθως:

Ποιότητα (fitness) ενός οργανισμού εντός ενός πληθυσμού είναι η αναμενόμενη απόδοση που λαμβάνει από μία αλληλεπίδραση με ένα τυχαίο τμήμα ενός πληθυσμού.

Μία στρατηγική T εισβάλλει (invades) σε μία στρατηγική S σε επίπεδο x για κάποιον μικρό θετικό αριθμό x , αν ένα ποσοστό x του συνολικού πληθυσμού ακολουθεί τη στρατηγική T και ένα ποσοστό $1 - x$ του συνολικού πληθυσμού ακολουθεί τη στρατηγική S .

Μία στρατηγική S είναι **εξελικτικά σταθερή (evolutionary stable)** αν υπάρχει ένας (μικρός) θετικός αριθμός y , τέτοιος ώστε όταν μία οποιαδήποτε άλλη στρατηγική T εισβάλλει στη στρατηγική S σε ένα οποιοδήποτε επίπεδο $x < y$, η ποιότητα του οργανισμού που ακολουθεί τη στρατηγική S είναι αυστηρά μεγαλύτερη από την ποιότητα ενός οργανισμού που ακολουθεί στρατηγική T [23].

Η **δυναμική του αντιγραφέα (replicator dynamics)** μοντελοποιεί τον ρυθμό μεταβολής της στρατηγικής, ο οποίος μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως:

$$\dot{x}_i(t) = x_i(t)(\pi_i(t) - \pi(t))$$

όπου

x_i : το ποσοστό των παικτών που επιλέγουν τη στρατηγική i

$\pi_i(t)$: η απόδοση των παικτών που επιλέγουν τη στρατηγική i

$\pi(t)$: η μέση απόδοση ολόκληρου του πληθυσμού

Κατά συνέπεια, η εξελικτική ισορροπία (evolutionary equilibrium) ορίζεται ως το σύνολο των σημείων σταθερής ισορροπίας της δυναμικής του αντιγραφέα, όπου οι αποδόσεις για όλους τους χρήστες είναι πανομοιότυπες και κανένας παίκτης δεν πρόκειται να αλλάξει την τρέχουσα στρατηγική του, επειδή το ποσοστό μεταβολής των στρατηγικών είναι μηδενικό ($\dot{x}_i = 0, \forall i$) [24].

Υπάρχουν δύο κύρια πλεονεκτήματα που μας προσφέρει η εξελικτική θεωρία παιγνίων όσον αφορά την επίλυση του προβλήματος ελέγχου ισχύος και ελέγχου πολλαπλής πρόσβασης:

- Παρέχει την ισχυρότερη μορφή ισορροπίας, την εξελικτικά σταθερή στρατηγική, η οποία μας επιτρέπει να αναγνωρίσουμε την ευρωστία έναντι αποκλίσεων περισσότερων του ενός κινητών και

- μας επιτρέπει να εφαρμόσουμε τη θεωρία γενικής σύγκλισης της δυναμικής των εξελικτικών παιγνίων, καθώς και τα αντίστοιχα αποτελέσματα σταθερότητας [25].

2.6. Βιβλιογραφικά παραδείγματα

2.6.1. Αποκεντρωμένος συντονισμός διακυψελικής παρεμβολής από αποφάσεις αυτόνομης επαναχρησιμοποίησης φάσματος

Σε αυτό το παράδειγμα [3], το προφίλ στρατηγικής αναπαριστά την κατανομή πόρων (π.χ. ομάδες καναλιών OFDMA) σε κάθε μία από τις κυψέλες ενός κινητού συστήματος. Η συνάρτηση χρησιμότητας $U_i(x_i, \mathbf{x}_{-i})$ αντιστοιχίζει την ενέργεια x_i του ίδιου του παίκτη, όπως επίσης και τις ενέργειες \mathbf{x}_{-i} όλων των άλλων παικτών σε κάποια πραγματική τιμή. Καθώς μία κυψέλη ενδιαφέρεται να επιλέξει τους πόρους που υφίστανται το χαμηλότερο επίπεδο παρεμβολών, η απόδοση της κυψέλης που θα πρέπει να μεγιστοποιηθεί μπορεί να οριστεί ως το αρνητικό άθροισμα της συνολικής παρεμβολής που λαμβάνεται στους πόρους που η ίδια έχει επιλέξει.

Αυτή η συνάρτηση χρησιμότητας επιδέχεται μία ακριβή συνάρτηση δυναμικού Φ που ισούται με την ολική λαμβανόμενη παρεμβολή αθροισμένη σε όλους τους αλληλοπαρεμβάλλοντες διαύλους:

$$\Phi(x_i, \mathbf{x}_{-i}) = \sum_{i=1}^n U_i(x_i, \mathbf{x}_{-i})$$

Για να επαληθεύσουμε ότι η συνάρτηση αυτή είναι πράγματι ακριβές δυναμικό, μπορούμε να θεωρήσουμε μία κυψέλη i που μονομερώς αλλάζει κάποιον πόρο k από αυτούς που μέχρι προηγουμένως του είχε απονεμηθεί σε κάποιον άλλον πόρο l . Μη χρησιμοποιώντας πλέον τον πόρο k , η συνολική παρεμβολή που λαμβάνεται από όλες τις υπόλοιπες κυψέλες ισούται ακριβώς με το άθροισμα των βελτιώσεων στο επίπεδο παρεμβολών που αντιλαμβάνονται όλες οι υπόλοιπες κυψέλες που χρησιμοποιούν τον ίδιο πόρο, λόγω της αποχής της κυψέλης i από τη χρήση του πόρου k στο μέλλον. Την ίδια στιγμή, το χαμηλότερο επίπεδο παρεμβολών που αντιλαμβάνεται τώρα η κυψέλη i ισούται ακριβώς με το άθροισμα των επιπλέον παρεμβολών που προσθέτει σε όλες τις υπόλοιπες κυψέλες που χρησιμοποιούν τον ίδιο πόρο l .

2.6.2. Επιλογή δικτύου σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα με χρήση αυτομάτων εκμάθησης

Το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται στο [26] είναι η επιλογή ενός συγκεκριμένου δικτύου για να συνδεθούμε, ενώ η μεταβλητή x_i συμβολίζει τη στρατηγική επιλογής δικτύου του χρήστη i . Η συνάρτηση χρησιμότητας για τον κάθε χρήστη ορίζεται ως

$$U_i(x_i, x_{-i}) = \sum_{i=1}^n R_i + \sum_{j=1}^N \beta_j \cdot (K_j - SUM_j)$$

όπου

R_i : ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για τον χρήστη i

β_j : ένα μη αρνητικό βαθμωτό μέγεθος του δικτύου j , του οποίου η μονάδα μέτρησης ορίζεται ως bps

K_j : το σύνολο των κατηγοριών υπηρεσιών του δικτύου j

SUM_j : ο συνολικός αριθμός των χρηστών που είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο j

Αν ορίσουμε μία συνάρτηση δυναμικού ως

$$\Phi(x_i, x_{-i}) = R_i + \sum_{j=1}^N \beta_j \cdot (K_j - SUM_j)$$

τότε μπορεί να αποδειχθεί ότι το παίγνιο είναι παίγνιο δυναμικού με συνάρτηση δυναμικού Φ .

2.6.3. Παιγνιοθεωρητικό μοντέλο και ύπαρξη περιπτώσεων ωφέλιμων για όλους (win-win) σε φεμτο-κυψελωτά δίκτυα

Το πρόβλημα που προσεγγίζεται σε αυτήν τη δημοσίευση [27] είναι η επιλογή μεταξύ μίας φεμτο-κυψέλης και μίας επικαλύπτουσας μακρο-κυψέλης σε ένα διεπίπεδο δίκτυο. Αν συμβολίσουμε με m το πλήθος των χρηστών που είναι συνδεδεμένοι στη μακρο-κυψέλη, τότε η συνάρτηση χρησιμότητας μπορεί να διατυπωθεί ως ακολούθως:

$$u_i(m) = \begin{cases} u_M(m), & \text{χρήστης μακρο - κυψέλης} \\ u_F(m), & \text{χρήστης φεμτο - κυψέλης} \end{cases}$$

όπου u_M, u_F είναι συναρτήσεις απόδοσης για κάθε παίκτη που συνδέεται σε μία μακρο-κυψέλη και μία φεμτο-κυψέλη αντίστοιχα.

Η συνάρτηση δυναμικού του παιγνίου αυτού μπορεί να επιλεγεί ως ο συνδυασμός των συναρτήσεων χρησιμότητάς του

$$\Phi(m) = \sum_{i=1}^m u_F(i) + \sum_{i=m}^{n-1} u_M(i)$$

Έτσι, το ορισμένο παίγνιο επιλογής κυψέλης ανήκει στην κατηγορία των παιγνίων δυναμικού, το οποίο αποδεικνύει αυτόματα την ύπαρξη σημείου ισορροπίας κατά Nash αγνής στρατηγικής.

2.6.4. Παίγνια δυναμικής επιλογής υπηρεσίας σε ετερογενή δίκτυα μικρών κυψελών με πολλαπλούς παρόχους

Στο [28], το υπό εξέταση ζήτημα είναι οι περίπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ πελατών που ανταγωνίζονται για την επιλογή της προτιμώμενης από αυτούς ασύρματης υπηρεσίας, καθώς και μεταξύ παρόχων που αναζητούν τρόπους βελτιστοποίησης των κερδών τους, ανάλογα με τη συμπεριφορά και τις επιλογές των πελατών τους. Το πρόβλημα μοντελοποιείται σαν παίγνιο Stackelberg με τους παρόχους να ενεργούν σαν ηγέτες και τους πελάτες σαν ακολούθους. Η ύπαρξη ενός σημείου ισορροπίας, δηλαδή μίας ισορροπίας Wardrop, αποδεικνύεται ότι υπάρχει ανεξάρτητα από το πλήθος των παρόχων, των υπηρεσιών που παρέχονται και των συναρτήσεων ποιότητας υπηρεσίας. Αν ένα μόνο ποσοστό των πελατών μεταβάλλουν τις στρατηγικές τους κάθε στιγμή, οι πελάτες συγκλίνουν σε αυτήν την κατάσταση ισορροπίας.

2.6.5. Παίγνια συμφόρησης για κατανομημένη επιλογή ραδιοδιαύλων σε ευρυζωνικά δίκτυα

Στο [29] η διαδικασία επιλογής διεπαφών πρόσβασης στους ραδιοπόρους (Radio Access Interfaces, RAI) μπορεί να γίνει αντιληπτή ως παίγνιο συμφόρησης, όπου οι χρήστες μοιράζονται ένα κοινό σύνολο πεπερασμένων πόρων. Το κόστος που συνεπάγεται η χρήση των πόρων για τον κάθε χρήστη εξαρτάται από την επίδραση της συμφόρησης που έχουν προκαλέσει οι υπόλοιποι χρήστες που μοιράζονται τους ίδιους πόρους. Όπως αποδεικνύεται, η ιδιότητα πεπερασμένου μονοπατιού βελτίωσης εγγυάται ότι μία επαρκώς μεγάλη ακολουθία από εγωιστικές μονόπλευρες κινήσεις από τους παίκτες πρόκειται να οδηγήσει σε ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash αγνής στρατηγικής.

2.6.6. Επιλογή κυψέλης σε διεπίπεδα δίκτυα φεμτο-κυψελών με δυνατότητα ανοικτής/κλειστής πρόσβασης με χρήση εξελικτικών παιγνίων

Στο [24] αναλύεται και μελετάται το πρόβλημα επιλογής κυψέλης σε ένα διεπίπεδο δίκτυο φεμτο-κυψελών, στο οποίο περιλαμβάνονται ένας σταθμός βάσης και αρκετές φεμτο-κυψέλες με διαφορετικές μεθόδους πρόσβασης και επιφάνειες κάλυψης (ακτίνα φεμτο-κυψέλης). Για την επίλυση του προβλήματος προτείνεται το μοντέλο ενός εξελικτικού παιγνίου, όπου ο πληθυσμός αποτελείται από ένα σύνολο χρηστών του παιγνίου. Οι στρατηγικές είναι οι διαφορετικές επιλογές σταθμών βάσης που έχει στη διάθεσή του ο χρήστης και η συνάρτηση χρησιμότητας κάθε χρήστη εκφράζει τις ωφέλειες που τελικά επιτυγχάνει να εξασφαλίσει ο κάθε χρήστης.

Η δυναμική του αντιγραφέα χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της δυναμικής συμπεριφοράς της διαδικασίας επιλογής κυψέλης. Στο εξελικτικό παίγνιο, ο χρήστης αλλάζει τον πάροχο υπηρεσιών του σταδιακά, όταν η απόδοσή του είναι μικρότερη από τη μέση απόδοση που επιτυγχάνουν όλοι οι χρήστες. Το σημείο ισορροπίας του εξελικτικού παιγνίου θεωρείται η λύση που, σύμφωνα με τη δυναμική του αντιγραφέα, θα επιτευχθεί με το πέρασμα του χρόνου όταν όλοι οι χρήστες θα λαμβάνουν ίση απόδοση και κανένας δεν θα έχει πλέον κίνητρο να αλλάξει τον πάροχο υπηρεσιών του. Για τον σκοπό αυτό, προτείνεται ένας αλγόριθμος εκμάθησης που, παρόλο που απαιτεί περισσότερο χρόνο για να επιτύχει σύγκλιση, δεν προϋποθέτει ανταλλαγή πληροφοριών, αφού οι χρήστες είναι ικανοί να μάθουν από την προηγούμενη

προσωπική γνώση τους και να λάβουν αποφάσεις χωρίς πλήρεις πληροφορίες από τους υπόλοιπους χρήστες.

3. Θεωρητική ανάλυση

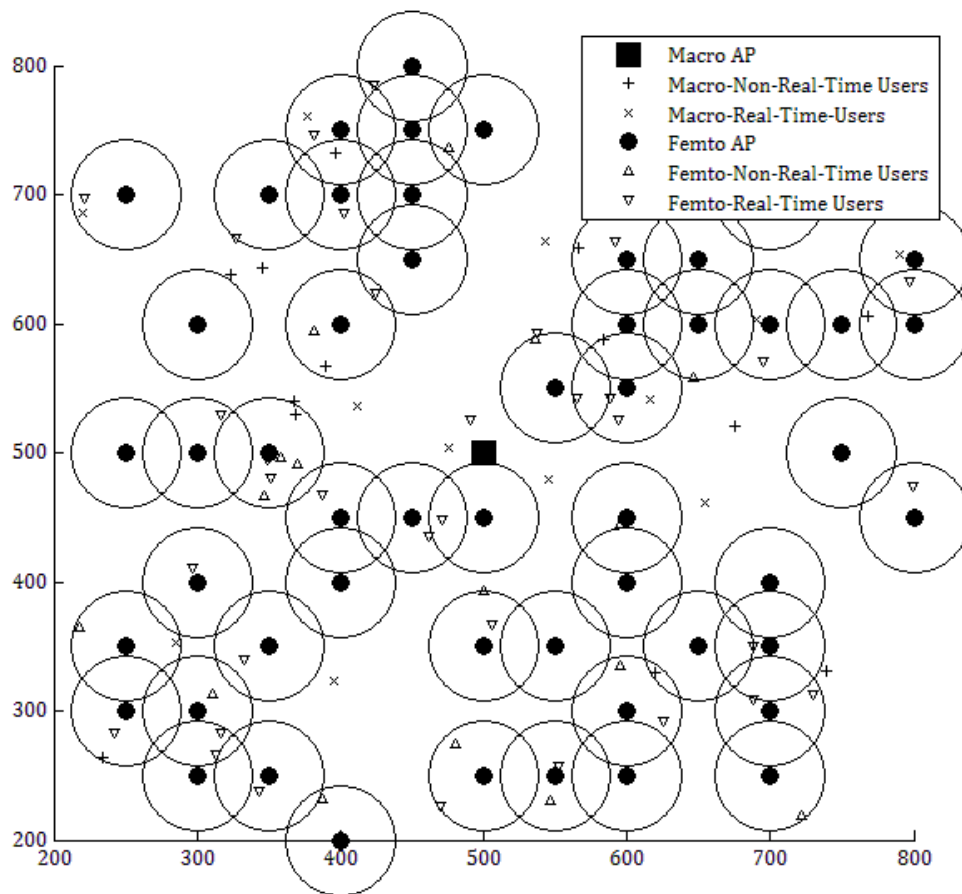
Θεωρούμε ένα διεπίπεδο δίκτυο κινητών επικοινωνιών με φεμτο-κυψέλες που αποτελείται από έναν κεντρικό σταθμό βάσης μακρο-κυψέλης (Macro-cell Base Station, MBS) B_0 που είναι υπεύθυνος για μία συγκεκριμένη περιοχή εξυπηρέτησης \mathcal{R} , παρέχοντας επικοινωνιακή κάλυψη σε ακτίνα R_M . Εντός της περιοχής εξυπηρέτησης \mathcal{R} , βρίσκονται στο δεύτερο επίπεδο της συνολικής αρχιτεκτονικής του δικτύου F ομο-καναλικές φεμτο-κυψέλες B_j ($j = 1, 2, \dots, F$). Συμβολίζουμε το σύνολο των διαθέσιμων κυψελών ως ακολούθως

$$B = \{B_j\}, j = 0, 1, \dots, F$$

Κάθε φεμτο-κυψέλη εξυπηρετεί μία περιοχή $\mathbb{C} \subset \mathcal{R}$ και αποτελεί έναν κυκλικό δίσκο ακτίνας $R_F \ll R_M$. Στο προτεινόμενο πλαίσιο μελέτης, θεωρούμε φεμτο-κυψέλες ανοικτής πρόσβασης, δηλαδή δεν είναι υποχρεωτική κάποιου είδους εγγραφή στις φεμτο-κυψέλες για τους κινητούς χρήστες, προκειμένου να εξυπηρετηθούν από τα σημεία πρόσβασης (Access Points, AP) των αντίστοιχων φεμτο-κυψελών. Έτσι, κάθε σημείο πρόσβασης και κατά συνέπεια ο σταθμός βάσης δεν είναι ενήμερος σχετικά με το ακριβές πλήθος των χρηστών που βρίσκονται εντός της περιοχής κάλυψής του. Επομένως, ο μηχανισμός επιλογής δικτύου είναι μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις από τη μία πλευρά για την αποφυγή της συμφόρησης του δικτύου και της υποβάθμισης της απόδοσης του συστήματος, λόγω του διεπίπεδου περιβάλλοντος ασύρματης πρόσβασης και από την άλλη πλευρά για την επίτευξη της μεγιστοποίησης της αντιλαμβανόμενης από τους χρήστες ικανοποίησης, λόγω της πλήρωσης των κριτηρίων ποιότητας υπηρεσίας που έχουν θέσει.

3.1. Πρώτη προσέγγιση (NOCES: NOn-cooperative CELL Selection game)

3.1.1. Μοντελοποίηση του συστήματος



Σχ. 2 Διεπίπεδη τοπολογία δικτύου

Σε κάθε χρονική σχισμή t , το διεπίπεδο δίκτυο υποστηρίζει $M(t)$ χρήστες που βρίσκονται συνεχώς στην ουρά εξυπηρέτησης, όπου με $\mathcal{M}(t)$ συμβολίζεται το αντίστοιχο σύνολο στο οποίο ανήκουν. Το σύνολο των χρηστών $\mathcal{M}(t)$ αποτελείται από χρήστες της μακρο-κυψέλης (Macro-Users, MUs) και χρήστες των φεμτο-κυψελών (Femto-Users, FUs), που αιτούνται είτε υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (Real-Time, RT) είτε υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου (Non-Real-Time, NRT) με βραχυπρόθεσμους και αυστηρούς περιορισμούς ποιότητας υπηρεσιών και ελαστικότητα ως προς την καθυστέρηση, αντίστοιχα. Ακόμη, έστω ότι με $M_{MRT}(t)$, $M_{FRT}(t)$, $M_{MNRT}(t)$ και $M_{FNRT}(t)$ συμβολίζεται το πλήθος των χρηστών μακρο-κυψελών και φεμτο-κυψελών που απαιτούν υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και μη πραγματικού χρόνου, αντίστοιχα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, στο υπόλοιπο της ανάλυσης της παρούσας προσέγγισης, ο συμβολισμός της χρονικής σχισμής t παραλείπεται χάριν απλότητας της παρουσίασης.

Στην αρχή της κάθε χρονικής σχισμής t , η διαδικασία επιλογής κυψέλης και προσδιορισμού επιπέδου ισχύος εκπομπής είναι υπεύθυνη για την κατανομή M χρηστών στις κυψέλες $j = 0, 1, \dots, F$, δηλαδή στη μακρο-κυψέλη και στις φεμτο-κυψέλες, καθώς και για το βέλτιστο επίπεδο ισχύος εκπομπής κατά την άνω ζεύξη, με στόχο τη μεγιστοποίηση του βαθμού ικανοποίησής τους, σύμφωνα με τη ζητούμενη ποιότητα υπηρεσίας για τον καθένα. Δεδομένου ότι ένας χρήστης $i \in \mathcal{M}$ συνδέεται στον σταθμό βάσης B_0 ή σε ένα σημείο πρόσβασης B_j ($j = 1, 2, \dots, F$), τότε η ισχύς εκπομπής κατά την άνω ζεύξη συμβολίζεται με P_i και το κέρδος του καναλιού από τον πομπό του χρήστη i έως τον δέκτη του χρήστη $i' \neq i$ συμβολίζεται με $G_{ii'}$. Τα κέρδη των καναλιών υπολογίζονται με την υιοθέτηση του απλοποιημένου μοντέλου απωλειών διαδρομής σύμφωνα με τις προδιαγραφές στο IMT-2000 [30].

Ακόμη, έστω ότι σ^2 είναι η διακύμανση του προσθετικού λευκού θορύβου Gauss (Additive White Gaussian Noise, AWGN) στο B_j ($j = 1, 2, \dots, F$). Τότε, ο λαμβανόμενος λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή γ_i του χρήστη i στο B_j θα δίνεται ως εξής:

$$\gamma_i = \frac{W G_{ii} P_i}{R_F \cdot (\sigma^2 + \sum_{i' \neq i} G_{ii'} P_{i'})}, \quad (1)$$

όπου

W : το διαθέσιμο φάσμα εξάπλωσης (spread spectrum)

R_F : ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας από τον χρήστη προς τον σταθμό βάσης

3.1.2. Συναρτήσεις χρησιμότητας

Έχοντας ως στόχο την ευθυγράμμιση των χαρακτηριστικών των ροών των διαφόρων υπηρεσιών πραγματικού χρόνου, αλλά και μη πραγματικού χρόνου των χρηστών κάτω από ένα κοινό πλαίσιο βελτιστοποίησης, σε κάθε χρήστη κινητών επικοινωνιών αντιστοιχίζεται μία καλά ορισμένη συνάρτηση χρησιμότητας συσχετιζόμενη με την εκάστοτε ποιότητα υπηρεσίας που αιτείται ο χρήστης, η οποία αντιπροσωπεύει τον βαθμό ικανοποίησής του όσον αφορά τη στρατηγική επιλογής κυψέλης B_j ($j = 1, 2, \dots, F$), καθώς και τα αντικρουόμενα οφέλη (tradeoff) μεταξύ της επίδοσής του σε όρους ρυθμού μετάδοσης δεδομένων άνω ζεύξης και της κατανάλωσης ενέργειας ανά χρονική σχισμή. Επιπλέον, οι ιδιότητες της συνάρτησης χρησιμότητας εξαρτώνται από το επίπεδο, στο οποίο ανήκει ο χρήστης (στη διεπίπεδη αρχιτεκτονική

που θεωρήσαμε), καθώς και στην υπηρεσία που αιτείται ο χρήστης, δηλαδή πραγματικού χρόνου ή μη πραγματικού χρόνου. Έτσι, στην προσπάθειά μας να συμπεριλάβουμε στην ανάλυσή μας τις δύο αυτές κρίσιμες παραμέτρους του συστήματος, προκύπτουν τέσσερις διαφορετικοί συνδυασμοί επιπέδου και υπηρεσιών. Επομένως, η προτεινόμενη συνάρτηση χρησιμότητας διατυπώνεται σαν μία πολύκλαδη συνάρτηση, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$U_i(B_{ij}, P_i, \mathbf{P}_{-i}) = \begin{cases} \frac{R_f f(\gamma_i)}{P_i} \Big|_{B_{ij}}, & i \in \mathcal{M}_{MRT} \\ \frac{\log(1 + D \cdot f(\gamma_i))}{P_i} \Big|_{B_{ij}}, & i \in \mathcal{M}_{MNRT} \\ \frac{R_f f(\gamma_i)}{P_i} - c(e^{P_i} - 1) \Big|_{B_{ij}}, & i \in \mathcal{M}_{FRT} \\ \frac{\log(1 + D \cdot f(\gamma_i))}{P_i} - c(e^{P_i} - 1) \Big|_{B_{ij}}, & i \in \mathcal{M}_{FNRT} \end{cases} \quad \forall B_{ij} \in \mathbf{B}_j, \quad (2)$$

όπου

R_f, D : θετικές σταθερές

$f(\gamma_i) = (1 - e^{-A\gamma_i})^M$: η συνάρτηση χρησιμότητας του χρήστη, η οποία αντιπροσωπεύει την επιτυχή μετάδοση πακέτων σε δεδομένους ρυθμούς δεδομένων, που εξαρτώνται από τα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιούνται στο [30].

Εξετάζοντας τη συνάρτηση χρησιμότητας που θεωρήσαμε παραπάνω, οι χρήστες των φεμτο-κυψελών επιβαρύνονται με βάση μία κυρτή συνάρτηση πολιτικής κοστολόγησης, ανάλογα με την ισχύ εκπομπής κατά την άνω ζεύξη, προκειμένου να αμβλυνθούν οι παρεμβολές που προκαλούνται στους χρήστες της μακρο-κυψέλης, καθώς και για να δοθεί υψηλότερη προτεραιότητα στους χρήστες των μακρο-κυψελών, οι οποίοι εν γένει χαρακτηρίζονται από δυσμενέστερες συνθήκες διαύλου εν συγκρίσει με τους χρήστες των φεμτο-κυψελών, οι οποίοι όπως παρατηρείται βρίσκονται σε μικρή απόσταση από το αντίστοιχο σημείο πρόσβασης. Παράλληλα, όσον αφορά τους χρήστες υπηρεσιών μη πραγματικού χρόνου, οι επιδόσεις τους σε όρους ρυθμού μετάδοσης δεδομένων κατά την άνω ζεύξη διατυπώνεται με την υιοθέτηση της φόρμουλας του Shannon, με στόχο να παρουσιαστεί η άπληστη συμπεριφορά τους για επίτευξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης. Από την άλλη πλευρά, όσον αφορά τους χρήστες

υπηρεσιών πραγματικού χρόνου, υιοθετούμε μία σιγμοειδή συνάρτηση χρησιμότητας $R_{Ff}(\gamma_i)$, που εξαρτάται από τον λόγο ενέργειας ψηφίου προς την πυκνότητα ισχύος παρεμβολής, ώστε να εκτιμήσουμε τον εφικτό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Στο σημείο καμπής γ_i^{Infl} της προτεινόμενης σιγμοειδούς συνάρτησης $R_{Ff}(\gamma_i)$ αντιστοιχίζουμε την ιδανική τιμή του ρυθμού μετάδοσης για τον χρήστη (π.χ. για υπηρεσίες φωνής $R_{Ff}(\gamma_i) = 64$ kbps), στην οποία ικανοποιούνται οι απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας του χρήστη. Αυτή η διατύπωση επιτρέπει στους χρήστες υπηρεσιών πραγματικού χρόνου να αιτούνται πόρους του συστήματος και να εκφράσουν τις αυστηρές βραχυπρόθεσμες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας που έχουν θέσει.

3.1.3. Ορισμός του παιγνίου

Σε αυτή την υποενότητα προτείνεται και παρουσιάζεται ένα μοντέλο παιγνίου δυναμικού, προκειμένου να διατυπωθεί και να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα επιλογής κυψέλης. Δεδομένου ότι κάθε χρήστης $i \in \mathcal{M} = \mathcal{M}_{MRT} \cup \mathcal{M}_{FRT} \cup \mathcal{M}_{MNRT} \cup \mathcal{M}_{FNRT}$ στο διεπίπεδο δίκτυο φεμτο-κυψελών στοχεύει στη μεγιστοποίηση της απόδοσής του \mathcal{U}_i και λόγω της έλλειψης συντονισμού μεταξύ των δύο επιπέδων και των χρηστών, όλοι οι χρήστες είναι πρόθυμοι να συμμετάσχουν σε ένα μη συνεργατικό παίγνιο επιλογής κυψέλης.

Έστω ότι με

$$\mathcal{G}_N = \left\{ \mathcal{M}, \{B_{ij}\}_{\substack{i \in \mathcal{M} \\ j=0,1,\dots,F}}, \{\mathcal{U}_i\}_{i \in \mathcal{M}} \right\}, \quad (3)$$

συμβολίζεται το μη συνεργατικό παίγνιο επιλογής κυψέλης (Non-cooperative Cell Selection game, NOCES game). Οι ορθολογικοί χρήστες κινητών επικοινωνιών αντιπροσωπεύουν τους παίκτες του παιχνιδιού, συνιστώντας το σύνολο \mathcal{M} , οι στρατηγικές $\{B_{ij}\}_{\substack{i \in \mathcal{M} \\ j=0,1,\dots,F}}$ είναι οι διάφορες δυνατότητες επιλογής κυψέλης για τους χρήστες και η συνάρτηση χρησιμότητας $\{\mathcal{U}_i\}_{i \in \mathcal{M}}$ είναι το όφελος που λαμβάνει ο κάθε χρήστης.

Ο επίσημος ορισμός του παιγνίου μπορεί να αναπαρασταθεί ως εξής

$$\max_{B_j, j=0,1,\dots,F} \mathcal{U}_i(\mathbf{B}_j, \mathbf{P}_i) \Big|_{B_{ij}}, \forall i \in \mathcal{M}, \quad (4)$$

όπου

$B_{ij} \in \mathbf{B}_j$: η συγκεκριμένη στρατηγική επιλογής κυψέλης του χρήστη $i \in \mathcal{M}$

\mathbf{B}_j : το σύνολο εφικτών στρατηγικών

Στο ακόλουθο τμήμα, θα υιοθετήσουμε την προσέγγιση που σχετίζεται με την εύρεση των σημείων ισορροπίας κατά Nash, προκειμένου να αναζητήσουμε και να προσδιορίζουμε αναλυτικά τη λύση του παιγνίου NOCES. Άλλωστε η μεθοδολογία αυτή είναι και η κατά μείζονα λόγο ακολουθούμενη, όσον αφορά τις θεωρητικές προσεγγίσεις με τη χρήση της θεωρίας παιγνίων των αντίστοιχων προβλημάτων.

Το σημείο ισορροπίας κατά Nash είναι, όπως έχει ήδη εξηγηθεί παραπάνω, ένα σύνολο στρατηγικών επιλογής κυψέλης, το οποίο όταν έχει υιοθετηθεί, κανένας χρήστης στο διεπίπεδο δίκτυο φεμτο-κυψελών δεν έχει κίνητρο να αλλάξει τη δική του προσωπική στρατηγική επιλογής κυψέλης, αφού οι τιμές της συνάρτησης χρησιμότητάς του δεν μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω με την πραγματοποίηση μονομερών αλλαγών στη στρατηγική του, δεδομένων φυσικά των επιλογών των υπόλοιπων χρηστών του συστήματος.

Ορισμός 1: Το διάνυσμα στρατηγικής επιλογής κυψέλης $B_{ij}^* = \{B_{1j}^*, B_{2j}^*, \dots, B_{Mj}^*\}$, $j \in \mathbf{B}_j$, $\forall i \in \mathcal{M}$ αποτελεί σημείο ισορροπίας κατά Nash, αν για κάθε χρήστη $i \in \mathcal{M}$ ισχύει η ακόλουθη σχέση

$$U_i(B_{ij}^*, \mathbf{B}_{-ij}^*) \geq U_i(B_{ij}, \mathbf{B}_{-ij}^*), \forall B_{ij} \in \mathbf{B}_j, j = 0, 1, \dots, F$$

□

3.1.4. Παίγνιο δυναμικού και ύπαρξη ισορροπίας κατά Nash

Σε συνέχεια των προηγούμενων συζητήσεων και αναλύσεων, προτείνεται το μοντέλο παιγνίου δυναμικού με στόχο την απόδειξη ύπαρξης σημείου ισορροπίας κατά Nash για το παίγνιο NOCES. Όπως ήδη έχει εξηγηθεί, ένα παίγνιο δυναμικού είναι μία ειδική κατηγορία παιγνίου κανονικής μορφής, το οποίο χαρακτηρίζεται από μία συνάρτηση δυναμικού $\Phi(\mathbf{B}_j)$, όπου \mathbf{B}_j , $j = 0, 1, \dots, F$ είναι το σύνολο των στρατηγικών επιλογής κυψέλης. Η θεμελιώδης ιδιότητα ενός παιγνίου δυναμικού είναι ότι, όταν

επέλθει μία απόκλιση (δηλαδή επιλογή διαφορετικής στρατηγικής από έναν παίκτη), που μεταφράζεται σε μεταβολή της συνάρτησης χρησιμότητας ενός παίκτη, η αλλαγή στην τιμή του Φ , δηλαδή $\Delta\Phi$, ανακλάται πλήρως στην ισόποση μεταβολή της τιμής $\Delta\mathcal{U}_i$ που παρατηρείται από τον χρήστη i που μετέβαλε τη στρατηγική του $\forall i \in \mathcal{M}$ [18].

Ορισμός 2: Ένα στρατηγικό παίγνιο, όπως αυτό που ορίστηκε στη σχέση (3) ονομάζεται παίγνιο ακριβούς δυναμικού (exact potential game), αν υπάρχει μία κατάλληλη συνάρτηση δυναμικού $\Phi(\mathbf{B}_j)$, τέτοια ώστε

$$\mathcal{U}_i(B_{ij}, \mathbf{B}_{-ij}) - \mathcal{U}_i(B'_{ij}, \mathbf{B}_{-ij}) = \Phi(B_{ij}, \mathbf{B}_{-ij}) - \Phi(B'_{ij}, \mathbf{B}_{-ij}), \quad (5)$$

για κάθε $i \in \mathcal{M}$ και για κάθε $\mathbf{B}_{-ij}, B_{ij}, B'_{ij} \in \mathbf{B}_j, j = 0, 1, \dots, F$.

□

Θεώρημα 1: Το παίγνιο NOCES, όπως περιγράφεται στη σχέση (3) είναι ένα παίγνιο ακριβούς δυναμικού με συνάρτηση δυναμικού

$$\Phi(\mathbf{B}_j) = \sum_{\substack{i=1 \\ j=0,1,\dots,F}}^M \mathcal{U}_i(B_{ij}) = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i \\ j=0,1,\dots,F}}^M \mathcal{U}_k(B_{kj}) + \mathcal{U}_i(B_{ij})|_{j=0,1,\dots,F}, \quad (6)$$

Απόδειξη: Με βάση τον ορισμό 2, προκειμένου να αποδείξουμε ότι το παίγνιο NOCES είναι ένα παίγνιο ακριβούς δυναμικού, θα πρέπει να συναχθεί ότι αληθεύει η έκφραση (6)(6).

Υποθέτουμε, λοιπόν, ότι $B_{ij} \in \mathbf{B}_j, j = 0, 1, \dots, F$ είναι μία οποιαδήποτε στρατηγική του χρήστη $i \in \mathcal{M}$ και ότι οι στρατηγικές των υπόλοιπων χρηστών παραμένουν αμετάβλητες. Από τις σχέσεις (2)(2) και (5)(5), έχουμε ότι για όλα τα B_{ij} και B'_{ij} ισχύει

$$\begin{aligned}
& \mathcal{U}_i(B_{ij}, \mathbf{B}_{-ij}) - \mathcal{U}_i(B'_{ij}, \mathbf{B}_{-ij}) \\
&= \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i \\ j=0,1,\dots,F}}^M \mathcal{U}_k(B_{kj}) + \mathcal{U}_i(B_{ij}) \Big|_{j=0,1,\dots,F} \\
&- \left[\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i \\ j=0,1,\dots,F}}^M \mathcal{U}_k(B_{kj}) + \mathcal{U}_i(B_{ij}) \Big|_{j=0,1,\dots,F} \right] = \Phi(B_{ij}, \mathbf{B}_{-ij}) - \Phi(B'_{ij}, \mathbf{B}_{-ij})
\end{aligned}$$

Έτσι, καταλήγουμε στο ότι το παίγνιο (3) ικανοποιεί τον ορισμό του παιγνίου δυναμικού και κατ' επέκταση το \mathcal{G}_N είναι ένα παίγνιο ακριβούς δυναμικού, όπου $\Phi(\mathbf{B}_j)$ είναι η συνάρτηση δυναμικού του παιγνίου \mathcal{G}_N .

□

Σύμφωνα με τον ορισμό 2 του ακριβούς παιγνίου δυναμικού, μπορεί κατ' άμεσο τρόπο να συναχθεί ότι τα σημεία ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου NOCES που περιγράφεται στην (3) και του παιγνίου $\left\{ \mathcal{M}, \{B_{ij}\}_{\substack{i \in \mathcal{M} \\ j=0,1,\dots,F}}, \{\Phi\}_{i \in \mathcal{M}} \right\}$ συμπίπτουν [17].

Παράλληλα, μία πολύτιμη ιδιότητα των παιγνίων δυναμικού είναι η ύπαρξη τουλάχιστον ενός σημείου ισορροπίας κατά Nash, δεδομένου ότι το σύνολο των \mathbf{B}_j , $j = 0, 1, \dots, F$ είναι πεπερασμένο, όπως εξηγήθηκε προηγουμένως.

Πρόταση 1: Το παίγνιο NOCES (3) με συνάρτηση χρησιμότητας $\mathcal{U}_i(B_{ij}, \mathbf{P})$, $B_{ij} \in \mathbf{B}_j$, $j = 0, 1, \dots, F$ και σύνολο στρατηγικών \mathbf{B}_j διαθέτει μη κενό σύνολο σημείων ισορροπίας κατά Nash.

□

Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση αυτής της προσέγγισης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι, παρόλο που έχει ήδη αποδειχθεί η ύπαρξη ενός σημείου ισορροπίας κατά Nash, κατά τη διαδικασία προσδιορισμού του σημείου αυτού, είναι προφανές ότι ο καθένας από τους χρήστες δεν γνωρίζει τις στρατηγικές των υπόλοιπων χρηστών, όταν λαμβάνουν την απόφαση σχετικά με το σε ποια κυψέλη να συνδεθούν.

3.2. Δεύτερη προσέγγιση (CSPA)

3.2.1. Μοντελοποίηση του συστήματος

Έστω ότι έχουμε ένα σύστημα πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης κώδικα (Code Division Multiple Access, CDMA). Δεδομένου ότι τα συστήματα CDMA χρησιμοποιούν κώδικες προκειμένου να αναγνωρίσουν τις διαφορετικές συνδέσεις, σε κάθε μία εξ αυτών θα αποδοθεί το σύνολο του φάσματος W_c που είναι διαθέσιμο στην κάθε κυψέλη για όλον τον χρόνο. Θα πρέπει φυσικά να σημειώσουμε ότι η κάθε κυψέλη c μπορεί να έχει διαφορετικό εύρος ζώνης στη διάθεσή της, το οποίο εξαρτάται από τον τύπο της.

Στο σύνολο κυψελών που ορίστηκε προηγουμένως, ο δείκτης $j = 0$ χρησιμοποιείται για τον σταθμό βάσης της μακρο-κυψέλης (Macro-cell Base Station, MBS), ενώ οι υπόλοιποι δείκτες $j = 1, 2, \dots, F$ υποδηλώνουν τα F σημεία πρόσβασης των φεμτο-κυψελών (Femto-cell Access Points, FAPs). Διαφορετικά σημεία πρόσβασης μπορούν να έχουν αλληλοεπικαλυπτόμενες περιοχές κάλυψης, ενώ ο σταθμός βάσης βρίσκεται στο κέντρο του συστήματος και έχει επαρκώς μεγάλη ακτίνα κάλυψης, ώστε να είναι εντός της εμβέλειας καθενός από τους χρήστες που βρίσκονται στο σύστημα, ανεξαρτήτως της θέσης του. Κατά συνέπεια, ένας χρήστης θα έχει εν γένει περισσότερα από ένα διαθέσιμα δίκτυα για να συνδεθεί.

Ακόμη, έχουμε ένα σύνολο από n χρήστες που είναι τυχαία και ομοιόμορφα κατανεμημένοι επί του επιπέδου xy

$$\mathcal{M} = \{1, 2, \dots, n\}$$

Υποθέτοντας ότι ο χρήστης $i \in \mathcal{M}$ έχει επιλέξει να συνδεθεί στην κυψέλη $c \in B$, αυτή του η επιλογή της κυψέλης μπορεί να συμβολιστεί ως εξής

$$b_i = c$$

Επεκτείνοντας τον παραπάνω συμβολισμό, ορίζουμε το διάνυσμα που αναπαριστά την κυψέλη που έχει επιλεγεί από κάθε χρήστη που βρίσκεται μέσα στο σύστημα, το οποίο αντιστοιχεί σε ένα προφίλ στρατηγικής για όλους τους παίκτες, σύμφωνα με τα όσα εξηγήθηκαν στην προηγούμενη προσέγγιση

$$\mathbf{b} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$$

Κατά τον ίδιο τρόπο, μπορούμε να θεωρήσουμε με το διάνυσμα \mathbf{b}_{-i} το διάνυσμα των επιλογών κυψέλης που έχουν πραγματοποιήσει όλοι οι υπόλοιποι χρήστες εκτός του χρήστη i

$$\mathbf{b}_{-i} = (b_1, b_2, \dots, b_{i-1}, b_{i+1}, \dots, b_n)$$

Ο κάθε χρήστης $i \in \mathcal{M}$ έχει εκ των προτέρων μία δεδομένη απαίτηση ποιότητας λαμβανόμενης υπηρεσίας, όπως είναι για παράδειγμα ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων R_i . Έτσι, όπως προκύπτει άμεσα από τον κανόνα του Shannon, παίρνουμε ότι

$$R_i = W_c \log_2 \left(1 + \frac{p_i}{I_i} \right), \quad (7)$$

όπου

p_i : η εκπεμπόμενη ισχύς από το τερματικό του χρήστη i

W_c : το εύρος ζώνης που διαθέτει και επομένως έχει παραχωρήσει στον χρήστη i η κυψέλη $b_i = c$ στην οποία είναι συνδεδεμένος ο χρήστης i

I_i : το συνολικό επίπεδο παρεμβολών που λαμβάνεται στην κυψέλη b_i από τον χρήστη $i \in \mathcal{M}$

Επειδή όλοι οι χρήστες εκπέμπουν στην ίδια συχνότητα, οι εσωτερικές παρεμβολές που παράγονται από το σύστημα είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας που υπεισέρχεται στον προσδιορισμό της χωρητικότητας του συστήματος, καθώς και της ποιότητας της υπηρεσίας. Επομένως, κατά την προσέγγιση αυτή θα θεωρήσουμε ότι οι παρεμβολές προέρχονται από όλους τους χρήστες του συστήματος, ανεξαρτήτως της κυψέλης που χρησιμοποιούν και ως εκ τούτου μπορεί να υπολογιστεί ως η ισχύς που λαμβάνεται από τον σταθμό βάσης της κυψέλης b_i , στην οποία είναι συνδεδεμένος ο χρήστης i από όλους τους χρήστες, μείον το επίπεδο ισχύος που λαμβάνεται από τον χρήστη i , αφού αυτό αναπαριστά το χρήσιμο λαμβανόμενο σήμα

$$I_i = \sum_{j \in \mathcal{M}} h_{c,j} p_j - h_{c,i} p_i$$

όπου

$h_{c,i}$: ο συντελεστής απόσβεσης ή συντελεστής απωλειών διαδρομής από τη θέση του χρήστη i έως τη θέση, όπου βρίσκεται ο σταθμός βάσης της κυψέλης $c \in B$

Κατ' ανάλογο τρόπο, μπορούμε να ορίσουμε το διάνυσμα του επιπέδου ισχύος στο οποίο εκπέμπουν οι χρήστες

$$\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_n)$$

Όπως και προηγουμένως, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το διάνυσμα \mathbf{p}_{-i} για να υποδηλώσουμε το επίπεδο ισχύος, στο οποίο εκπέμπουν όλοι οι χρήστες εκτός του χρήστη i , όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\mathbf{p}_{-i} = (p_1, p_2, \dots, p_{i-1}, p_{i+1}, \dots, p_n)$$

Αξίζει να επαναλάβουμε ότι στην αρχή κάθε χρονοσχισμός t η διαδικασία επιλογής κυψέλης και κατανομής ισχύος εκπομπής είναι υπεύθυνη για την ανάθεση μίας κυψέλης B_j σε καθέναν από τους χρήστες, καθώς και για την εύρεση της βέλτιστης ισχύος εκπομπής άνω ζεύξης των χρηστών, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας.

3.2.2. Συναρτήσεις απόδοσης

Όπως εξηγήθηκε στην προηγούμενη υποενότητα, κάθε κυψέλη υιοθετεί μία πολιτική κοστολόγησης απέναντι σε όλους τους χρήστες που εξυπηρετεί χωρίς διαφοροποίηση, η οποία εκφράζεται μέσω μίας συνάρτησης χρησιμότητας ισχύος εκπομπής

$$\mathcal{P}_i = A_c \cdot QoS_i \cdot R_i - C_c \cdot p_i^{D_c} = A_c \cdot QoS_i \cdot W_c \log_2 \left(1 + \frac{p_i}{I_i} \right) - C_c \cdot p_i^{D_c}, \quad (8)$$

όπου

A_c, C_c, D_c : θετικοί συντελεστές κοστολόγησης που ισχύουν για την κυψέλη $b_i = c$ που εξυπηρετεί τον χρήστη $i \in \mathcal{M}$

QoS_i : η απαίτηση ποιότητας υπηρεσίας (QoS) που έχει θέσει ο χρήστης $i \in \mathcal{M}$

Θα πρέπει να τονίσουμε ότι η παραπάνω συνάρτηση χρησιμότητας ισχύος εκπομπής έχει ως στόχο να συμβιβάσει την ανάγκη για υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης (που επιτυγχάνεται με αύξηση της ισχύος εκπομπής) με τις συνέπειες που θα πρέπει να υποστούν οι υπόλοιποι χρήστες όταν αυξάνεται το επίπεδο εκπεμπόμενης ισχύος εκπομπής (αύξηση των παρεμβολών τους).

Δεδομένων των συνθηκών που επικρατούν στην κυψέλη b_i , όπως για παράδειγμα οι παρεμβολές που λαμβάνονται, εύκολα μπορούμε να εξαγάγουμε μία σχέση που θα δίνει το βέλτιστο επίπεδο ισχύος

$$p_i^* = \arg_{p_i} \max \mathcal{P}_i \Leftrightarrow \left. \frac{d\mathcal{P}_i}{dp_i} \right|_{p_i^*} = 0, \quad (9)$$

Για αυτό το επίπεδο ισχύος εκπομπής, οι χρήστες οφείλουν μόνο να μεγιστοποιήσουν την τιμή μίας συνάρτησης χρησιμότητας \mathcal{U} μέσω της υιοθέτησης μίας δεδομένης στρατηγικής

$$\mathcal{S}_i = (b_i, p_i^*, \mathbf{b}_{-i}, \mathbf{p}_{-i}^*)$$

η οποία δεν είναι παρά μία συνδυασμένη έκφραση μίας επιλογής κυψέλης b_i για το βέλτιστο επίπεδο ισχύος p_i^* που έχει υπολογιστεί από την παραπάνω έκφραση, για τον χρήστη i , δεδομένου του διανύσματος των αντίστοιχων επιλογών που έχουν πραγματοποιηθεί από τους υπόλοιπους χρήστες, \mathbf{b}_{-i} και \mathbf{p}_{-i}^* .

Ο προαναφερθείς στόχος είναι ισοδύναμος με τη μεγιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητας που αντιλαμβάνεται ο κάθε χρήστης i , δεδομένων των στρατηγικών των υπόλοιπων χρηστών που βρίσκονται εντός της περιοχής εξυπηρέτησης

$$\max_{b_i \in \mathcal{B}} \mathcal{U}(\mathcal{S}_i), \forall i \in \mathcal{M}$$

Θέτοντας, λοιπόν, ως πρωταρχικό στόχο την ικανοποίηση των απαιτήσεων για ποιότητα υπηρεσίας όλων των χρηστών, θα θεωρήσουμε ως συνάρτηση χρησιμότητας τον ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας R_i για όσους χρήστες έχουν ικανοποιήσει τις ελάχιστες αξιώσεις τους, ενώ θα αγνοήσουμε τον επιτυγχανόμενο ρυθμό μετάδοσης για όλους τους υπόλοιπους χρήστες. Αυτή η περιγραφή αντιστοιχεί στην ακόλουθη συνάρτηση

$$\mathcal{U}_i = \begin{cases} R_i, & R_i > QoS_i \\ 0, & R_i < QoS_i \end{cases}, \quad b_i = c, \quad (10)$$

3.2.3. Διατύπωση του προβλήματος

Έχοντας θέσει ως βασικό στόχο της παρούσας προσέγγισης την πρόταση ενός σχήματος επιλογής κυψέλης και κατανομής ισχύος εκπομπής (Cell Selection and Power Allocation, CSPA) με μη συνεργατικό τρόπο, δηλ. χωρίς την παρουσία μίας κεντρικής μονάδας συντονισμού, όπως είναι ένας διαχειριστής δικτύου, υποθέτουμε ότι όλοι οι χρήστες ενεργούν ορθολογικά και κατ' επέκταση διατυπώνουμε το πρόβλημα βελτιστοποίησης της από κοινού επιλογής κυψέλης και ελέγχου ισχύος ως εξής:

$$\mathcal{O} = \{\mathcal{M}, \{\mathcal{S}_i\}_{i \in \mathcal{M}}, \mathcal{F}\}, \quad (11)$$

όπου \mathcal{F} είναι το σύνολο που συντίθεται από τις συναρτήσεις απόδοσης που χρησιμοποιούνται για την κατανομή της ισχύος εκπομπής και για την επιλογή της κατάλληλης κυψέλης, αντίστοιχα, όπως δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\mathcal{F} = \{\{\mathcal{P}_c\}_{c \in \mathcal{B}}, \{\mathcal{U}_i\}_{i \in \mathcal{M}}\}$$

Η λύση του παραπάνω προβλήματος μεγιστοποίησης είναι ισοδύναμη με την παρακάτω έκφραση:

$$\max_{\mathcal{S}_i} \mathcal{U}_i(\mathcal{S}_i, \mathcal{S}_{-i}), \forall i \in \mathcal{M}, \quad (12)$$

όπου \mathcal{S}_i είναι οι στρατηγικές επιλογής κυψέλης, δεδομένου ότι οι χρήστες έχουν ήδη υπολογίσει και συγκλίνει σε ένα βέλτιστο επίπεδο ισχύος εκπομπής που αντιστοιχεί στη λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης για την κατανομή ισχύος εκπομπής

$$\mathcal{S}_i = (b_i, p_i^*), \quad p_i^* = \max_{p_i} \mathcal{P}_{b_i}(p_i, \mathbf{p}_{-i}), \quad \forall i \in \mathcal{M}$$

Η λύση έχει βασιστεί στην υπόθεση ότι ο κάθε χρήστης θα προσπαθήσει να ικανοποιήσει εγωιστικά τις δικές του απαιτήσεις, μέσω της μεγιστοποίησης των συναρτήσεων απόδοσης, όπως τις περιγράψαμε προηγουμένως.

Στο επόμενο κεφάλαιο, έχοντας ως σκοπό την εφαρμογή του μηχανισμού βέλτιστης επιλογής κυψέλης με ατομικές μόνο πληροφορίες του κάθε χρήστη, θα προτείνουμε έναν κατανεμημένο αλγόριθμο επιλογής κυψέλης. Θα πρέπει εδώ να διευκρινιστεί ότι ένας κεντρικοποιημένος ελεγκτής θα μπορούσε επίσης να λύσει το πρόβλημα, χρησιμοποιώντας έναν εξαντλητικό αλγόριθμο. Ωστόσο, στα πρακτικά διεπίπεδα δίκτυα φεμτο-κυψελών, όπως αυτά που μελετάμε, τέτοιοι κεντρικοί ελεγκτές όχι μόνο

δεν είναι διαθέσιμοι, αλλά θα απαιτούσαν και υψηλή υπολογιστική ισχύ σε συνδυασμό με μεγάλους χρόνους σύγκλισης για την επίλυση του υπό μελέτη προβλήματος.

4. Προσομοιώσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα εφαρμόσουμε τις αρχές της θεωρίας παιγνίων, καθώς και της θεωρίας αυτομάτων, για να μελετήσουμε το παραπάνω πρόβλημα. Όπως ήδη έχει διατυπωθεί, οι κεντρικοποιημένοι αλγόριθμοι δεν είναι πρακτικοί στην περίπτωση αυτή, επειδή τόσο οι σταθμοί βάσης, όσο και οι χρήστες συνήθως δεν είναι σε θέση να έχουν επαρκή πληροφόρηση σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα. Αντί, λοιπόν, του μη πρακτικού κεντρικοποιημένου αλγορίθμου, σχεδιάζουμε έναν πρακτικότερο αποκεντρωμένο αλγόριθμο, προκειμένου να επιτύχουμε τη ζητούμενη ισορροπία κατά Nash με ελάχιστη μόνο πληροφορία από το σύστημα και να αξιολογήσουμε στη συνέχεια την απόδοση του προτεινόμενου αυτού αλγορίθμου μέσα από τη μελέτη των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, όλα τα παίγνια δυναμικού κατέχουν την ιδιότητα του πεπερασμένου μονοπατιού βελτίωσης. Αυτό σημαίνει ότι όλοι οι χρήστες δρουν σειριακά, επιλέγοντας τις ενέργειές τους ένας κάθε φορά και αφού υπάρχει η δυνατότητα να παρατηρήσουν το αποτέλεσμα που έχουν επιφέρει στο σύστημα οι ενέργειες των προηγούμενων παικτών, υπό τη μορφή παραδείγματος χάριν του επιπέδου παρεμβολών που προκύπτει από τις ενέργειες κατανομής πόρων των υπόλοιπων παικτών. Τότε, εάν ένας παίκτης $i \in \mathcal{M}$ έχει μία καλύτερη απόκριση x'_i που δίνει μεγαλύτερη τιμή της συνάρτησης χρησιμότητας (π.χ. χαμηλότερη συνολικά στάθμη παρεμβολών), μπορεί να αυξήσει την συνάρτηση χρησιμότητάς του κατά $U_i(x'_i, \mathbf{x}_{-i}) - U_i(x_i, \mathbf{x}_{-i})$, το οποίο ισούται ακριβώς με την αντίστοιχη αύξηση στη συνάρτηση δυναμικού του παιγνίου. Εδώ αξίζει να σημειώσουμε ότι έχει γίνει η υπόθεση πως οι κατανομές πόρων \mathbf{x}_{-i} όλων των υπόλοιπων παικτών παραμένουν σταθερές, όσο ο παίκτης i προσαρμόζει και μεταβάλλει τη στρατηγική του. Στην περίπτωση κατά την οποία κάποιος άλλος παίκτης $j \in \mathcal{M}$ επιτύχει μία καλύτερη απόκριση στη νέα κατάσταση, θα αυξήσει περαιτέρω το συνολικό δυναμικό Φ , καθώς βελτιώνει τη δική του ατομική απόδοση. Καθώς το πλήθος των παικτών, όπως επίσης και το μέγεθος των συνόλων των ενεργειών τους είναι πεπερασμένα, η διαδικασία σειριακής βελτίωσης θα πρέπει να φτάσει σε μία κατάσταση, όπου δεν είναι πλέον δυνατόν για κανέναν παίκτη να βελτιώσει τις τιμές της συνάρτησης χρησιμότητάς του με απλή μονομερή μεταβολή της ενέργειάς του από x_i σε x'_i , δεδομένου φυσικά ότι όλες

οι υπόλοιπες ενέργειες των παικτών έχουν διατηρηθεί σταθερές, πράγμα που άλλωστε αποτελεί και τον ορισμό ενός σημείου ισορροπίας κατά Nash.

Η εγωιστική συμπεριφορά των παικτών δεν τους επιτρέπει ποτέ να προσαρμοστούν σε μία κατανομή πόρων που θα τους εξασφαλίσει χαμηλότερη απόδοση, με αποτέλεσμα η συνάρτηση δυναμικού να είναι γνησίως αύξουσα σε κάθε γύρο του παίγνιου. Αυτό εμποδίζει με αποτελεσματικό τρόπο πιθανούς κύκλους στην κατανεμημένη διαδικασία κατανομής πόρων από το να φτάσει δύο φορές σε ένα προφίλ κατανομής που δεν αποτελεί σημείο ισορροπίας κατά Nash.

Η δυνατότητα απόδειξης της σύγκλισης που εξηγήθηκε παραπάνω είναι μία ιδιαίτερα επιθυμητή ιδιότητα. Ωστόσο, η αυστηρά σειριακή προσαρμογή των παικτών που προϋποτέθηκε για την απόδειξη αυτή είναι προβληματική για τους δύο ακόλουθους κυρίως λόγους:

- **Πρώτον**, θα ήταν απαραίτητος ένας κατάλληλος μηχανισμός σειριοποίησης, ο οποίος θα εμπόδιζε δύο σταθμούς βάσης, σημεία πρόσβασης ή χρήστες από την ταυτόχρονη προσαρμογή τους.
- **Δεύτερον**, η διαδικασία προσαρμογής θα γινόταν όλο και πιο χρονοβόρα για μεγαλύτερα δίκτυα κινητών επικοινωνιών.

Για να ξεπεράσουμε, λοιπόν, αυτά τα προβλήματα κλιμάκωσης των αυστηρά σειριακών μεθόδων προσαρμογής, στην παρούσα υλοποίηση έχουμε εφαρμόσει έναν αλγόριθμο που επιτρέπει την ταυτόχρονη λήψη αποφάσεων από τα τερματικά, δίνοντας τη δυνατότητα στους χρήστες να συγκλίνουν σε σημεία ισορροπίας κατά Nash μικτής στρατηγικής. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι, αν ανάμεσα στους επιλεγμένους υποψήφιους πόρους υπάρχει κάποιος πόρος καλύτερος από τον ήδη χρησιμοποιούμενο, τότε ο χρήστης θα αρχίσει να χρησιμοποιεί τον νέο πόρο μόνο με πιθανότητα p . Το σκεπτικό πίσω από αυτήν την τακτική είναι να εμποδιστούν οι χρήστες γειτονικών κυψελών, που θα χαρακτηρίζονται από παρεμφερείς συνθήκες διαύλου ή συμφόρησης, από το να μεταβάλουν ταυτόχρονα τη στρατηγική τους επιλέγοντας τους ίδιους πόρους, γεγονός που θα προκαλούσε αμοιβαία δυσχερείς συνθήκες. Αν το παίγνιο επιλογής δικτύου μικτής στρατηγικής παιχθεί διαδοχικά, θα μπορούσε να μοντελοποιηθεί σαν ένα στοχαστικό παίγνιο αυτομάτων εκμάθησης (learning automata).

Φυσικά, το πιθανοτικό στοιχείο της προσέγγισης καθιστά αν όχι αδύνατη, τουλάχιστον πολύ πιο δύσκολη την απόδειξη της γενικής σύγκλισης, επειδή οι δοκιμές Bernoulli μπορεί να καταλήγουν για απροσδιόριστα μεγάλο αριθμό πειραμάτων (με πιθανότητα $1 - p$) σε κυψέλη που δεν δίνει καλύτερη απόδοση. Ωστόσο, ο αλγόριθμος πιθανοτικής καλύτερης απόκρισης είναι πιο αποτελεσματικός και παρουσιάζει καλύτερες ιδιότητες σύγκλισης σε μεγαλύτερα συστήματα.

Ακόμη, θα πρέπει να διευθετηθούν οι ακόλουθες δύο μείζονες δυσκολίες:

- **Πρώτον**, η διαδικασία επαναληπτικής ανανέωσης της πληροφορίας που προϋποτίθεται από την ιδιότητα πεπερασμένου μονοπατιού βελτίωσης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, απαιτεί για κάθε χρήστη τη δυνατότητα να παρατηρεί τις στρατηγικές των υπόλοιπων παικτών. Στο μοντέλο μας, ωστόσο, η μικτή στρατηγική ενός παίκτη δεν μπορεί ποτέ να είναι παρατηρήσιμη από άλλους παίκτες, παρά το γεγονός ότι η εκάστοτε συγκεκριμένη κίνηση του κάθε παίκτη μπορεί να παρατηρηθεί και να καταγραφεί από τους υπόλοιπους. Όπως είναι φυσικό, αυτό κάνει τον υπολογισμό της αναμενόμενης απόδοσης μη πρακτικό.
- **Δεύτερον**, η μικτή στρατηγική θα εκφυλιστεί σε αγνή στρατηγική λόγω της μη ομαλής χαρακτηριστικής καμπύλης των συναρτήσεων καλύτερης απόκρισης. Πιο συγκεκριμένα, οι παίκτες θα αυξήσουν στο μέγιστο την πιθανότητα, δηλαδή πιθανότητα $p = 1$, στη στρατηγική με την υψηλότερη αναμενόμενη απόδοση, το οποίο οδηγεί σε ένα φαινόμενο «άλματος» για τη βέλτιστη απόκριση.

Για να λύσουμε, λοιπόν, το πρώτο πρόβλημα, θα πρέπει να κάνουμε μία βασική παραδοχή. Πιο συγκεκριμένα, θα πρέπει να βρούμε έναν τρόπο υπολογισμού της αναμενόμενης τιμής $E[U(x_i, x_{-i})]$ χωρίς να γνωρίζουμε τις μικτές στρατηγικές των υπόλοιπων παικτών και να χρησιμοποιούμε την τιμή αυτή κατά τη λήψη των αντίστοιχων αποφάσεων.

Για να λύσουμε το δεύτερο πρόβλημα, θα πρέπει να θεωρήσουμε την εναλλακτική λύση που μας παρέχουν οι ομαλές (smoothed) συναρτήσεις βέλτιστης απόκρισης, οι οποίες, όπως υποδηλοί και το όνομά τους, κινούνται «ομαλά» από τη μία αγνή στρατηγική στην άλλη. Στο πλαίσιο αυτό, υπάρχουν πολλές κατάλληλες συναρτήσεις που μπορούν να αναπαραστήσουν τις ομαλές αυτές συναρτήσεις καλύτερης απόκρισης, δύο από τις οποίες θα δούμε στη συνέχεια της παρούσας εργασίας.

Για να εφαρμόσουμε τον αλγόριθμο σε ένα πρακτικό σύστημα, είναι απαραίτητη η παραδοχή των τριών παρακάτω βασικών υποθέσεων:

- **Πρώτον**, υποθέτουμε ότι κάθε χρήστης έχει τη δυνατότητα να εκκινήσει μία διαδικασία μετρήσεων, από την οποία κάθε κινητό τερματικό θα μπορεί να λαμβάνει τη μέση τιμή του κέρδους του διαύλου μεταξύ αυτού και της κάθε κυψέλης.
- **Δεύτερον**, υποθέτουμε ότι κάθε κυψέλη περιοδικά εκπέμπει το πλήθος των χρηστών που είναι συνδεδεμένοι εκείνη τη στιγμή σε αυτήν.
- **Τρίτον**, υποθέτουμε ότι η γνώση του h_{ij} , δηλαδή του κέρδους καναλιού μεταξύ του χρήστη i και του σταθμού βάσης ή σημείου πρόσβασης j είναι διαθέσιμη με σχετική ακρίβεια στους σταθμούς βάσης.

Σε κάθε χρονική στιγμή, η πληροφορία που είναι απαραίτητη για κάθε τερματικό χρήστη είναι μόνο η τιμή της συνάρτησής χρησιμότητάς του μετά από κάθε ενέργεια που πραγματοποιεί, καθώς και η ίδια η ενέργεια, ενώ δεν χρειάζεται να έχει καμία προηγούμενη γνώση του συστήματος. Οι χρήστες υπολογίζουν τότε μόνο τις πιθανότητες (πραγματικούς αριθμούς) των ενεργειών αυτών, καθώς και τις κανονικοποιημένες κοινές αποδόσεις, με άμεσο αποτέλεσμα η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου να μειώνεται κατά έναν σημαντικό παράγοντα.

4.1. Πρώτη προσέγγιση

4.1.1. Αλγόριθμος

Η γνώση του κέρδους απωλειών διαδρομής για έναν χρήστη είναι διαθέσιμη, λοιπόν, με σχετική ακρίβεια, όπως υποτέθηκε προηγουμένως, τόσο στο σταθμό βάσης της μακρο-κυψέλης, όσο και στα σημεία πρόσβασης των φεμτο-κυψελών, ενώ δεν είναι διαθέσιμη στον κάθε χρήστη. Σύμφωνα με αυτήν την παρατήρηση, ο προτεινόμενος μη συνεργατικός αλγόριθμος επιλογής κυψέλης που βασίζεται στην εκμάθηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους χρήστες, ώστε να εκπαιδευτούν μέσω της αξιοποίησης της δικής τους προηγούμενης γνώσης και έτσι να επιλέξουν στρατηγικές χωρίς πλήρη γνώση των στοιχείων που αφορούν τους υπόλοιπους χρήστες.

Συνεπώς, το παίγνιο επιλογής κυψέλης \mathcal{G}_N επεκτείνεται σε μία μορφή μικτής στρατηγικής, προκειμένου να υποστηρίξει τον αλγόριθμο εκμάθησης. Το διάνυσμα πιθανότητας του χρήστη $i \in \mathcal{M}$ με βάση το οποίο θα επιλέξει να ζητήσει πρόσβαση από την κυψέλη $j = 0, 1, \dots, F$ συμβολίζεται με $\mathbf{Pr}_i = \{\text{Pr}_{i0}, \text{Pr}_{i1}, \dots, \text{Pr}_{iF}\}$ και συνιστά τη μικτή στρατηγική του χρήστη i .

Το παίγνιο μικτής στρατηγικής για την επιλογή κυψέλης παίζεται επαναλαμβανόμενα ανά χρονοσχισμή t , προκειμένου να προσδιοριστεί η βέλτιστη επιλογή κυψέλης για τους χρήστες. Κάθε χρήστης αναπαρίσταται από έναν παίκτη που βρίσκεται σε διαδικασία εκμάθησης και οι ενέργειές αυτού του χρήστη είναι οι εφικτές στρατηγικές επιλογής κυψέλης που διαθέτει. Έτσι, λοιπόν, η μικτή στρατηγική

$$\mathbf{Pr}_i(ite) = \{\text{Pr}_{i0}(ite), \text{Pr}_{i1}(ite), \dots, \text{Pr}_{iF}(ite)\}$$

είναι η κατανομή πιθανότητας στρατηγικής του «μαθητευόμενου» παίκτη i κατά την επανάληψη ite του αλγορίθμου εκμάθησης για την επιλογή κυψέλης.

Ορίζουμε ως αντίδραση (reaction) $r_i(ite)$ του παίκτη $i \in \mathcal{M}$ την κανονικοποιημένη απόδοση που λαμβάνει ο χρήστης $i \in \mathcal{M}$. Έστω ότι με $r_i(ite) = c \cdot \mathcal{U}_i(ite)$ συμβολίζεται η κανονικοποιημένη απόδοση $\mathcal{U}_i(ite)$, όπου $\mathcal{U}_i(ite)$ είναι η συνάρτηση χρησιμότητας του παιγνίου NOCES \mathcal{G}_N . Η σταθερά $c \in (0,1)$ χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσουμε ότι η αντίδραση του παίκτη $r_i(ite)$ βρίσκεται εντός του διαστήματος $[0,1)$. Ακόμη, θα πρέπει να υιοθετηθεί ο μηχανισμός προσαρμογής της κανονικοποιημένης παραμέτρου, λόγω του γεγονότος ότι οι παίκτες δεν έχουν καμία προηγούμενη γνώση των αποδόσεών τους. Έτσι, κατά την επανάληψη ite του αλγορίθμου NOCES, αν

$$\mathcal{U}_i(ite) > \frac{1}{c}, \quad \forall i \in \mathcal{M}$$

ορίζουμε

$$c = \frac{1}{\mathcal{U}_i(ite) + \tau}$$

όπου τ είναι μία θετική σταθερά, διαφορετικά το c παραμένει αμετάβλητο. Τελικά, το παίγνιο επαναλαμβάνεται διαδοχικά, με τέτοιον τρόπο ώστε οι παίκτες να λαμβάνουν επαρκή γνώση για το σημείο ισορροπίας κατά Nash.

Επιπλέον, ο αλγόριθμος NOCES είναι εγγυημένο ότι θα συγκλίνει σε κάποιο σημείο ισορροπίας κατά Nash αγνής στρατηγικής, όπως διατυπώθηκε στο θεώρημα 4.1 στο [31]. Από την άλλη, εξετάζοντας το πρόβλημα ελέγχου ισχύος εκπομπής, θα υιοθετήσουμε ως ένα ανεξάρτητο τμήμα της εργασίας την προσέγγιση που είχε προταθεί και αναλυθεί στο [30]. Είναι ακόμη σημαντικό να διευκρινιστεί ότι το παίγνιο NOCES θα καταλήξει στην κατανομή των χρηστών στις κυψέλες. Έτσι, η συγκεκριμένη κατανομή των χρηστών ανά κυψέλη θα είναι η έξοδος του μηχανισμού επιλογής κυψέλης, που ταυτόχρονα θα αποτελέσει είσοδο στον βασιζόμενο σε συνάρτηση χρησιμότητας αλγόριθμο ελέγχου ισχύος εκπομπής κατά την άνω ζεύξη σε διεπίπεδα δίκτυα φεμτο-κυψελών πολλαπλών υπηρεσιών (Uplink Power Control algorithm in Multi-Service two-tier Femto-cell networks, UPC-MSF algorithm), όπως ακριβώς έχει προταθεί στο [30].

Ο αλγόριθμος NOCES συνίσταται στα ακόλουθα διαδοχικά βήματα:

Βήμα 1: Κατά την εκκίνηση κάθε χρονικής σχισμής t , θέτουμε τις αρχικές τιμές του διανύσματος πιθανοτήτων επιλογής κυψέλης $\mathbf{Pr}_i(ite = 0)$ ως εξής

$$\Pr_{ij}(ite = 0) = \frac{1}{\sum_{j=0}^F x_{ij}}, \forall i \in \mathcal{M}, j = 0, 1, \dots, F$$

όπου $x_{ij} = 1$, αν ο χρήστης i είναι δυνατό να συνδεθεί στην κυψέλη j (δηλ. βρίσκεται εντός της ακτίνας κάλυψης της φεμτο-κυψέλης j), διαφορετικά $x_{ij} = 0$. Στη συνέχεια, κάθε χρήστης επιλέγει μία στρατηγική επιλογής κυψέλης, σύμφωνα με το διάνυσμα επιλογής κυψέλης $\mathbf{Pr}_i(ite = 0)$ που του αντιστοιχεί.

Βήμα 2: Σε κάθε επανάληψη $ite > 0$, κάθε χρήστης επιλέγει μία στρατηγική επιλογής κυψέλης B_{ij} , σύμφωνα με το διάνυσμα πιθανοτήτων επιλογής κυψέλης $\mathbf{Pr}_i(ite)$.

Βήμα 3: Βέλτιστη κατανομή ισχύος εκπομπής: Δεδομένου ότι όλοι οι χρήστες έχουν επιλέξει τη δική τους στρατηγική επιλογής κυψέλης, ο σταθμός βάσης της μακρο-κυψέλης και κάθε σημείο πρόσβασης φεμτο-κυψέλης γνωρίζουν το πλήθος των χρηστών που βρίσκονται εντός της περιοχής κάλυψης, εφαρμόζεται ο αλγόριθμος UPC-MSF, όπως έχει προταθεί στο [30], έτσι ώστε να προσδιοριστεί η βέλτιστη κατανομή ισχύος εκπομπής για τους χρήστες του συστήματος.

Βήμα 4: Δεδομένης της βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής, κάθε χρήστης $i \in \mathcal{M}$ υπολογίζει την τιμή της συνάρτησης χρησιμότητάς του $U_i(ite)$ και την αντίστοιχη αντίδραση, όπως αυτή ορίστηκε προηγουμένως

$$r_i(ite) = c \cdot U_i(ite)$$

Βήμα 5: Κάθε χρήστης ανανεώνει το διάνυσμα πιθανοτήτων επιλογής κυψέλης σύμφωνα με τον ακόλουθο κανόνα, όπου $b \in (0,1)$

$$\Pr_{ij}(ite + 1) = \Pr_{ij}(ite) - b \cdot r_i(ite) \cdot \Pr_{ij}(ite), B_{ij} \neq B_{ij}^{ite}$$

$$\Pr_{ij}(ite + 1) = \Pr_{ij}(ite) + b \cdot r_i(ite) \cdot (1 - \Pr_{ij}(ite)), B_{ij} \neq B_{ij}^{ite}$$

Βήμα 6: Αν για τον κάθε χρήστη $i \in \mathcal{M}$ υπάρχει μία συνιστώσα του $\Pr_{ij}(ite)$, που είναι μεγαλύτερη από μία τιμή που πλησιάζει τη μονάδα (π.χ. 0.999), το οποίο με τη σειρά του σημαίνει ότι ο χρήστης διατίθεται να επιλέξει την κυψέλη j , τότε σταματά η αναζήτηση και ο χρήστης i ανατίθεται στην κυψέλη j . Διαφορετικά, επιστρέφουμε στο Βήμα 2.

4.1.2. Σενάριο προσομοίωσης και παράμετροι

Καθ' όλη τη μελέτη μας, θα θεωρήσουμε ένα διεπίπεδο σύστημα CDMA με τις παραμέτρους που ορίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Σύμβολο	Τιμή	Περιγραφή
F	15	Πλήθος φεμτο-κυψελών
n	80	Συνολικό πλήθος χρηστών
R_M	400 m	Ακτίνα περιοχής κάλυψης μακρο-κυψέλης
R_F	50 m	Ακτίνα περιοχής κάλυψης φεμτο-κυψέλης
p_{max}	2 Watt	Μέγιστη ισχύς μετάδοσης άνω ζεύξης
W	1 MHz	Εύρος ζώνης
σ_n^2	$5 \cdot 10^{-15}$ Watt	Ισχύς θορύβου
b	0.2 0.5 0.75	Παράμετρος βηματικής αύξησης: Προσδιορίζει το κατά πόσο θα αυξηθεί το ποσοστό επανεπιλογής μίας «καλής» κυψέλης και πόσο θα μειωθεί το αντίστοιχο ποσοστό επιλογής των υπολοίπων.

$Pr_i(0)$	10%	Αρχική πιθανότητα ενός χρήστη να επιλέξει να συνδεθεί στη μακρο-κυψέλη
-----------	-----	--

Πίνακας 1 Σενάριο προσομοίωσης και παράμετροι αλγορίθμου NOCES (Πρώτη προσέγγιση)

Ένα τμήμα των παραπάνω χρηστών αιτείται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (π.χ. υπηρεσίες φωνής), ενώ οι υπόλοιποι από αυτούς αιτούνται υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου (π.χ. υπηρεσία μεταφοράς δεδομένων). Οι χρήστες είναι τυχαία και ομοιόμορφα καταναμημένοι χωρικά στο διεπίπεδο δίκτυο φεμτο-κυψελών.

Η συνάρτηση χρησιμότητας $f(\gamma_i)$ που θα εισαχθεί στη συνάρτηση χρησιμότητας έχει σιγμοειδή μορφή και εκφράζεται ως ακολούθως

$$f(\gamma_i) = (1 - e^{-A\gamma_i})^M$$

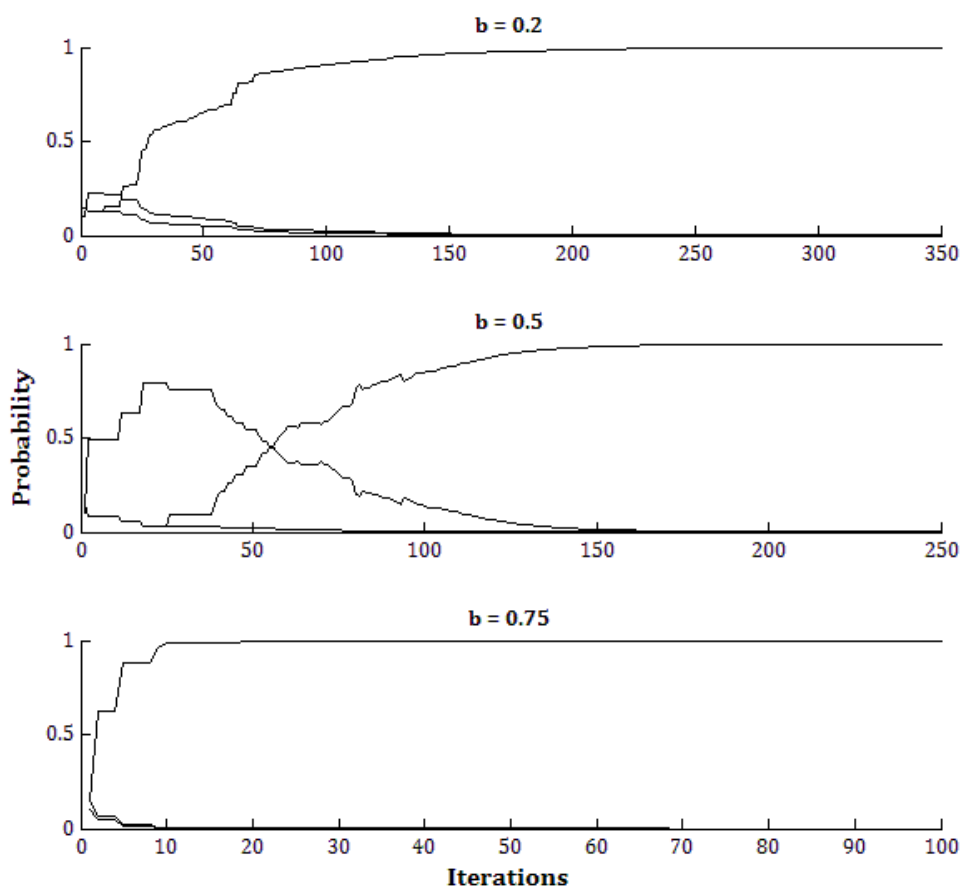
όπου A και M είναι θετικές σταθερές, οι οποίες προσδιορίζουν την κλίση της παραπάνω συνάρτησης.

Κάθε χρήστης έχει τη δυνατότητα να ακολουθήσει μία στρατηγική επιλογής κυψέλης, η οποία είναι εφικτή αν ο χρήστης βρίσκεται εντός της περιοχής κάλυψης της αντίστοιχης κυψέλης.

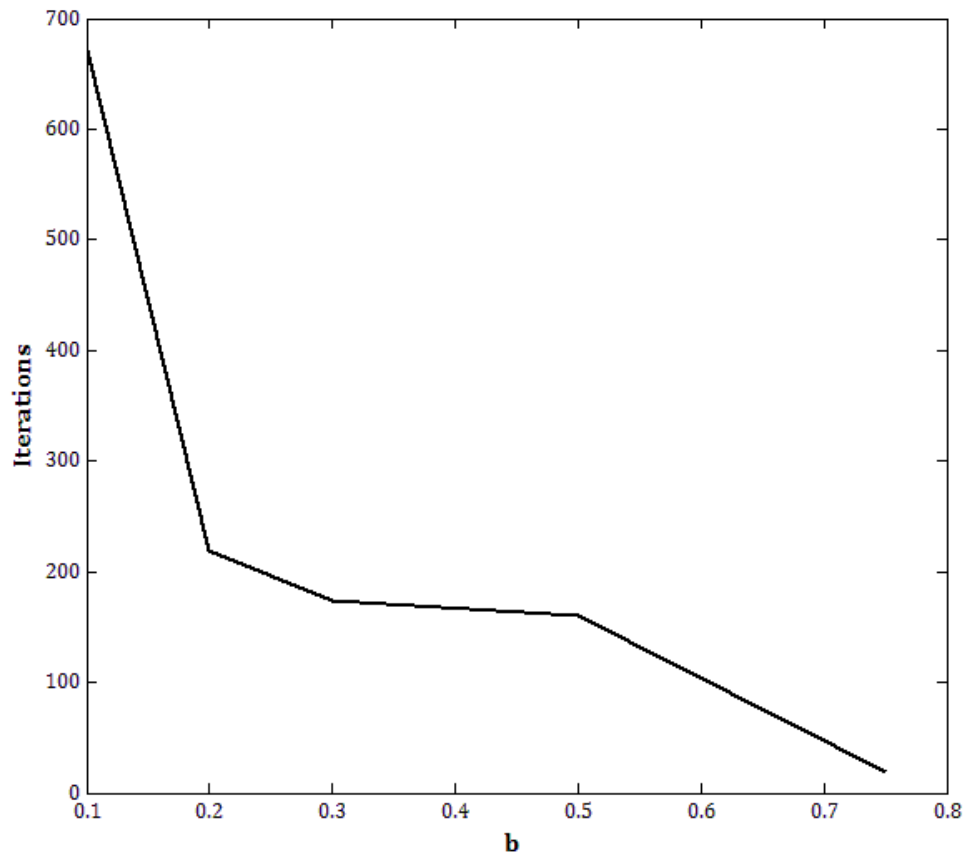
4.1.3. Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στο Σχ. 3, η εξέλιξη των πιθανοτήτων επιλογών κυψέλης για τον χρήστη $i \in \mathcal{M}$ παρουσιάζεται υπό διαφορετικές τιμές της παραμέτρου βηματικής αύξησης, δηλ. $b = 0.2$, $b = 0.5$ and $b = 0.75$. Στο Σχ. 3 παρατηρούμε την ταχεία σύγκλιση του τμήματος επιλογής κυψέλης του αλγορίθμου NOCES. Στο σενάριο που παρουσιάζεται στο Σχ. 3, έχουμε επιλέξει τον χρήστη $i = 1 \in \mathcal{M}$, ο οποίος τελικά φαίνεται να συνδέεται στη μακρο-κυψέλη, όπως υποδεικνύει ο αλγόριθμος NOCES. Το συγκεκριμένο σενάριο προσομοιώνεται για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου βηματικής αύξησης και κρατώντας κοινά τα λοιπά χαρακτηριστικά του διαύλου, οπότε παρατηρείται ότι ο χρήστης $i = 1$ επιλέγει να συνδεθεί στον σταθμό βάσης της μακρο-κυψέλης, δεδομένου ότι η θέση όλων των χρηστών εντός του διεπίπεδου δικτύου φεμτο-κυψελών έχει παραμείνει αμετάβλητη. Ακόμη, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι όταν $b = 0.2$, ο χρήστης $i = 1$ συγκλίνει σε ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash B_{10}^* αγνής στρατηγικής μετά από περίπου 250 επαναλήψεις του αλγορίθμου, όταν $b = 0.5$ έχουμε σύγκλιση στο B_{10}^* μετά από περίπου 180 επαναλήψεις και όταν $b = 0.75$ η σύγκλιση επιτυγχάνεται

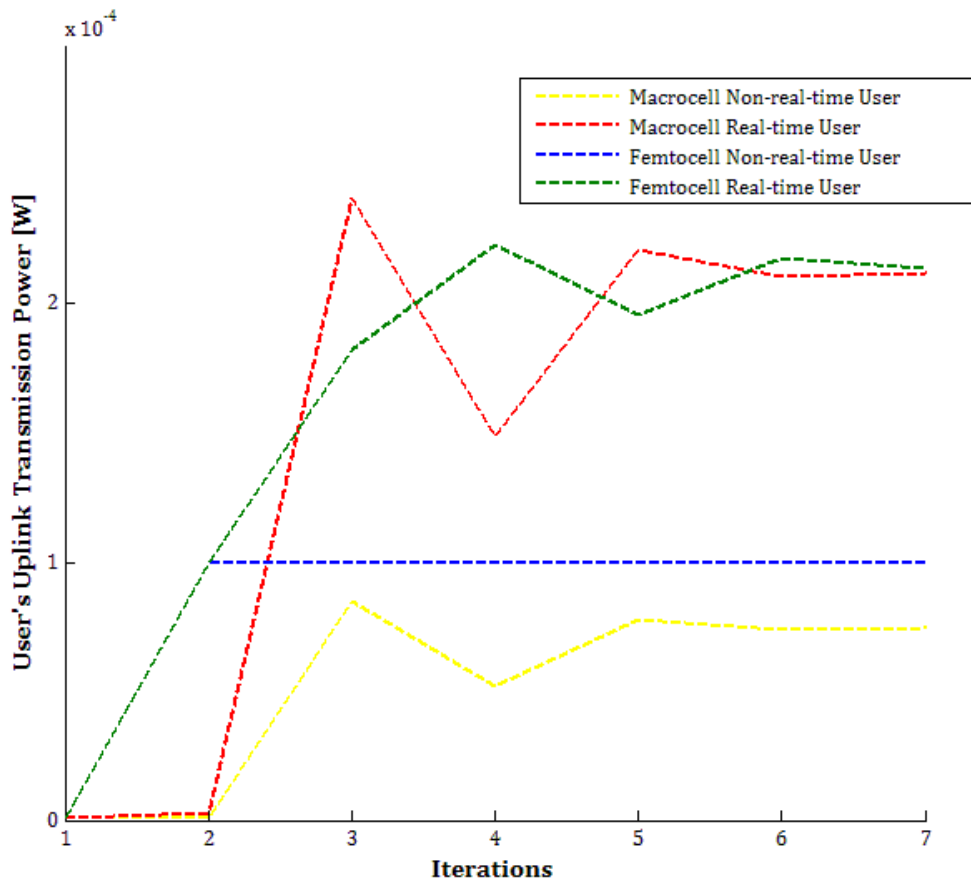
ύστερα από μόλις 30 επαναλήψεις. Από τα παραπάνω, λοιπόν, μπορούμε να συναγάγουμε ότι ο αλγόριθμος NOCES συγκλίνει σε ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash αγνής στρατηγικής, ενώ η ταχύτητα σύγκλισης είναι υψηλή όταν η παράμετρος βηματικής αύξησης b λαμβάνει υψηλές τιμές, όπως μπορούμε ευκολότερα να διαπιστώσουμε και από το Σχ. 4.



Σχ. 3 Σύγκλιση πιθανότητας επιλογής κυψέλης υπό διαφορετικές τιμές της παραμέτρου βηματικής αύξησης b για τον χρήστη $i = 1$



Σχ. 4 Πλήθος απαιτούμενων επαναλήψεων του αλγορίθμου NOCES για σύγκλιση ως συνάρτηση της τιμής της παραμέτρου b



Σχ. 5 Σύγκλιση των επιπέδων ισχύος μετάδοσης άνω ζεύξης για διάφορους χρήστες

Παράλληλα, στο Σχ. 5 παρουσιάζουμε τη σύγκλιση για το επίπεδο ισχύος εκπομπής κατά την άνω ζεύξη για διάφορους χρήστες που ανήκουν και στις τέσσερις κλάσεις που αντιστοιχούν στους κλάδους που απαρτίζουν την πολύκλαδη συνάρτηση χρησιμότητας. Η παρουσίαση αυτή γίνεται στο πλαίσιο της θεώρησης της επιλογής βέλτιστης ισχύος εκπομπής ως τμήματος του αλγορίθμου NOCES. Ειδικότερα, υποθέτουμε ότι έχουμε τέσσερις διαφορετικούς τύπους χρηστών, δηλαδή δύο χρήστες που ζητούν υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και μη πραγματικού χρόνου, αντίστοιχα, και που εξυπηρετούνται από τη μακρο-κυψέλη, καθώς και δύο χρήστες που ζητούν τους δύο αυτούς διαφορετικούς τύπους υπηρεσιών, αλλά εξυπηρετούνται από μία εκ των φεμτο-κυψελών. Στο Σχ. 5, ο αλγόριθμος NOCES έχει συγκλίνει σε ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash αγνής στρατηγικής επιλογής κυψέλης και, όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, ο ρυθμός σύγκλισης του τμήματος κατανομής ισχύος εκπομπής του αλγορίθμου NOCES

είναι αρκετά υψηλός, λόγω του γεγονότος ότι απαιτούνται μόνο 8 επαναλήψεις του βρόχου έως ότου ο αλγόριθμος προσδιορίσει τη βέλτιστη κατανομή επιπέδου ισχύος εκπομπής των χρηστών. Ακόμη, θα πρέπει να σημειώσουμε ότι οι τιμές της βέλτιστης ισχύος εκπομπής κατά την άνω ζεύξη διατηρούνται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, επειδή οι χρήστες επιλέγουν να συνδεθούν σε εκείνη την κυψέλη που ικανοποιεί τις απαιτήσεις τους για ποιότητα υπηρεσίας, προσπαθώντας παράλληλα να μεγιστοποιήσουν τη συνάρτηση χρησιμότητάς τους, που οδηγεί τελικά σε εξοικονόμηση ισχύος εκπομπής.

4.2. Δεύτερη προσέγγιση (CSPA: Cell Selection and Power Allocation)

4.2.1. Αλγόριθμος

Όπως εξηγήθηκε και προηγουμένως, κάθε παίκτης αναπαρίσταται από ένα αυτόματο εκμάθησης και οι ενέργειες του αυτομάτου είναι οι στρατηγικές επιλογές κυψέλης από τους χρήστες. Η μικτή στρατηγική

$$\mathbf{b}_i = (\Pr_{i0}, \Pr_{i1}, \dots, \Pr_{iF})$$

είναι η κατανομή πιθανότητας για τις δυνατές ενέργειες του χρήστη i , δηλαδή την επιλογή της μακρο-κυψέλης $j = 0$ ή μίας εκ των F φεμτο-κυψελών.

Όλοι οι χρήστες ξεκινούν με μία συγκεκριμένη απαίτηση ποιότητας υπηρεσίας, καθώς και θέση στο επίπεδο xy . Ακόμη, όλοι οι χρήστες έχουν μία συγκεκριμένη αρχική πιθανότητα $\Pr_{i0}(0)$ να συνδεθούν στη μακρο-κυψέλη, καθώς και ίσες πιθανότητες $\frac{1-\Pr_{i0}(0)}{k}$ να συνδεθούν σε σε ένα σύνολο k φεμτο-κυψελών που μπορούν να τους εξυπηρετήσουν (βρίσκονται δηλαδή εντός της ακτίνας κάλυψής τους). Έτσι, ο αλγόριθμος επίλυσης του συνδυαστικού προβλήματος συνίσταται στα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1: Κάθε χρήστης επιλέγει μία κυψέλη σύμφωνα με το διάνυσμα πιθανοτήτων που του αντιστοιχεί.

Βήμα 2: Υπολογίζεται ο συντελεστής απωλειών διαδρομής μεταξύ του χρήστη και του σταθμού βάσης ή του σημείου πρόσβασης της κυψέλης που τον εξυπηρετεί με βάση την απόσταση και την επιλογή κυψέλης.

Βήμα 3: Ξεκινώντας από ένα αρχικό διάνυσμα επιπέδου ισχύος εκπομπής p_i όλοι οι χρήστες υπολογίζουν διαδοχικά το βέλτιστο για αυτούς επίπεδο ισχύος εκπομπής, p_i^* , όπως ορίστηκε από τη σχέση (9), ανάλογα με την παρεμβολή που αντιλαμβάνονται από τους υπόλοιπους χρήστες. Τα επίπεδα ισχύος εκπομπής τότε ανανεώνονται και οι χρήστες επανυπολογίζουν το βέλτιστο για αυτούς επίπεδο ισχύος εκπομπής, λαμβάνοντας τώρα υπόψιν το νέο επίπεδο παρεμβολών που αντιλαμβάνονται. Ο βρόχος αυτός επαναλαμβάνεται έως ότου οι χρήστες συγκλίνουν σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο ισχύος εκπομπής με μία ορισμένη ακρίβεια.

Βήμα 4: Όλοι οι χρήστες υπολογίζουν τη συνάρτηση χρησιμότητας τους, δηλαδή τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, αφού γνωρίζουν τώρα τις παρεμβολές του συστήματος.

Βήμα 5: Αν αυτός ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων υπερβαίνει ή είναι τουλάχιστον ίσος με την απαίτηση που έχει τεθεί για την ποιότητα υπηρεσίας, τότε αυξάνουν τη συνιστώσα του διανύσματος πιθανοτήτων που αντιστοιχεί στην επιλογή της κυψέλης αυτής, κατά έναν παράγοντα $(1 + \sigma)$. Διαφορετικά, μειώνουν την πιθανότητα κατά έναν παράγοντα $(1 - \sigma)$. Τότε το άθροισμα όλων των συνιστωσών του διανύσματος πιθανοτήτων που αντιστοιχεί στον συγκεκριμένο χρήστη κανονικοποιούνται στην τιμή 1. Με τον τρόπο αυτό, στην πρώτη περίπτωση, η πιθανότητα να επιλέξει ο χρήστης εκ νέου την ίδια κυψέλη θα είναι μεγαλύτερη από προηγουμένως, το οποίο σημαίνει ότι οι πιθανότητες επιλογής των υπόλοιπων κυψελών θα μειωθεί, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, η πιθανότητα θα είναι μικρότερη από προηγουμένως, το οποίο συνεπάγεται μία ανάλογη αύξηση της πιθανότητας επιλογής οποιασδήποτε από τις υπόλοιπες κυψέλες.

Βήμα 6: Σύμφωνα με τις πιθανότητες που μόλις υπολογίστηκαν, επιστρέφουμε στο βήμα 1 και οι χρήστες επιλέγουν ξανά μία κυψέλη. Θα εξέλθουμε από τον βρόχο όταν και μόνο όταν όλοι οι χρήστες έχουν συγκλίνει (δηλ. όλοι τους έχουν πιθανότητα να επιλέξουν μία εκ των διαθέσιμων κυψελών με πιθανότητα μεγαλύτερη από $1 - \sigma$) ή μετά από έναν προκαθορισμένο μέγιστο αριθμό επαναλήψεων.

4.2.2. Σενάριο προσομοίωσης και παράμετροι

Προκειμένου να εξαγάγουμε κάποια ενδεικτικά αριθμητικά αποτελέσματα, θεωρούμε ένα σενάριο προσομοίωσης που αποτελείται από τις παραμέτρους του ακόλουθου πίνακα.

Σύμβολο	Τιμή	Περιγραφή
F	10	Συνολικό πλήθος φεμτο-κυψελών
n	30	Συνολικό πλήθος χρηστών
Pr_{64}	50%	Ποσοστό των χρηστών με απαίτηση για ποιότητα υπηρεσίας 64 kbps
Pr_{128}	30%	Ποσοστό των χρηστών με απαίτηση για ποιότητα υπηρεσίας 128 kbps
Pr_{256}	20%	Ποσοστό των χρηστών με απαίτηση για ποιότητα υπηρεσίας 256 kbps
R_M	600 m	Ακτίνα περιοχής κάλυψης μακρο-κυψέλης
R_F	100 m	Ακτίνα περιοχής κάλυψης φεμτο-κυψέλης
p_{max}	2 Watt	Μέγιστη ισχύς εκπομπής άνω ζεύξης
W	200 kHz	Εύρος ζώνης μακρο-κυψέλης
σ_n^2	$5 \cdot 10^{-15}$ Watt	Ισχύς θορύβου
σ	3%	Περιοχή σύγκλισης: Πιθανότητες υψηλότερες από $1 - \sigma$ θεωρούνται σχεδόν ίσες με 1 και επομένως το σύστημα θεωρείται ότι έχει συγκλίνει.
	10%	
	15%	
$Pr_{i0}(0)$	10%	Αρχική πιθανότητα ενός χρήστη να επιλέξει να συνδεθεί στη μακρο-κυψέλη
a_{OUT}	4	Εκθετικός παράγοντας απωλειών εξωτερικού χώρου
a_{IN}	3	Εκθετικός παράγοντας απωλειών εσωτερικού χώρου

Πίνακας 2 Παράμετροι σεναρίου προσομοίωσης για τον αλγόριθμο CSPA (Δεύτερη προσέγγιση)

Οι χρήστες, όπως ειπώθηκε, είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι στο επίπεδο xy και ο σταθμός βάσης της μακρο-κυψέλης βρίσκεται στο κέντρο του συστήματος, έτσι ώστε να είναι προσβάσιμος από όλα τα κινητά τερματικά. Την ίδια στιγμή, τα τερματικά αυτά θα έχουν τη δυνατότητα να συνδεθούν σε οποιαδήποτε κυψέλη διαθέτει σημείο πρόσβασης (ή σταθμό βάσης) που βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη από την ακτίνα της περιοχής κάλυψης της κυψέλης.

4.2.3. Αποτελέσματα προσομοίωσης

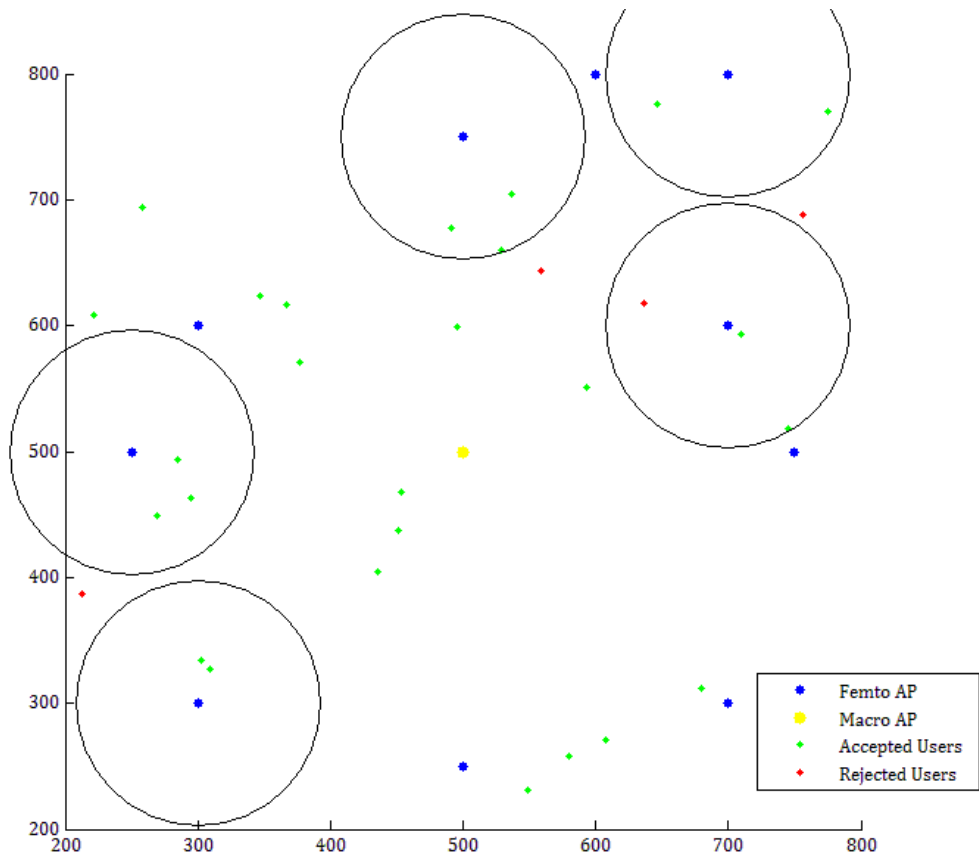
Έχοντας ορίσει το περιβάλλον της προσομοίωσης, εκτελούμε τώρα τον αλγόριθμο CSPA, από τα αποτελέσματα του οποίου εξάγουμε την τοπολογία των χρηστών και των

σημείων πρόσβασης, όπως φαίνεται στο Σχ. 6. Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι μερικοί χρήστες (σημειωμένοι με κόκκινο χρώμα) δεν κατόρθωσαν να επιτύχουν το επιθυμητό επίπεδο υπηρεσίας (ή ισοδύναμα ρυθμό μετάδοσης δεδομένων). Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί κατά μείζονα λόγο στους παρακάτω παράγοντες:

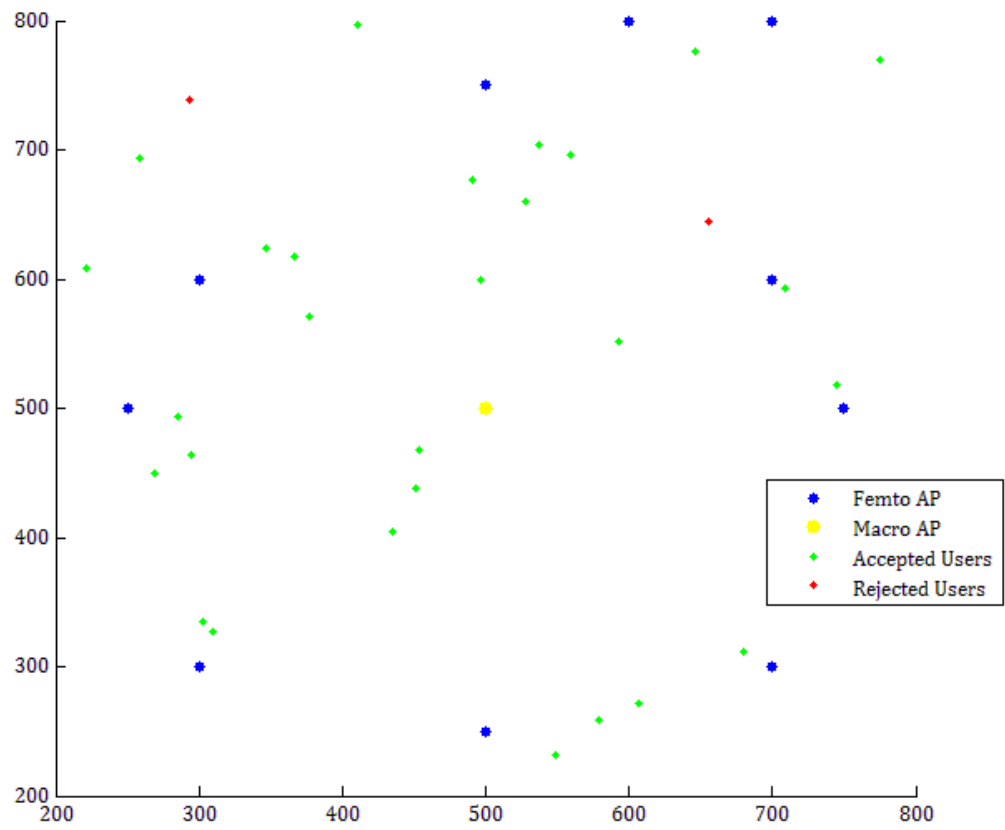
- Οι χρήστες βρίσκονται μακριά από τις φεμτο-κυψέλες, το οποίο έχει ως άμεσο επακόλουθο την ύπαρξη λιγότερων εναλλακτικών κυψελών (σημείων πρόσβασης) από τις οποίες μπορούν να εξυπηρετηθούν. Στη χειρότερη περίπτωση, το μόνο σημείο πρόσβασης που είναι διαθέσιμο για σύνδεση είναι ο σταθμός βάσης της μακρο-κυψέλης.
- Η φεμτο-κυψέλη που βρίσκεται στην κοντινή περιοχή του χρήστη είναι ήδη συμφορημένη από χρήστες που ήταν από νωρίτερα συνδεδεμένοι σε αυτήν. Αυτό σημαίνει ότι ο χρήστης θα χρειαστεί να συνδεθεί είτε σε μία άλλη φεμτο-κυψέλη που μπορεί να βρίσκεται σε κοντινή απόσταση, είτε στον σταθμό βάσης της μακρο-κυψέλης, ο οποίος ωστόσο είναι προσβάσιμος από όλους τους χρήστες του συστήματος.

Έτσι, προκειμένου να ερευνήσουμε την επίδραση που έχει η θέση του κάθε χρήστη στο πλήθος των χρηστών που τελικά απορρίφθηκαν, θα επανατοποθετήσουμε τους χρήστες που απορρίφθηκαν και θα επανεκτελέσουμε τον αλγόριθμο για όλους τους χρήστες από την αρχή. Η νέα τοπολογία φαίνεται στο Σχ. 7, όπου αξίζει να σημειωθεί ότι το πλήθος των χρηστών που δεν ικανοποίησαν τις απαιτήσεις τους σε ποιότητα υπηρεσίας έχει μειωθεί αισθητά. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει την υπόθεση ότι οι προηγούμενες θέσεις των χρηστών διαδραμάτισαν σημαντικό ρόλο, όσον αφορά τη δυνατότητά τους να επιτύχουν την ικανοποίηση των απαιτήσεών τους για συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσίας.

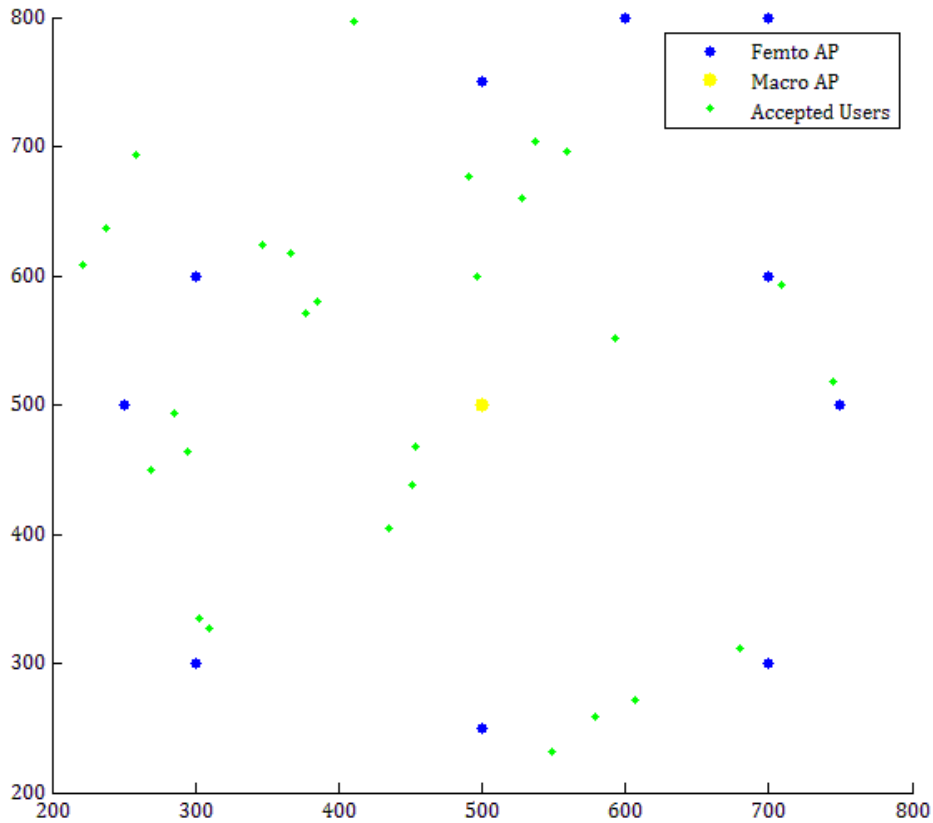
Τώρα, επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία, όπως και προηγουμένως, δηλαδή επανατοποθετούμε τους χρήστες που δεν κατάφεραν να συγκλίνουν σε μία συγκεκριμένη κυψέλη και επαναλαμβάνουμε τον αλγόριθμο. Η τοπολογία του Σχ. 8 δείχνει ότι όλοι οι χρήστες έχουν πλέον ικανοποιήσει τις προϋποθέσεις ποιότητας υπηρεσίας που είχαν, επιβεβαιώνοντας για άλλη μία φορά την επίδραση που είχε η προηγούμενή τους θέση στη δυνατότητά τους να συνδεθούν σε μία κυψέλη.



Σχ. 6 Κατανομή χρηστών και σημείων πρόσβασης μετά την πρώτη εκτέλεση του αλγορίθμου CSPA για $\sigma = 0.03$



Σχ. 7 Κατανομή χρηστών και σημείων πρόσβασης μετά τη δεύτερη εκτέλεση του αλγορίθμου CSPA για $\sigma = 0.03$



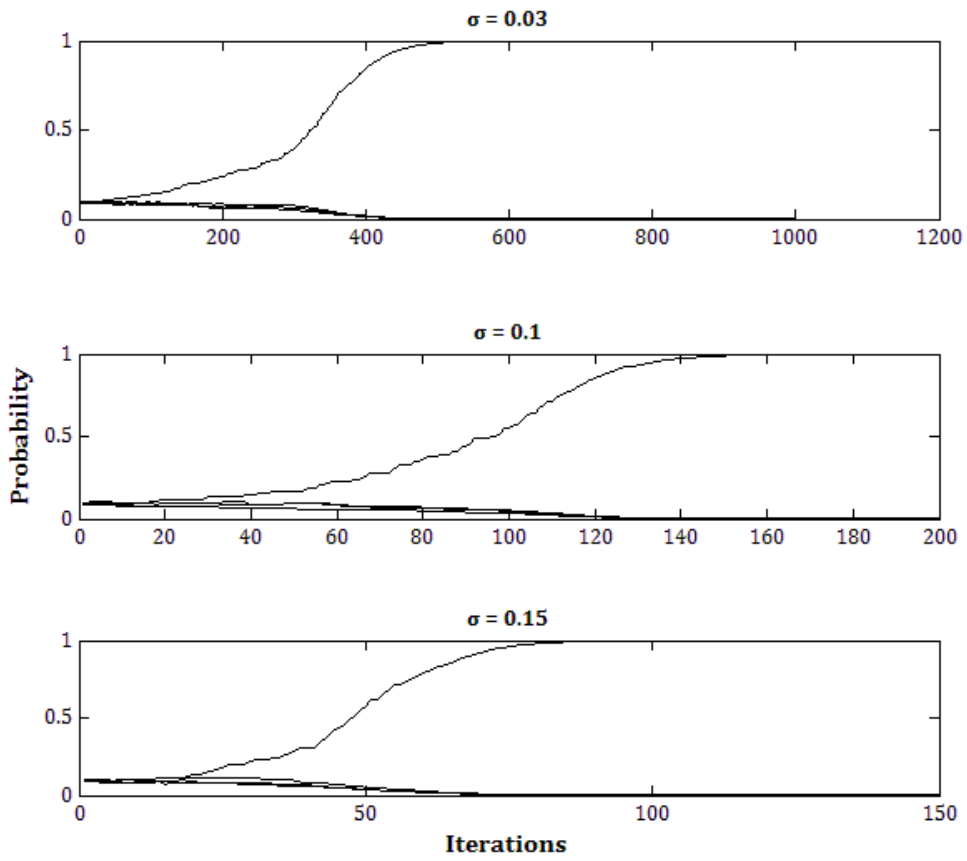
Σχ. 8 Κατανομή χρηστών και σημείων πρόσβασης μετά την τρίτη εκτέλεση του αλγορίθμου CSPA για $\sigma = 0.03$

Στο Σχ. 9 σχεδιάζουμε για τρεις διαφορετικές τιμές της παραμέτρου σ την καμπύλη της πιθανότητας ενός χρήστη $i \in \mathcal{M}$ να συνδεθεί σε μία από όλες τις κυψέλες, που έχουν τέτοιο συνδυασμό θέσης και ακτίνας περιοχής κάλυψης, ώστε να είναι εντός της εμβέλειάς του. Όπως είναι αναμενόμενο, τα αποτελέσματα είναι ανάλογα με αυτά που λάβαμε από τον αλγόριθμο NOCES. Πιο συγκεκριμένα, ο χρήστης αρχικά ξεκινά με μία αρχική πιθανότητα $\Pr_{i0} = 0.1$ για να συνδεθεί στον σταθμό βάσης της μακρο-κυψέλης και πιθανότητα $1 - \Pr_{i0}$ ίσα χωρισμένη για τις υπόλοιπες διαθέσιμες φεμτο-κυψέλες. Η πιθανότητα επιλογής της κυψέλης αυξάνεται συνεχώς, όπως φαίνεται, ενώ περιμένουμε οι αντίστοιχες πιθανότητες για τις υπόλοιπες κυψέλες να μειώνονται αναλόγως. Τελικά, μετά από περίπου 450 επαναλήψεις, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι ο χρήστης έχει πολύ υψηλή πιθανότητα, δηλαδή πολύ κοντά στο 1, για να συνδεθεί στη δεδομένη κυψέλη, τη στιγμή που οι υπόλοιπες θα λαμβάνουν πολύ χαμηλές τιμές, συγκλίνοντας στο 0.

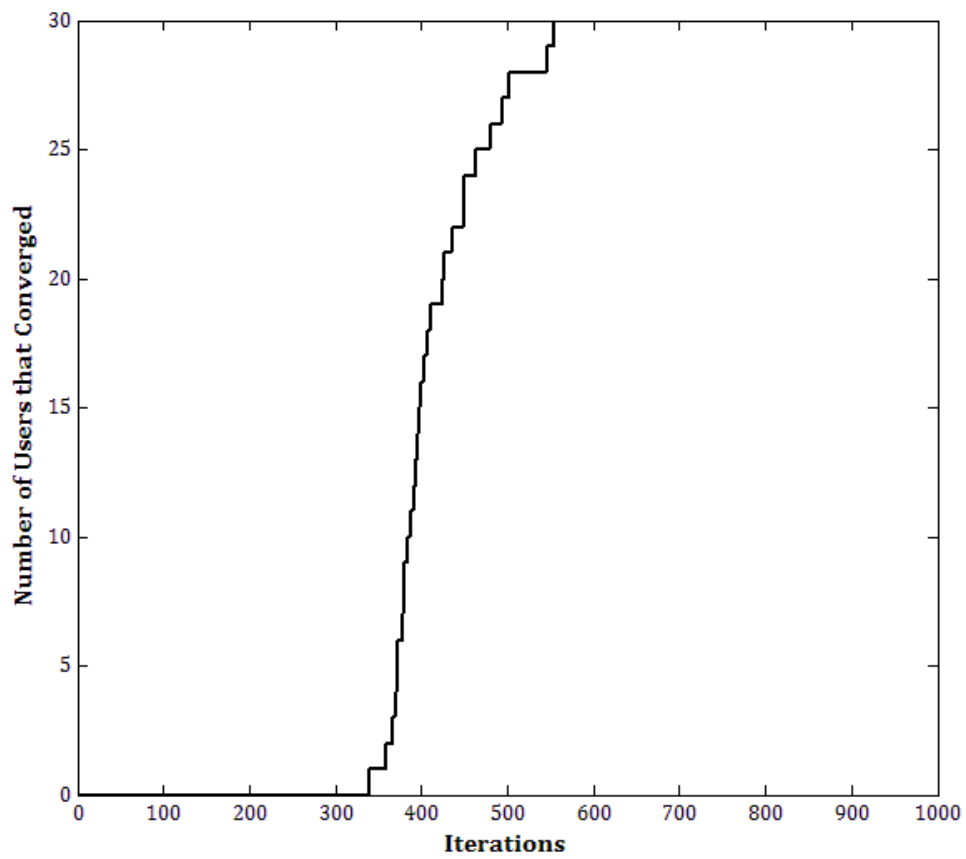
Όσον αφορά την επίδραση της τιμής της περιοχής σύγκλισης σ στα αποτελέσματα της προσομοίωσης, έχουμε να παρατηρήσουμε ότι, όπως και προηγουμένως, όσο αυξάνεται η περιοχή σύγκλισης, τόσο λιγότερες επαναλήψεις χρειάζονται για τη σύγκλιση του αλγορίθμου, όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο, αφού με την αύξηση του σ «χαλαρώνει» η απαίτηση για βεβαιότητα ότι η κυψέλη αυτή είναι η βέλτιστη, όπως θα επαληθεύσουμε και σε επόμενο σχήμα.

Σε πλήρη συμφωνία με την παραπάνω παρατήρηση είναι τα αποτελέσματα του Σχ. 10 που παρουσιάζει το πλήθος των χρηστών που έχουν συνδεθεί σε μία κυψέλη μετά από έναν συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων. Πιο συγκεκριμένα, το πλήθος των χρηστών που συγκλίνουν είναι συνεχώς αυξανόμενο, ενώ η απότομη κλίση της γραφικής παράστασης μεταξύ των 400 και των 500 επαναλήψεων υποδηλοί ότι για την πλειονότητα των χρηστών απαιτούνται περίπου 450 επαναλήψεις έως ότου επιλέξουν μία τελική κυψέλη, όπως είδαμε και στο προηγούμενο σχήμα.

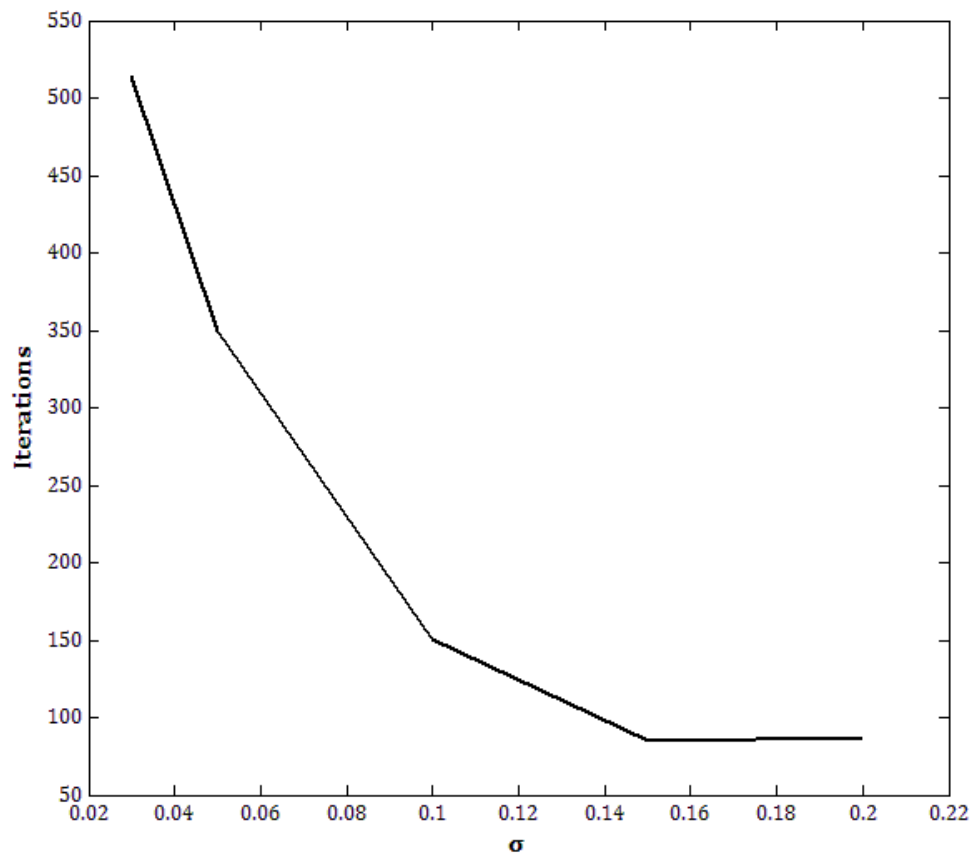
Εκτελώντας την προσομοίωση για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου σ και σημειώνοντας τον αντίστοιχο μέσο αριθμό επαναλήψεων που απαιτούνται για τη σύγκλιση των χρηστών, λαμβάνουμε το διάγραμμα του Σχ. 11 που όπως περιμέναμε είναι μία φθίνουσα συνάρτηση που συγκλίνει περίπου στις 80 επαναλήψεις για μεγάλες τιμές του σ . Αυτό πρακτικά ισοδυναμεί με την παρατήρηση που κάναμε και παραπάνω, σχετικά με την εξάρτηση του πλήθους των επαναλήψεων που χρειάζεται να εκτελέσει ο αλγόριθμος για την επίτευξη της σταθεροποίησης συναρτήσει της παραμέτρου σ .



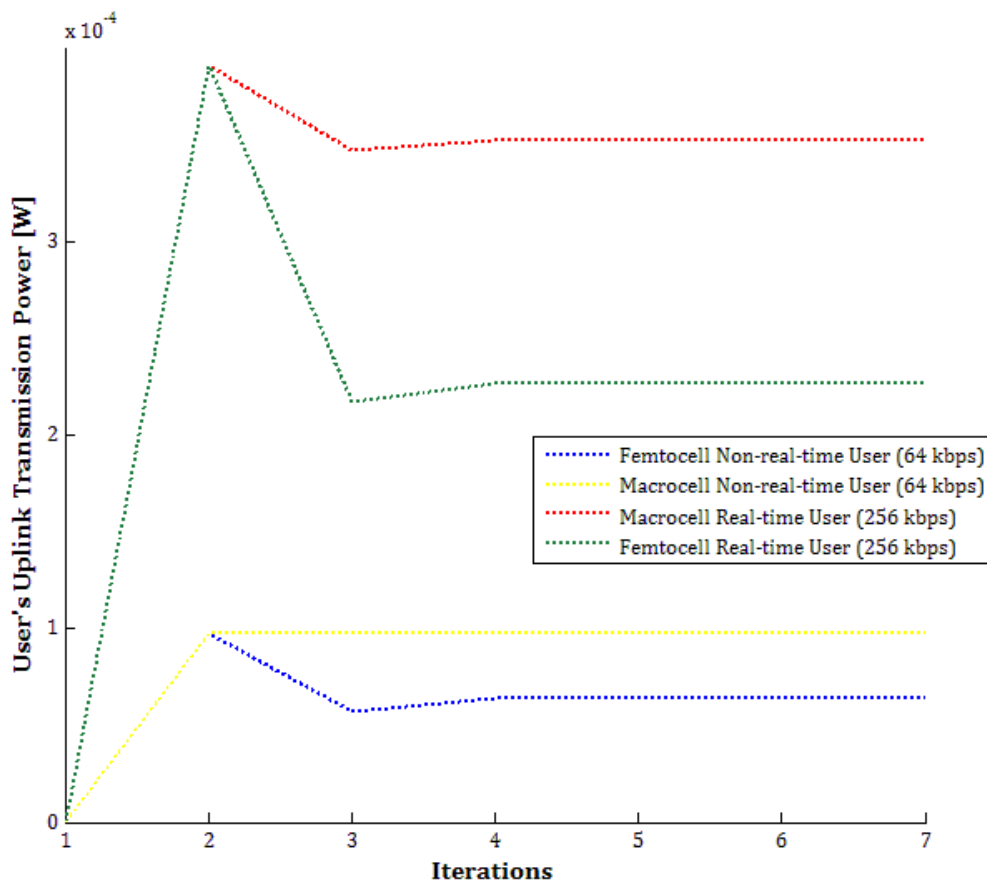
Σχ. 9 Συγκριτικό διάγραμμα σύγκλισης πιθανότητας επιλογής κυψέλης για έναν χρήστη $i \in \mathcal{M}$ για διάφορες τιμές της περιοχής σύγκλισης $\sigma = 0.03$, $\sigma = 0.1$ και $\sigma = 0.15$



Σχ. 10 Πλήθος χρηστών που έχουν συγκλίνει σε μία κυψέλη ως συνάρτηση των επαναλήψεων του αλγορίθμου CSPA για $\sigma = 0.03$



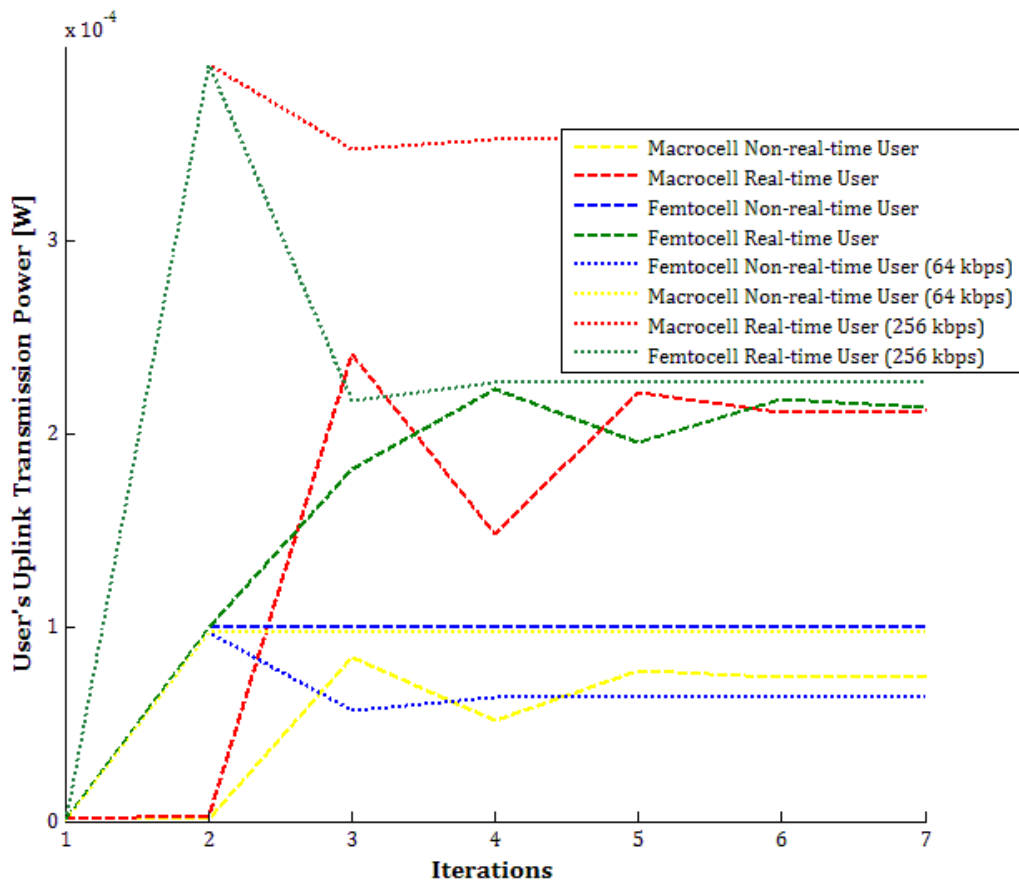
Σχ. 11 Αριθμός απαιτούμενων επαναλήψεων του αλγορίθμου CSPA για επίτευξη σύγκλισης συναρτήσεως της περιοχής σύγκλισης, σ



Σχ. 12 Σύγκλιση εκπεμπόμενης ισχύος συναρτήσει αριθμού επαναλήψεων

Πριν κλείσουμε την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων της δεύτερης προσέγγισης, αξίζει να παραθέσουμε ένα ενδεικτικό διάγραμμα για το πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής, στο οποίο μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η διαδικασία σύγκλισης και σταθεροποίησης σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο ισχύος εκπομπής άνω ζεύξης ακολουθεί πορεία παρεμφερή με αυτήν που εξετάσαμε στην προηγούμενη προσέγγιση στα αποτελέσματα της προσομοίωσης του αλγορίθμου NOCES.

Προκειμένου να αποκτήσουμε μία συγκριτική θεώρηση του παραπάνω αποτελέσματος σε σχέση με τα αντίστοιχα που εξάχθηκαν από την προηγούμενη ανάλυση, παραθέτουμε το ακόλουθο συνδυαστικό διάγραμμα.



Σχ. 13 Συγκριτικό διάγραμμα σύγκλισης εκπεμπόμενης ισχύος συναρτήσει αριθμού επαναλήψεων για τις δύο προσεγγίσεις

Από το παραπάνω συγκριτικό διάγραμμα παρατηρούμε αρχικά ότι τα επίπεδα ισχύος που προκύπτουν από την κάθε προσέγγιση δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις μεταξύ τους. Έτσι, βλέπουμε ότι και στις δύο περιπτώσεις, οι χρήστες με υψηλές απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (υπηρεσία πραγματικού χρόνου ή αντίστοιχα 256 kbps) μεταδίδουν με υψηλότερη ισχύ από τους αντίστοιχους χρήστες με χαμηλότερες απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσίας (υπηρεσία μη πραγματικού χρόνου ή αντίστοιχα 64 kbps). Η διαφορά του επιπέδου ισχύος μεταξύ δύο χρηστών με πανομοιότυπες απαιτήσεις υπηρεσίας αλλά διαφορετικό τύπο κυψέλης εξυπηρέτησης (μακρο-κυψέλη και φεμτο-κυψέλη) αξίζει να σημειωθεί ότι εξαρτάται κατά μείζονα λόγο από τις απώλειες διάδοσης. Συνεπώς, δεν είναι δυνατό να εξαχθεί ένα συμπέρασμα με γενική ισχύ για τη σχετική θέση των δύο τιμών, παρόλο που, λόγω της πολύ μικρότερης ακτίνας περιοχής κάλυψης που χαρακτηρίζει τις φεμτο-κυψέλες, αναμένεται ένας χρήστης που εξυπηρετείται από φεμτο-κυψέλη να βρίσκεται εν γένει

πλησιέστερα στο σημείο πρόσβασης, απ' ό,τι ένας χρήστης που εξυπηρετείται από τον σταθμό βάσης της μακρο-κυψέλης.

Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι τόσο αλγόριθμος NOCES όσο και ο αλγόριθμος CSPA μπορούν να χαρακτηριστούν ως αλγόριθμοι χαμηλής πολυπλοκότητας, λόγω της απλότητας των υπολογισμών που καλούνται να εκτελέσουν. Ακόμη, οι αλγόριθμοι προσδιορίζουν συνδυαστικά ανά χρονική στιγμή t τη στρατηγική βέλτιστης επιλογής κυψέλης, καθώς επίσης και του βέλτιστου επιπέδου ισχύος εκπομπής άνω ζεύξης.

5. Συμπεράσματα

Στο τελευταίο αυτό κεφάλαιο, θα δούμε συνοπτικά μερικά αντιπροσωπευτικά παραδείγματα της σχετικής έρευνας που έχει πραγματοποιηθεί στην παγκόσμια βιβλιογραφία έως τώρα και που μελετήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στη συνέχεια, θα κάνουμε μία περιληπτική αναφορά στα κοινά σημεία και τις διαφορές μεταξύ των δύο προσεγγίσεων, στη συνεισφορά της εργασίας αυτής στην έρευνα έως σήμερα και τέλος θα ολοκληρώσουμε συνοψίζοντας τα κύρια σημεία της.

5.1. Σχετική έρευνα

Η επιλογή κυψέλης είναι υπεύθυνη για την εξασφάλιση της ζητούμενης ποιότητας υπηρεσίας για τα κινητά τερματικά, καθώς και για τη διατήρηση της συνεχούς σύνδεσης των χρηστών με μία κυψέλη που παρέχει αρκετά καλή ποιότητα. Το πρόβλημα της επιλογής κυψέλης έχει αποσπάσει μεγάλη προσοχή τα τελευταία χρόνια, ενώ οι υπάρχουσες έρευνες τοποθετούν το επίκεντρό τους στις τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης, στα σχήματα ελέγχου ισχύος και στα πρωτόκολλα διαπομπής [32].

- Στο [33] προτείνεται ένας αποκεντρωμένος αλγόριθμος επιλογής κυψέλης, προκειμένου να προσδιοριστεί η κατανομή ισχύος εκπομπής μεταξύ των διαφόρων χρηστών, έτσι ώστε να ικανοποιηθούν τελικά οι απαιτούμενοι περιορισμοί λόγου σήματος προς θόρυβο και παρεμβολές ανά χρήστη. Ο αλγόριθμος προσαρμόζει το επίπεδο ισχύος εκπομπής του χρήστη και αποδεικνύεται στη συνέχεια ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει σε μία κατανομή χρηστών στις διαθέσιμες κυψέλες που είναι βέλτιστη, υπό την έννοια ότι ελαχιστοποιείται το επίπεδο παρεμβολών.
- Στο [34] προτείνεται μία διατύπωση βασισμένη στην κοστολόγηση του επιπέδου παρεμβολών, όπου δείχνεται ότι μπορεί να υπολογισθεί και στη συνέχεια να ανταλλαχθεί μία μοναδική τιμή ανά σταθμό βάσης, προκειμένου να προσδιορισθεί η τιμή της ισχύος εκπομπής των τερματικών σε κάθε κυψέλη. Βασικό θέμα της εργασίας αυτής είναι μία αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική δικτύου, όπου οι προγραμματιστές λαμβάνουν τις κατάλληλες αποφάσεις

σχετικά με τους χρήστες που είναι συνδεδεμένοι στην κάθε κυψέλη, με στόχο να βελτιώσουν την απόδοση της άνω ζεύξης μέσω ενός συνεργατικού διαμοιρασμού πόρων και τεχνικών διαχείρισης και μετριάσμου των φαινομένων παρεμβολών.

- Στο [35] προτείνεται ένα σχήμα μεταπομπών και επιλογής τοποθεσίας βασισμένο στο υπάρχον φορτίο ως μία κατανεμημένη λύση σε προβλήματα που δημιουργούνται από φαινόμενα τοπικής συμφόρησης σε ένα σύστημα μετάδοσης πακέτων δεδομένων πολλαπλών κυψελών. Ο στόχος εδώ είναι η μεγιστοποίηση του πλήθους των κινητών σταθμών, ενώ η επίτευξη της βέλτιστης λύσης προς αυτόν τον σκοπό καθίσταται δυνατή μέσω ενός αλγορίθμου προγραμματισμού για το σύστημα κινητών επικοινωνιών. Ωστόσο, τα αποτελέσματα τόσο της δημοσίευσης [33], όσο και της δημοσίευσης [35] δεν λαμβάνουν υπόψη τους ούτε τις πιθανές μεταβλητές δυνατότητες των σταθμών βάσης ούτε και τις ανάγκες των κινητών σταθμών για εύρος ζώνης.
- Στο [36] μελετάται η διαχείριση ραδιοπόρων (Radio Resource Management, RRM), αφού χωριστεί σε δύο βασικά μέρη, τη διαχείριση σε επίπεδο δικτύου και τη διαχείριση σε επίπεδο σύνδεσης. Στο πρώτο μέρος, το περιορισμένο διαθέσιμο εύρος ζώνης του κάθε δικτύου θα πρέπει να κατανεμηθεί σε κάθε μία περιοχή εξυπηρέτησης κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να μεγιστοποιούνται οι αποδόσεις των διαφόρων δικτύων πρόσβασης, οι οποίες υποτίθεται λειτουργούν υπό τη διαχείριση διαφορετικών παρόχων υπηρεσιών. Το δεύτερο μέρος θα πρέπει να υλοποιείται σε βραχύτερο χρονικό διάστημα, ενώ οφείλει να προσαρμόζεται σύμφωνα με τη δημιουργία και την απόλυση κάθε σύνδεσης εντός μίας περιοχής εξυπηρέτησης.
- Στο [37] επιλύεται το πρόβλημα της επιλογής δικτύου, με τη θεώρηση χρηστών που έχουν διαφορετικές απαιτήσεις υπηρεσιών κατά την ασύρματη πρόσβασή τους. Η προσέγγιση γίνεται με χρήση των εξελικτικών παιγνίων, ώστε να μελετηθεί η δυναμική της συμπεριφοράς των χρηστών και η λύση του ζητήματος της επιλογής δικτύου. Πέραν από τον αλγόριθμο εξέλιξης του πληθυσμού, προτείνεται επίσης ένας αλγόριθμος εκμάθησης. Σε κανένα εκ των [36] και [37] δεν λαμβάνονται υπόψη οι συνθήκες που επικρατούν στον δίαυλο και ο τρόπος κατανομής των πόρων.

- Στο [38] προτείνεται η λειτουργία υβριδικής πρόσβασης, κατά την οποία επιτρέπεται σε περιορισμένο αριθμό μη εγγεγραμμένων χρηστών να συνδέονται στο σημείο πρόσβασης μίας φεμτο-κυψέλης, με σκοπό τη μείωση του φαινομένου των «θορυβωδών γειτόνων». Έτσι, υιοθετείται μία ενδιάμεση μέθοδος πρόσβασης, η οποία βασίζεται στα σχήματα περιορισμένης πρόσβασης. Η λύση που δίνεται υπόσχεται αύξηση της συνολικής απόδοσης του δικτύου με ταυτόχρονη εξασφάλιση των ελάχιστων απαιτήσεων σε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων από και προς το δίκτυο για τους εγγεγραμμένους χρήστες. Παρόλα αυτά, αυτό το σχήμα υβριδικής πρόσβασης εισάγει τον συμβιβασμό μεταξύ του ρυθμού μετάδοσης των εγγεγραμμένων και της συνολικής καλής επίδοσης του δικτύου, το οποίο κατ' επέκταση έχει ως αποτέλεσμα να θυσιάζεται η μέγιστη δυνατή επιτεύξιμη απόδοση των εγγεγραμμένων χρηστών, όπως αναφέρεται και στο [27].
- Στο [27] εξετάζεται η λειτουργία κλειστής πρόσβασης για τη χρήση των φεμτο-κυψελών μόνο από τους εξουσιοδοτημένους εγγεγραμμένους χρήστες και η λειτουργία ανοικτής πρόσβασης για τη χρήση των φεμτο-κυψελών από όλους τους χρήστες του συστήματος, ενώ όλοι έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν την υπερκείμενη μακρο-κυψέλη. Η ύπαρξη σημείου ισορροπίας κατά Nash αγνής στρατηγικής αποδεικνύεται ότι οδηγεί σε μία κατάσταση που ωφελεί όλους τους χρήστες, εγγεγραμμένους και μη εγγεγραμμένους.
- Στο [26] ως στόχος τίθεται η μεγιστοποίηση του αθροίσματος των ρυθμών μετάδοσης για όλους τους χρήστες. Έτσι, παρουσιάζεται ένας κατανεμημένος αλγόριθμος με στόχο τον εντοπισμό των σημείων ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου με περιορισμένες πληροφορίες από το σύστημα. Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται στην ιδέα των αυτομάτων εκμάθησης που επιτυγχάνει βέλτιστο ή σχεδόν βέλτιστο άθροισμα ρυθμών επίδοσης.
- Στο [39] προτείνεται ένα σχήμα επιλογής δικτύου βασισμένο επίσης στη θεωρία παιγνίων, όπου λαμβάνονται υπόψη πολλαπλές κλάσεις διακίνησης δεδομένων και κινητικότητας των τερματικών. Το σχήμα έχει ως στόχο να μεγιστοποιήσει το πλήθος των εξυπηρετούμενων κλήσεων, να ελαχιστοποιήσει τον ρυθμό μεταπομπών και φυσικά να υποστηρίξει την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας. Μετά την εύρεση των υποψήφιων δικτύων για το αίτημα κλήσης, η τιμή της

απόδοσης για το κάθε υποψήφιο δίκτυο θα μπορούσε να υπολογιστεί έτσι ώστε να αναπαριστά την ικανοποίηση των απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας για το αίτημα της κλήσης. Υιοθετείται επίσης ένα συνεργατικό παίγνιο για τον υπολογισμό μίας τιμής προτίμησης για το κάθε υποψήφιο δίκτυο. Τελικά, θα επιλεγεί το δίκτυο με το μέγιστο αποτέλεσμα που προκύπτει ως γραμμικός συνδυασμός της τιμής απόδοσης και της τιμής προτίμησης ως το καταλληλότερο δίκτυο για το αίτημα κλήσης.

- Στο [32] το πρόβλημα της από κοινού επιλογής κυψέλης και κατανομής πόρων εξετάζεται σαν ένα συνδυαστικό διεπίπεδο παίγνιο που ονομάζεται δια-κυψελικό παίγνιο και ενδο-κυψελικό παίγνιο, αντίστοιχα. Στο πρώτο επίπεδο, δηλαδή στο δια-κυψελικό παίγνιο, οι χρήστες επιλέγουν την καλύτερη κυψέλη, σύμφωνα με μία στρατηγική επιλογής της βέλτιστης κυψέλης που προκύπτει από την αναμενόμενη απόδοση. Στο δεύτερο επίπεδο, δηλαδή στο ενδο-κυψελικό παίγνιο, οι χρήστες επιλέγουν τον κατάλληλο ραδιοπόρο στην εξυπηρετούσα κυψέλη, ώστε να επιτύχουν μέγιστη απόδοση. Ως αποτέλεσμα της δομής του παιγνίου, επιτυγχάνεται αυτόματα εξισορρόπηση του φορτίου του δικτύου μέσω των δύο επιπέδων του παιγνίου. Τελικά, προτείνονται δύο κατανεμημένοι αλγόριθμοι που επιτρέπουν στα ανεξάρτητα κινητά τερματικά να συγκλίνουν στα σημεία ισορροπίας κατά Nash.
- Στο [3] προτείνονται αλγόριθμοι αποκεντρωμένης κατανομής πόρων, οι οποίοι επιτρέπουν στους σταθμούς βάσης να επιλέξουν από μία δεξαμενή ευνοϊκών πόρων με χαμηλά επίπεδα παρεμβολών, βασιζόμενοι σε τοπική μόνο γνώση. Η επιθυμητή απονομή πόρων στο επίπεδο του χρήστη από αυτήν τη δεξαμενή θα υλοποιηθεί τότε από ταχύτατους προγραμματιστές που λειτουργούν στους προεπιλεγμένους πόρους εντός της κάθε κυψέλης.
- Στο [28] το πρόβλημα του παρόχου υπηρεσιών μοντελοποιείται σαν ένα παίγνιο Stackelberg, με τους παρόχους να ενεργούν ως ηγέτες που ρυθμίζουν τις τιμές της αγοράς και τους πελάτες να ενεργούν ως ακόλουθοι που ανταποκρίνονται στις εκάστοτε πολιτικές τιμολόγησης. Αποδεικνύεται, λοιπόν, η ύπαρξη ενός σημείου ισορροπίας Wardrop για το παίγνιο των ακολούθων, ενώ αποδεικνύεται ότι το αποτέλεσμα για κάθε βέλτιστη απόκριση χαρακτηρίζεται από οριακές τιμές, οι οποίες χωρίζουν τους πελάτες που τελικά θα επιλέξουν διαφορετικές υπηρεσίες. Παράλληλα, παρέχεται ένας επαναληπτικός

αλγόριθμος, προκειμένου να υπολογιστούν τα παραπάνω κατώφλια, καθώς και να προσεγγισθεί το σημείο ισορροπίας Wardrop, προσομοιώνοντας έτσι τη συμπεριφορά των πελατών σε μία ανταγωνιστική αγορά.

5.2. Συνεισφορά

Σε αυτήν την εργασία, αντιμετωπίστηκε το πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής κυψέλης και ελέγχου ισχύος εκπομπής στην άνω ζεύξη ενός διεπίπεδου δικτύου φεμτο-κυψελών ανοικτής πρόσβασης με υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών. Ύστερα από σύγκριση με την υπάρχουσα βιβλιογραφία που μελετήθηκε, μερικές από τις κύριες συνεισφορές της εργασίας αυτής είναι οι ακόλουθες:

- η από κοινού επίλυση των προβλημάτων κατανομής ισχύος εκπομπής και επιλογής κυψέλης
- η διαφοροποίηση υπηρεσιών και η δυνατότητα που παρέχεται σε έναν χρήστη να επιλέξει ελεύθερα τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης ή τις απαιτήσεις του σε όρους ποιότητας υπηρεσίας
- τη δυνατότητα που δίνεται σε έναν πάροχο υπηρεσιών να επιβάλει τη δική του πολιτική τιμολόγησης, σύμφωνα με την προσφερόμενη υπηρεσία προς τους πελάτες
- τη δυνατότητα ενός παρόχου να επιλέξει τον βαθμό στον οποίο είναι πρόθυμος να ανταλλάξει το διαθέσιμο εύρος ζώνης με το επίπεδο παρεμβολών μέσω ρύθμισης των αντίστοιχων παραμέτρων του συστήματος

5.3. Σύγκριση των δύο προσεγγίσεων

Όπως έχει γίνει έως τώρα αντιληπτό, οι δύο προσεγγίσεις είχαν ως στόχο τη μελέτη και στη συνέχεια την επίλυση του ίδιου βασικού συνδυαστικού προβλήματος, αυτού της επιλογής κυψέλης μαζί με ταυτόχρονη επιλογή κατάλληλου επιπέδου ισχύος εκπομπής.

Έχοντας αυτό κατά νου, ήταν αναμενόμενο οι δύο μελέτες να παρουσιάζουν μερικά κοινά χαρακτηριστικά, μεταξύ των οποίων τα ακόλουθα:

- Όσον αφορά το πρόβλημα της κατανομής ισχύος εκπομπής, μπορούμε να δούμε ότι και οι δύο προσεγγίσεις έδωσαν παρεμφερή αποτελέσματα, αφού η ισχύς εκπομπής και στις δύο περιπτώσεις συνέκλινε σε μία τιμή ισορροπίας εντός των ίδιων επιτρεπτών ορίων.
- Η πυκνότητα τοποθέτησης των σημείων πρόσβασης των φεμτο-κυψελών συνιστά καθοριστικό παράγοντα για την απόδοση του συστήματος, αφού συνδέεται άμεσα με τη χωρητικότητά του και επομένως τη δυνατότητά του να εξυπηρετεί αυξημένη κίνηση.
- Η ταχύτητα σύγκλισης και των δύο αλγορίθμων παρουσίασε σημαντική εξάρτηση από την παράμετρο βηματικής αύξησης b στην πρώτη προσέγγιση και την περιοχή σύγκλισης σ στη δεύτερη προσέγγιση. Όπως διαπιστώσαμε, η αύξηση των τιμών αυτών είχε ως άμεση συνέπεια μία αντίστοιχη μείωση στον χρόνο σύγκλισης ή ισοδύναμα στον αριθμό των απαιτούμενων επαναλήψεων για την επίτευξη μίας κατάστασης ισορροπίας. Η παρόμοια αυτή συμπεριφορά που παρουσίασαν οι δύο παράμετροι μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτή, λόγω των ομοιοτήτων που παρουσιάζει και η σκοπιμότητά τους, η οποία ήταν να καθορίσει το σημείο πέραν του οποίου ένας χρήστης είναι βέβαιος ότι μία επιλογή συνιστά βέλτιστη επιλογή για αυτόν.

Ωστόσο, θα ήταν παράλειψη να αγνοήσουμε τα διαφοροποιητικά στοιχεία ανάμεσα στις δύο θέσεις, τα οποία αντικατοπτρίζονται μάλιστα στις ποιοτικές διαφορές που παρουσίασαν τα εξαγόμενα αποτελέσματα:

- Στην πρώτη περίπτωση, οι χρήστες ανήκουν σε δύο κλάσεις υπηρεσιών, τις πραγματικού χρόνου και τις μη πραγματικού χρόνου, ενώ στη δεύτερη περίπτωση οι χρήστες έχουν τη δυνατότητα να επιλέγουν ένα επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας μέσα από ένα συνεχές φάσμα, αφού αυτή ορίστηκε ως ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων.
- Η προσέγγιση NOCES υποδεικνύει κοινή αντιμετώπιση του συστήματος απέναντι σε όσα τερματικά επιλέγουν να συνδεθούν σε μία φεμτο-κυψέλη, ενώ ο μοναδικός διαχωρισμός που υφίσταται από την πλευρά του παρόχου είναι αυτή μεταξύ του σημείου πρόσβασης μίας φεμτο-κυψέλης και του σταθμού βάσης της μακρο-κυψέλης. Αντίθετα, στην προσέγγιση CSPA, είδαμε ότι τα σημεία πρόσβασης των φεμτο-κυψελών που ανήκουν στο ετερογενές δίκτυο

μπορεί να έχουν διαφορετικό διαθέσιμο εύρος ζώνης ή να εφαρμόζουν διαφορετική πολιτική τιμολόγησης, επηρεάζοντας έτσι τα αντίστοιχα σημεία ισορροπίας του συστήματος.

5.4. Επίλογος

Στοχεύοντας ταυτόχρονα στη διαχείριση πολλαπλών υπηρεσιών με διαφορετικές ποιοτικές απαιτήσεις, αλλά και στην αντιμετώπιση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών διαφόρων διεπίπεδων δικτύων φεμτο-κυψελών κάτω από ένα κοινό πλαίσιο μελέτης, εισαγάγαμε και αναλύσαμε μία μεθοδολογία βασισμένη στην απόδοση των χρηστών. Ειδικότερα, διατυπώσαμε δύο μη συνεργατικά προβλήματα βελτιστοποίησης για την επιλογή κυψέλης (NOCES και CSPA) και αποδείχθηκε ότι το πρώτο συνιστά παίγνιο δυναμικού. Επιπλέον, δείχθηκε η ύπαρξη μίας κατάστασης ισορροπίας και για την κάθε προσέγγιση προτάθηκε ένας καταναμημένος αλγόριθμος χαμηλής πολυπλοκότητας, προκειμένου να το προσδιορίσουμε, σύμφωνα με μία προσέγγιση βασισμένη στην εκμάθηση από τις προηγούμενες στρατηγικές επιλογής κυψέλης που ακολούθησαν οι χρήστες. Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι η προσέγγισή μας διευκολύνει τη δημιουργία ενός κοινού πλαισίου μελέτης, όπου η ευφυΐα που απαιτείται για τον έλεγχο και η διαδικασία λήψης αποφάσεων εξαρτάται πλέον από τους χρήστες που είναι υπεύθυνοι τόσο για την επιλογή της κυψέλης, όσο και για τη γενικότερη κατανομή των πόρων. Μία τέτοια θεώρηση είναι πλήρως εναρμονισμένη και ευθυγραμμισμένη με τις τρέχουσες προσπάθειες για την υλοποίηση λειτουργιών αυτοβελτιστοποίησης από τη μεριά των ίδιων των χρηστών, όπως μπορούμε να συναγάγουμε από τη μελέτη και εξέταση των προσπαθειών και προδιαγραφών των 3GPP LTE και LTE Advanced.

Βιβλιογραφία

- [1] E. Farag, M. Saleh, N. Elnady and M. Elmasry, "Structure and Network Control of Hierarchical Mobile Network Architecture," in *IEEE Fourteenth Annual International Phoenix Conference on Computers and Communications*, 1995.
- [2] K. I. Aardal, S. P. M. van Hoesel, A. M. C. A. Koster, C. Mannino and A. Sassano, "Models and Solution Techniques for Frequency Assignment Problems," *Annals of Operations Research*, vol. 153, no. 1, pp. 79-129, 2007.
- [3] J. Ellenbeck, C. Hartmann and L. Berlemann, "Decentralized Inter-Cell Interference Coordination by Autonomous Spectral Reuse Decisions," in *14th European Wireless Conference*, 2008.
- [4] C. Yang, X. Yubin, X. Rongqing and S. Xuejun, "A Heterogeneous Wireless Network Selection Algorithm Based on Non-Cooperative Game Theory," in *6th International ICST Conference on Communications and Networking in China*, 2011.
- [5] K. Aardal, S. van Hoesel, A. Koster, C. Mannino and A. Sassano, "Models and Solution Techniques for Frequency Assignment Problems," *Annals of Operations Research*, vol. 153, no. 1, pp. 79-129, 2007.
- [6] D. Amzallag, R. Bar-Yehuda, D. Raz and G. Scalosub, "Cell Selection in 4G Cellular Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 12, no. 7, 2013.
- [7] K. S. Madanpuri, "How Cell Selection and Reselection Takes Place," 2011.
- [8] J. Korhonen, *Introduction to 3G Mobile Communications*, Artech House, 2003.
- [9] S. Sudhansu, "Cell Selection and Reselection in LTE UE," 2012.
- [10] Wikipedia, "Small Cell," [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Small_cell.
- [11] B. Polak, "Game Theory: Lecture 1 Transcript ECON 159," Open Yale Courses, 2007.
- [12] Han/Liu, *Resource Allocation for Wireless Networks: Basics, Techniques and Applications*, Cambridge University Press, 2008.
- [13] M. J. Osborne and A. Rubinstein, *A Course in Game Theory*, Cambridge, 1994.
- [14] A. Wang, Y. Cai, W. Yang and Z. Hou, "A Stackelberg Security Game with Cooperative Jamming over a Multiuser OFDMA Network," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2013.

- [15] Wikipedia, "Stackelberg Competition," [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Stackelberg_competition.
- [16] R. Notes, *The Basics of Game Theory*, Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [17] M. Voorneveld, "Potential Games and Interactive Decisions with Multiple Criteria," PhD Dissertation, Tilburg University, 1999.
- [18] D. Monderer and S. Lloyd, "Potential Games," *Games and Economic Behavior*, vol. 14, pp. 124-143, 1996.
- [19] D. Shah and J. Shin, "Dynamics in Congestion Games," in *Proceedings of ACM SIGMETRICS*, 2010.
- [20] Wikipedia, "Congestion Game," [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Congestion_game.
- [21] Wikipedia, "John Glen Wardrop," [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/John_Glen_Wardrop.
- [22] Wikipedia, "Evolutionary Game Theory," [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Evolutionary_game_theory.
- [23] D. Easley and J. Kleinberg, *Networks, Crowds and Markets: Reasoning about a Highly Connected World*, Cambridge University Press, 2010.
- [24] Z. Feng, L. Song, Z. Han, D. Niyato and X. Zhao, "Cell Selection in Two-Tier Femtocell Networks with Open/Closed Access Using Evolutionary Game," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2013.
- [25] H. Tembine, E. Altman, R. El-Azouzi and Y. Hayel, "Evolutionary Games in Wireless Networks," in *IEEE Transactions on Systems, MAN and Cybernetics*, 2010.
- [26] P. Han, H. Tian, W. Xie, W. Zhong and N. Li, "Network Selection in Heterogeneous Wireless Networks Using Learning Automata," in *International Conference on Wireless Communications & Signal Processing*, 2012.
- [27] J.-S. Lin and K.-T. Feng, "Game Theoretical Model and Existence of Win-Win Situation for Femtocell Networks," in *IEEE International Conference on Communications*, 2011.
- [28] L. Rose, E. V. Belmega, W. Saad and M. Debbah, "Dynamic Service Selection Games in Heterogeneous Small Cell Networks with Multiple Providers," in *International Symposium on Wireless Communication Systems*, 2012.

- [29] M. Ibrahim, K. Khawam and S. Tohme, "Congestion Games for Distributed Radio Access Selection in Broadband Networks," in *IEEE Global Telecommunications Conference*, 2010.
- [30] E. E. Tsiropoulou, G. K. Katsinis, P. Vamvakas and S. Papavassiliou, "Efficient Uplink Power Control in Multi-Service Two-Tier Femtocell Networks via a Game Theoretic Approach," in *IEEE 18th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks*, 2013.
- [31] P. S. Sastry, V. V. Phansalkar and M. Thathachar, "Decentralized Learning of Nash Equilibria in Multi-Person Stochastic Games with Incomplete Information," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 24, no. 5, pp. 769-777, 1994.
- [32] L. Gao, X. Wange, S. Gaofei and Y. Xu, "A Game Approach for Cell Selection and Resource Allocation in Heterogeneous Wireless Networks," in *8th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*, 2011.
- [33] S. V. Hanly, "An algorithm for combined cell-site selection and power control to maximize cellular spread spectrum capacity," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 13, no. 7, 1995.
- [34] C. Shi, M. Honig, S. Nagaraj and P. Fleming, "Uplink Distributed Power and Receiver Optimization Across Multiple Cells," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference: MAC and Cross-Layer Design*, 2012.
- [35] A. Sang, X. Wang, M. Madhian and R. D. Gitlin, "A Load-Aware Handoff and Cell-Site Selection Scheme in Multi-Cell Packed Data Systems," in *IEEE Global Telecommunications Conference*, 2004.
- [36] D. Niyato and E. Hossain, "A Noncooperative Game-Theoretic Framework for Radio Resource Management in 4G Heterogeneous Wireless Access Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 7, no. 3, pp. 332-345, 2008.
- [37] D. Niyato and H. Ekram, "Dynamics of Network Selection in Heterogeneous Wireless Networks: An Evolutionary Game Approach," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 4, pp. 2008-2017, 2009.
- [38] A. Valcarce, D. López-Pérez, G. De La Roche and J. Zhang, "Limited Access to OFDMA Femtocells," in *IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2009.

- [39] C.-J. Chang, T.-L. Tsai and Y.-H. Chen, "Utility and Game-Theory Based Network Selection Scheme in Heterogeneous Wireless Networks," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2009*.
- [40] I. K. a. M. Naghshineh, "Channel Assignment Schemes for Cellular Mobile Telecommunication Systems: A Comprehensive Survey," *IEEE Personal Communications*, vol. 3, no. 3, pp. 10-31, 1996.
- [41] E. E. Tsiropoulou, G. K. Katsinis, A. Filios and S. Papavassiliou, "On the Problem of Optimal Cell Selection & Uplink Power Control in Open Access Multi-Service Two-Tier Femtocell Networks," 2014.