



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

**Βελτιστοποίηση Ασύρματων Κυψελωτών Δικτύων με  
Υποστήριξη Άμεσης Επικοινωνίας**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

Γεώργιος Κ. Κατσίνης

Αθήνα, Νοέμβριος 2017





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

## Βελτιστοποίηση Ασύρματων Κυψελωτών Δικτύων με Υποστήριξη Άμεσης Επικοινωνίας

### ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Γεώργιος Κ. Κατσίνης

**Συμβουλευτική Επιτροπή :** Συμεών Παπαβασιλείου

Βασίλειος Μάγκλαρης

Μιχαήλ Θεολόγου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την ... Νοεμβρίου 2017.

.....

Συμεών Παπαβασιλείου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Δημήτριος Ασκούνης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Βασίλειος Μάγκλαρης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ιωάννα Ρουσσάκη

Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....

Γεώργιος Ευθύμογλου

Καθηγητής Παν. Πειραιώς

.....

Αθανάσιος Παναγόπουλος

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ιάκωβος Βενιέρης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Γεώργιος Κ. Κατσίνης

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

Copyright © Γεώργιος Κ. Κατσίνης, 2017

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.

## Περίληψη

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής ομάδων πόρων κι ισχύος εκπομπής σε ασύρματα κυψελωτά δίκτυα επικοινωνιών με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας των χρηστών. Οι χρήστες του δικτύου επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους είτε χρησιμοποιώντας διαφορετικές ομάδες πόρων από τους συμβατικούς χρήστες κυψελωτής επικοινωνίας (overlay) είτε μοιραζόμενοι κοινές ομάδες πόρων με τους χρήστες κυψελωτής επικοινωνίας (underlay). Για τον πρώτο τρόπο χρήσης των ομάδων πόρων (overlay) μελετήθηκε η διαδικασία ανάθεσης τους μέσω ενός μοντέλου ουρών αναμονής και βελτιστοποιήθηκε ως προς την ελαχιστοποίηση και την εξισορρόπηση των πιθανοτήτων μη εξυπηρέτησης των χρηστών. Για το δεύτερο τρόπο χρήσης των ομάδων πόρων, δηλαδή της κοινής χρήσης ομάδων πόρων (underlay), αρχικά μελετήθηκε το πρόβλημα της κατανομής ισχύος εκπομπής στην άνω ζεύξη ενός δικτύου με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας. Αποδείχθηκε η ύπαρξη ενός σημείου ισορροπίας (ΣΙ) Nash και προτάθηκε ένας κατανεμημένος αλγόριθμος βέλτιστης απόκρισης που συγκλίνει σε αυτό.

Στη συνέχεια και με στόχο την ελαχιστοποίηση των συνολικών παρεμβολών στο δίκτυο μελετήθηκε το συνδυαστικό πρόβλημα κατανομής ομάδων πόρων κι ισχύος εκπομπής σε περιβάλλον μίας αλλά και περισσότερων κυψελών. Το παραπάνω πρόβλημα είναι ένα πρόβλημα μικτού ακέραίου προγραμματισμού. Λόγω της ιδιαίτερα υψηλής υπολογιστικής πολυπλοκότητας του προβλήματος αυτού, αναλύθηκε σε δύο υποπροβλήματα. Πρώτα μελετήθηκε το πρόβλημα κατανομής ομάδων πόρων για σταθερή ισχύ εκπομπής και στη συνέχεια με δεδομένο το αποτέλεσμα από την επίλυσή του, αντιμετωπίστηκε το πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής για κάθε διαθέσιμη ομάδα πόρων. Για καθένα από τα παραπάνω προβλήματα προτάθηκαν κατανεμημένες και αποδοτικές υπολογιστικά προσεγγίσεις.

Για την περίπτωση της μιας κυψέλης θεωρήθηκε ότι οι χρήστες κυψελωτής επικοινωνίας έχουν επιλέξει καθένας τους μια διαφορετική ομάδα πόρων και μοντελοποιήθηκε το πρόβλημα επιλογής ομάδας πόρων για τους χρήστες άμεσης επικοινωνίας. Το πρόβλημα αυτό μοντελοποιήθηκε ως ένα ακριβές δυναμικό παίγνιο για το οποίο η συνάρτηση δυναμικού του ταυτίζεται με τις συνολικές παρεμβολές στο δίκτυο. Τα παίγνια αυτά διαθέτουν εξαιρετικά επιθυμητές ιδιότητες που αφορούν την ύπαρξη τουλάχιστον ενός ΣΙ Nash αλλά κι ενός αλγορίθμου βέλτιστης απόκρισης που συγκλίνει σε αυτό εντός πεπερασμένου πλήθους βημάτων. Για το δεύτερο πρόβλημα της κατανομής ισχύος εκπομπής προτάθηκε ένα μη συνεργατικό κοίλο παίγνιο το οποίο ωθεί τους χρήστες στην επίτευξη ενός ελάχιστα επιθυμητού επιπέδου σηματοθορυβικού λόγου με την ελάχιστη δυνατή τιμή ισχύος εκπομπής. Για το παίγνιο αυτό αποδείχθηκε η σύγκλιση του στο απαραίτητο ΣΙ Nash τόσο θεωρητικά όσο και μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων.

Στη συνέχεια η προηγούμενη προσέγγιση επεκτάθηκε προκειμένου να αντιμετωπίσει το αντίστοιχο πρόβλημα συνδυαστικής κατανομής ομάδων πόρων κι ισχύος εκπομπής σε περιβάλλον πολλαπλών κυψελών. Εδώ επεκτάθηκε η έννοια της κυψέλης για να καλύψει και την περίπτωση των χρηστών

άμεσης επικοινωνίας. Έτσι διατυπώθηκε ένα παίγνιο κατανομής ομάδων πόρων με παίκτες όλους τους πιθανούς δέκτες του δικτύου είτε αυτοί εξυπηρετούν ένα χρήστη (δέκτες χρηστών άμεσης επικοινωνίας) είτε περισσότερους (σταθμοί βάσης). Στο πρώτο στάδιο της προσέγγισης το παίγνιο κατανομής ομάδων πόρων μοντελοποιείται ως ένα διμερές συμμετρικό παίγνιο το οποίο αποτελεί μια ειδική κατηγορία ακριβούς δυναμικού παιγνίου. Έτσι εκμεταλλευόμενοι τις επιθυμητές ιδιότητες των δυναμικών παιγνίων σχεδιάστηκε ένας αλγόριθμος βέλτιστης απόκρισης που συγκλίνει στο επιθυμητό ΣΙ Nash εντός πεπερασμένου πλήθους βημάτων. Επίσης προτάθηκε μια πιθανοτική αλλά πλήρως κατανομημένη εκδοχή του παραπάνω αλγορίθμου κατανομής ομάδων πόρων η οποία υπολογίζει με ικανοποιητικό τρόπο το απαιτούμενο ΣΙ Nash αλλά με σαφώς μικρότερο αριθμό επαναλήψεων και κόστος σηματοδοσίας. Αποδείχθηκε μέσω των αριθμητικών προσομοιώσεων ότι το ΣΙ Nash μειώνει δραστικά τις συνολικές παρεμβολές στο δίκτυο. Στη συνέχεια, με δεδομένο το αποτέλεσμα της 1<sup>ης</sup> φάσης της προσέγγισης, διατυπώνεται το πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής για κάθε μοιραζόμενη ομάδα πόρων του δικτύου. Αποδεικνύεται ότι το πρόβλημα ελαχιστοποίησης παρεμβολών σε κάθε ομάδα πόρων ισοδυναμεί με ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης συνολικών ισχύων εκπομπής υπό τους ίδιους περιορισμούς για το σηματοθορυβικό λόγο και για τις δυνατές τιμές ισχύος εκπομπής. Έτσι εφαρμόζοντας το γνωστό αλγόριθμο των Foschini-Miljanic για την ελαχιστοποίηση της συνολικά εκπεμπόμενης ισχύος επιτυγχάνεται μείωση των συνολικών παρεμβολών. Τέλος μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων για μεταβαλλόμενες θέσεις των χρηστών άμεσης και κυψελωτής επικοινωνίας φαίνεται ότι επιτυγχάνεται τόσο μείωση της εκπεμπόμενης ισχύος αλλά και αύξηση του αριθμού των χρηστών που εξασφαλίζουν ένα ελάχιστο επίπεδο σηματοθορυβικού λόγου στους δέκτες τους.

#### **Λέξεις κλειδιά**

Ασύρματα Δίκτυα, Κατανομή πόρων, διαχείριση παρεμβολών, Άμεση επικοινωνία των χρηστών, Θεωρία Παιγνίων, Γραμμικός προγραμματισμός

## Abstract

This PhD thesis addresses the problem of optimal resource allocation in Device to Device (D2D) enabled cellular networks. In this type of networks users may communicate directly with each other either by using different resource blocks (RBs) or sharing common RBs with the conventional cellular users. The general perspective of the thesis is to allocate RBs and transmission power to users in order to satisfy their minimum signal to interference and noise ratio (SINR) constraints with the minimum transmitted power.

For the overlay case, a queueing system is proposed in order to model the RB allocation process. Our aim is to balance and minimize the blocking probability of each type of user of the network. This model finds the optimal policy for the RB allocation and a heuristic algorithm is used in order to find the necessary parameters of the optimal policy, which is shown to be of threshold type.

Then, we focus on the underlay case of RB sharing where cellular and D2D users share the same RBs. A game theoretic approach is proposed for the power control problem for a given RB. A Nash equilibrium (NE) point is proven to exist and a best response algorithm is proposed in order to converge to the NE point of the game. In this way, the users of the network find an optimal tradeoff between the amount of transmitted power and the required SINR level at their receivers.

Next, we formulate the problem of interference minimization under users' SINR constraints for a D2D underlay cellular network. We study both the single cell and the multicell case. Due to the computational intractability of the problem, it is decomposed by two separate subproblems. The first one is a RB allocation problem under fixed transmission power while the second, following the result from the first one, is a power control problem for every shared RB. For both problems, efficient algorithms are proposed. The first problem is modelled as an exact potential game where the total interference of the network coincides the opposite of the potential function of the respective game. Leveraging the desirable properties of the exact potential games a best response algorithm is proposed which converges to the NE point of the respective game. After that, the power control problem is modelled as a concave game where a distributed algorithm for the NE computation is proposed. This algorithm is proven to converge to the NE of the game after finite number of iterations.

The previous approach is further extended in order to cover the case of multicell D2D underlay cellular network. In the first step, the total interference minimization problem under fixed transmission power is modelled as a bilateral symmetric game which belongs to a special category of exact potential games. Thus, following a best response algorithm, we reach a NE point of the game under finite number of iterations. Moreover, a random distributed version of the best response algorithm is proposed which achieves fair performance with significantly lower number of iterations and communication overhead. Then the problem of interference minimization for the RB allocation vector proposed by the first stage is shown to be equivalent to a total power minimization problem under the

same constraints. Following the well-known Foschini Miljanic algorithm which solves the total power minimization problem a suitable solution for our problem is obtained. Finally, we demonstrate via extensive numerical simulations that the total transmitted power is reduced dramatically and the number of users who satisfy their SINR requirements increases significantly.

### **Keywords**

D2D enabled cellular networks, interference management, resource allocation, game theory, potential games, linear programming



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ολόθερμα όλους όσους συνέβαλαν, ο καθένας με το δικό του τρόπο, στην επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Πάνω από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή Ε.Μ.Π. Συμεών Παπαβασιλείου για την αμέριστη συμπαράσταση και καθοδήγηση κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τη στενή μου συνεργάτιδα και επικ. καθηγήτρια στο Πανεπιστήμιο του New Mexico των ΗΠΑ, Ειρήνη Ελένη Τσιροπούλου.

Ακόμη, θέλω να ευχαριστήσω το Διευθυντή του Εργαστηρίου Διαχείρισης και Βέλτιστου Σχεδιασμού Δικτύων Τηλεματικής, καθηγητή Ε.Μ.Π. Βασίλειο Μάγκλαρη για τη φιλοξενία που μου παρείχε καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής. Θα ήταν παράλειψή μου να μην αναφερθώ στους συνεργάτες και φίλους από το Εργαστήριο αλλά και γενικότερα από τη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Ε.Μ.Π. για την πολύπλευρη υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τα μέλη της οικογένειάς μου, τη μητέρα μου Αναστασία και την αδελφή μου Αδαμαντία για την ηθική και ψυχική στήριξή τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής.

# Περιεχόμενα

<b>1. Εισαγωγή .....</b>	<b>19</b>
1.1. Συμβολή της Διατριβής .....	21
1.2. Διάρθρωση της Διατριβής .....	23
<b>2. Κατανομή Ισχύος Εκπομπής σε Ασύρματα Κυψελωτά Δίκτυα κατά τη Ζεύξη Ανόδου Μέσω Παιγνιο-θεωρητικών Μεθόδων .....</b>	<b>25</b>
2.1. Εισαγωγή στη Θεωρία Παιγνίων για την Κατανομή Πόρων σε Ασύρματα Κυψελωτά Δίκτυα .....	26
2.2. Μοντέλο Συστήματος .....	28
2.3. Απαιτήσεις σε Ποιότητα Υπηρεσίας .....	31
2.4. Μοντελοποίηση μη Συνεργατικού Παιγνίου Κατανομής Ισχύος Εκπομπής στην Άνω Ζεύξη W-CDMA Δικτύων .....	33
2.5. Αλγόριθμος Υπολογισμού Σημείου Ισορροπίας Nash .....	35
2.6. Αναποδοτικότητα κατά Pareto του ΣΙ Nash .....	36
2.7. Ανακεφαλαιωτικά Συμπεράσματα .....	38
<b>3. Επιλογή Κυψέλης Εξυπηρέτησης κι Ισχύος Εκπομπής σε Διεπίπεδα Φεμτοκυψελωτά Δίκτυα .....</b>	<b>41</b>
3.1. Σχετικές Εργασίες & Πληροφορίες .....	41
3.2. Συμβολή & Καινοτομία .....	42
3.3. Μοντέλο Συστήματος .....	43
3.4. Παιγνιο Επιλογής Κυψέλης Εξυπηρέτησης και Κατανομής Ισχύος Εκπομπής ...	45
3.5. Αλγόριθμος Υπολογισμού ΣΙ Nash για το Συνδυαστικό Παιγνιο Επιλογής Κυψέλης κι Ισχύος Εκπομπής .....	46
3.6. Ανακεφαλαιωτικά Συμπεράσματα .....	47
<b>4. Ανάθεση Πόρων σε Ασύρματα Κυψελωτά Δίκτυα με Υποστήριξη Άμεσης Επικοινωνίας των Χρηστών (overlay) .....</b>	<b>49</b>
4.1. Εισαγωγή .....	49
4.2. Σχετική Βιβλιογραφία .....	50
4.3. Συμβολή και Καινοτομία .....	51
4.4. Μοντέλο Συστήματος .....	51

4.5.	Διατύπωση Προβλήματος – Επιλογή Βέλτιστης Πολιτικής.....	53
4.6.	Εμπειρικός Υπολογισμός Κατωφλίου .....	55
4.7.	Αριθμητικά Αποτελέσματα .....	58
4.8.	Ανακεφαλαιωτικά Συμπεράσματα .....	60
<b>5.</b>	<b>Έλεγχος Ισχύος Εκπομπής σε Ασύρματα Κυψελωτά Δίκτυα με Υποστήριξη</b>	
	<b>Άμεσης Επικοινωνίας.....</b>	<b>61</b>
5.1.	Σχετική Βιβλιογραφία & Συμβολή.....	62
5.2.	Μοντέλο Συστήματος .....	63
5.3.	Μη Συνεργατικό Παίγνιο Κατανομής Ισχύος Εκπομπής .....	65
5.4.	Αλγόριθμος Υπολογισμού Σημείου Ισορροπίας Nash .....	67
5.5.	Αριθμητικά Αποτελέσματα Προσομοιώσεων .....	67
5.6.	Ανακεφαλαιωτικά Συμπεράσματα .....	70
<b>6.</b>	<b>Διαχείριση Παρεμβολών σε Ασύρματα Δίκτυα μιας Κυψέλης με Υποστήριξη</b>	
	<b>Άμεσης Επικοινωνίας.....</b>	<b>71</b>
6.1.	Σχετικές Εργασίες.....	71
6.2.	Συμβολή & Καινοτομία.....	73
6.3.	Μοντέλο Συστήματος .....	74
6.4.	Κατανομή Ομάδας Πόρων .....	76
6.5.	Αλγόριθμος υπολογισμού ΣΙ Nash.....	77
6.6.	Κατανομή Ισχύος Εκπομπής .....	79
6.7.	Αριθμητικά Αποτελέσματα .....	81
6.7.1.	Αξιολόγηση προσέγγισης δύο σταδίων .....	81
6.7.2.	Αξιολόγηση ΣΙ Nash .....	87
6.7.3.	Συγκριτική Αξιολόγηση Προτεινόμενης Προσέγγισης δύο σταδίων .....	87
6.8.	Ανακεφαλαιωτικά Συμπεράσματα .....	89
<b>7.</b>	<b>Διαχείριση Παρεμβολών σε περιβάλλον πολλαπλών κυψελών.....</b>	<b>93</b>
7.1.	Σχετικές Εργασίες.....	93
7.2.	Συμβολή & Καινοτομία.....	94
7.3.	Μοντέλο Συστήματος .....	95

7.4.	Διατύπωση Προβλήματος.....	97
7.5.	Κατανομή Ομάδων Πόρων.....	97
7.6.	Αλγόριθμος Υπολογισμού ΣΙ Nash .....	99
7.6.1.	Σειριακή Κατανομή Ομάδων Πόρων .....	100
7.6.2.	Κατανεμημένος Πιθανοτικός Αλγόριθμος Υπολογισμού του ΣΙ Nash .....	102
7.7.	Κατανομή Ισχύος Εκπομπής .....	102
7.8.	Αριθμητικά Αποτελέσματα .....	105
7.8.1.	Αξιολόγηση της Προσέγγισης .....	105
7.8.2.	Αξιολόγηση Κατανεμημένης Πιθανοτικής Προσέγγισης.....	111
7.8.3.	Συγκριτική Αξιολόγηση .....	112
7.9.	Ανακεφαλαιωτικά Συμπεράσματα .....	119
<b>8.</b>	<b>Συμπεράσματα &amp; Μελλοντική Έρευνα .....</b>	<b>123</b>
8.1.	Συμπεράσματα.....	123
8.2.	Μελλοντικές Ερευνητικές Δυνατότητες.....	130
	<b>Παράρτημα .....</b>	<b>132</b>
	<b>Δημοσιεύσεις στα Πλαίσια της Διδακτορικής Διατριβής.....</b>	<b>135</b>
	<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>137</b>

## Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1 Αρχιτεκτονική ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου επικοινωνιών.....	19
Εικόνα 2.1 Άνω Ζεύξη ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου W-CDMA .....	29
Εικόνα 2.2 Η συνάρτηση απόδοσης σε σχέση με το λόγο ενέργειας bit προς φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου για BPSK, DPSK, FSK σχήματα διαμόρφωσης.....	31
Εικόνα 3.1 Αρχιτεκτονική ενός διεπίπεδου φεμτοκυψελωτού ασύρματου δικτύου .....	41
Εικόνα 3.2 Τοπολογία του διεπίπεδου δικτύου .....	43
Εικόνα 4.1 Αρχιτεκτονική ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας.....	49
Εικόνα 4.2 Μοντέλο εξυπηρέτησης αιτημάτων για επικοινωνία σε ένα ασύρματο κυψελωτό δίκτυο με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας. ....	52
Εικόνα 4.3 Σύγκλιση του αλγορίθμου υπό διαφορετικές αρχικές τιμές των παραμέτρων...57	
Εικόνα 4.4 Σύγκλιση του αλγορίθμου υπό διαφορετικές τιμές φορτίου κίνησης. ....	57
Εικόνα 4.5 Πιθανότητα απόρριψης ενός αιτήματος σε σχέση με το λόγο των πόρων άμεσης προς κυψελωτής επικοινωνίας.....	58
Εικόνα 4.6 - Πιθανότητα απόρριψης συστήματος σε σχέση με το λόγο των πόρων άμεσης προς κυψελωτής επικοινωνίας.....	59
Εικόνα 4.7 - Πιθανότητα απόρριψης σε σχέση με το βαθμό επαναχρησιμοποίησης πόρων άμεσης επικοινωνίας. ....	59
Εικόνα 4.8 - Πιθανότητα απόρριψης από το σύστημα σε σχέση με την προσφερόμενη κίνηση.....	60
Εικόνα 5.1 Τοπολογία ενός ενδεικτικού δικτύου μιας κυψέλης με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας.....	63
Εικόνα 5.2 – Τοπολογία ασύρματων χρηστών.....	68
Εικόνα 5.3 - Σύγκλιση ισχύος εκπομπής για τους χρήστες άμεσης επικοινωνίας. ....	68
Εικόνα 5.4 - Σύγκλιση ισχύος εκπομπής για τον κυψελωτό χρήστη .....	69
Εικόνα 5.5 - Μέσος ρυθμός μετάδοσης του κυψελωτού χρήστη ανά μονάδα χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης σε σχέση με την απόσταση του χρήστη άμεσης επικοινωνίας από το ΣΒ. ....	69
Εικόνα 6.1 Αρχιτεκτονική ενός ασύρματου δικτύου μιας κυψέλης με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας.....	74
Εικόνα 6.2 Τοπολογία μιας κυψέλης με 8 χρήστες κυψελωτής και 24 χρήστες άμεσης επικοινωνίας.....	82
Εικόνα 6.3 Χρονική εξέλιξη του συνολικού αθροίσματος των συναρτήσεων χρησιμότητας .....	83

Εικόνα 6.4 Σηματοθορυβικός λόγος μετά από την εφαρμογή του αλγορίθμου 1 .....	84
Εικόνα 6.5 Ισχύς εκπομπής σε σχέση με τον αριθμό των επαναλήψεων για τους χρήστες της ομάδας πόρων 7.....	84
Εικόνα 6.6 Παρεμβολές κάθε χρήστη αρχικά, μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου 1 και μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου 2 .....	85
Εικόνα 6.7 Σηματοθορυβικός λόγος στο δέκτη κάθε χρήστη πριν και μετά τη συνδυαστική εκτέλεση των αλγορίθμων 1 και 2.....	85
Εικόνα 6.8 Παρεμβολές στους δέκτες των χρηστών στην περίπτωση της μοναδικής συνδυαστικής εκτέλεσης και στην περίπτωση της επαναληπτικής συνδυαστικής εκτέλεσης.	86
Εικόνα 6.9 Παρεμβολές σε σχέση με τον αριθμό των χρηστών άμεσης επικοινωνίας.....	86
Εικόνα 6.10 Σηματοθορυβικός λόγος σε σχέση με τον αριθμό των χρηστών άμεσης επικοινωνίας.....	86
Εικόνα 6.11 Σύγκριση του αθροίσματος της ισχύος εκπομπής σε σχέση με τη βιβλιογραφία .....	88
Εικόνα 6.12 Σύγκριση του αθροίσματος των ρυθμών μετάδοσης ανά μονάδα εύρους ζώνης σε σχέση με τη βιβλιογραφία .....	89
Εικόνα 7.1 Μοντέλο Συστήματος ενός ασύρματου δικτύου πολλαπλών κυψελών με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας.....	95
Εικόνα 7.2 Εξέλιξη του συνολικού επιπέδου παρεμβολών στο δίκτυο .....	106
Εικόνα 7.3 Χάρτης τυχαίας αρχικής ανάθεσης ομάδων πόρων στους χρήστες .....	107
Εικόνα 7.4 Χάρτης τελικής ανάθεσης ομάδων πόρων στους χρήστες μετά από την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1.....	108
Εικόνα 7.5 Παρεμβολές στο δέκτη κάθε χρήστη του δικτύου πριν και μετά την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1.....	109
Εικόνα 7.6 Σηματοθορυβικός λόγος στους δέκτες των χρηστών πριν και μετά την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1.....	109
Εικόνα 7.7 Παρεμβολές σε κάθε δέκτη πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου 2 ..	110
Εικόνα 7.8 Σηματοθορυβικός λόγος πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου 2 .....	110
Εικόνα 7.9 Ισχύς εκπομπής μετά την εφαρμογή του Αλγορίθμου 2 .....	111
Εικόνα 7.10 Εξέλιξη των συνολικών παρεμβολών ακολουθώντας τον αλγόριθμο 1π .....	112
Εικόνα 7.11 Εξέλιξη των συνολικών παρεμβολών ακολουθώντας τον αλγόριθμο 1 .....	112
Εικόνα 7.12 Παρεμβολές στους δέκτες των χρηστών του δικτύου, αρχικές και τελικές μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου 1 και της προσέγγισης [DAM16] .....	114
Εικόνα 7.13 Σηματοθορυβικός λόγος στους δέκτες των χρηστών αρχικά, μετά τον Αλγόριθμο 1 και μετά την προσέγγιση [DAM16].....	114
Εικόνα 7.14 Ισχύς Εκπομπής πριν και μετά την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1 .....	115

Εικόνα 7.15 Παρεμβολές όλων των χρηστών του δικτύου .....	116
Εικόνα 7.16 Φασματική Απόδοση πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου 1 και της προσέγγισης [DAM16].....	117
Εικόνα 7.17 Παρεμβολές στους δέκτες των χρηστών με διάνυσμα εισόδου την έξοδο του αλγορίθμου 1 και την έξοδο της [DAM16] .....	118
Εικόνα 7.18 Φασματική Απόδοση των χρηστών με διάνυσμα εισόδου την έξοδο του αλγορίθμου 1 και την έξοδο της [DAM16] .....	118
Εικόνα 7.19 Ισχύς εκπομπής μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου 2 με διάνυσμα εισόδου την έξοδο του αλγορίθμου 1 και την έξοδο της [DAM16] .....	119
Εικόνα 7.20 Πλήθος χρηστών που ικανοποιούν την ελάχιστη απαίτησή τους για σηματοθορυβικό λόγο .....	119

## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 6.1 Παράμετροι κι οι αντίστοιχες τιμές για το 1 <sup>ο</sup> σετ προσομοιώσεων.....	82
Πίνακας 6.2 Αρχική ανάθεση χρηστών σε ομάδες πόρων .....	83
Πίνακας 6.3 Ανάθεση χρηστών σε ομάδες πόρων μετά την εκτέλεση του Αλγορίθμου 1 ..	83
Πίνακας 6.4 - Τιμές παραμέτρων προσομοίωσης .....	88
Πίνακας 7.1 Τιμές παραμέτρων σεναρίου προσομοιώσεων.....	105
Πίνακας 7.2 Τιμές παραμέτρων σεναρίου προσομοιώσεων.....	111
Πίνακας 7.3 Τιμές παραμέτρων σεναρίου προσομοιώσεων.....	116



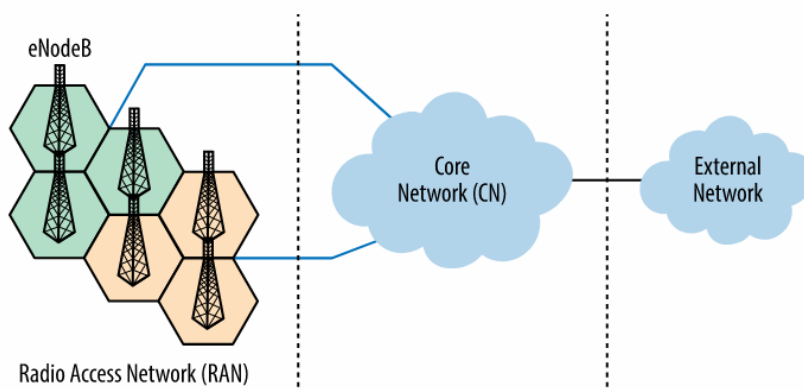
## Κατάλογος Συντμήσεων

Device to Device	D2D
Resource Block	RB
Signal to Interference and Noise Ratio	SINR
Σημείο Ισορροπίας	ΣΙ
Σταθμός Βάσης	ΣΒ
Evolved Node B	ENB
3 <sup>rd</sup> Generation Partnership Project	3GPP
Wideband Code Division Multiple Access	W-CDMA
Elasticity Factor	EF
Access Point	AP
Single Carrier Frequency Division Multiple Access	SC-FDMA
Device to Device Uplink Power Control	DUPC
Polynomial Local Search	PLS
Multiple Input Multiple Output	MIMO
Long Term Evolution	LTE



# 1. Εισαγωγή

Εδώ και δεκαετίες η κατανομή πόρων (π.χ. ισχύος εκπομπής, καναλιού μετάδοσης κ.α.) σε ασύρματα κυψελωτά δίκτυα επικοινωνιών παίζει καθοριστικό ρόλο για την αποδοτική λειτουργία του δικτύου τόσο από πλευράς ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών επικοινωνίας, εξοικονόμησης φάσματος συχνοτήτων όσο και από τη μεριά της ενεργειακής κατανάλωσης των συνδεδεμένων συσκευών.



**Εικόνα 1.1 Αρχιτεκτονική ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου επικοινωνιών**

Τα ασύρματα κυψελωτά δίκτυα επικοινωνιών αποτελούν δίκτυα επικοινωνιών στα οποία οι χρήστες επικοινωνούν με το δίκτυο κάνοντας χρήση του ασύρματου φυσικού μέσου [Lee06], [DuM10]. Τα ασύρματα κυψελωτά δίκτυα οργανώνονται σε κυψέλες εξυπηρέτησης που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές κάλυψης του δικτύου. Οι χρήστες επικοινωνούν μέσω του σταθμού βάσης (ΣΒ) που βρίσκεται χωρικά περίπου στο κέντρο της περιοχής κάλυψης της κυψέλης εξυπηρέτησής τους. Οι προδιαγραφές λειτουργίας των δικτύων αυτών έχουν συστηματικά προδιαγραφεί από τον οργανισμό 3GPP (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project) [3GPP]. Οι προδιαγραφές αυτές αφορούν όλες τις λειτουργίες του δικτύου όπως ενδεικτικά αναφέρουμε την ανάθεση καναλιού μετάδοσης στους χρήστες, την ανάθεση τιμής ισχύος εκπομπής καθώς και την επιλογή κυψέλης εξυπηρέτησης.

Οι παραπάνω προδιαγραφές περιγράφονται με έναν αρκετά αφαιρετικό τρόπο γεγονός που δίνει τη δυνατότητα στον κατασκευαστή του δικτύου να επιλέξει ο ίδιος ακριβώς τις αναγκαίες τεχνικές λεπτομέρειες για την υλοποίησή τους. Έχοντας αυτό υπόψιν και προς την κατεύθυνση της εξυπηρέτησης των ολοένα αυξανόμενων αναγκών των χρηστών του δικτύου έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές για την αποτελεσματική αντιμετώπιση προβλημάτων (αποδοτική κατανομή πόρων) που αντιμετωπίζει το δίκτυο. Οι προσεγγίσεις αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αυτές που σχετίζονται με την «κλασσική» θεωρία βελτιστοποίησης

[BoV04], [BER09] αλλά και σε αυτές που προέρχονται από τη θεωρία παιγνίων [FuT91], [LaT11].

Η θεωρία Παιγνίων είναι ένας κλάδος των εφαρμοσμένων μαθηματικών που μοντελοποιεί, αναλύει και προτείνει λύσεις σε περιβάλλοντα στρατηγικών αλληλεπιδράσεων όπου δηλαδή οι παίχτες-συμμετέχοντες διαθέτουν στρατηγικές με αλληλοεπηρεαζόμενα συμφέροντα-επιδιώξεις. Για μια σειρά από λόγους που θα αναφέρουμε αμέσως παρακάτω κρίνουμε ότι η θεωρία παιγνίων αποτελεί ένα χρήσιμο μαθηματικό εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων κατανομής πόρων σε ασύρματα κυψελωτά δίκτυα επικοινωνιών.

Το δίκτυο με βάση τις προδιαγραφές της [3GPP] καλείται να αποφασίσει εντός ενός αρκετά στενού χρονικού πλαισίου (ενδεικτική τιμή  $t=0,5msec$ ) τόσο το κανάλι μετάδοσης όσο και την ισχύ εκπομπής κάθε χρήστη που εξυπηρετείται από αυτό. Τα προβλήματα αυτά έχουν την ιδιότητα να εμπλέκουν χρήστες με αντικρουόμενα συμφέροντα. Για παράδειγμα ένα κανάλι μετάδοσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί από πολλούς χρήστες εφόσον οι συνθήκες το επιτρέπουν αλλά κι η επιλογή τιμής ισχύος εκπομπής για ένα χρήστη επιβαρύνει τους υπόλοιπους χρήστες που χρησιμοποιούν κοινό κανάλι μετάδοσης.

Μάλιστα, τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μια αρκετά σημαντική άνοδος του αριθμού των συνδεδεμένων συσκευών στο δίκτυο καθώς και του όγκου των δεδομένων που μεταφέρεται μέσα από αυτό [Cis14]. Οι χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες από το δίκτυο έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις οι οποίες έρχονται σε σύγκρουση με τις επιθυμίες και τις απαιτήσεις άλλων χρηστών του δικτύου.

Οι κυψέλες εξυπηρέτησης που εγκαθίστανται στο δίκτυο παρέχουν διαφορετικά επίπεδα κάλυψης (π.χ. μακροκυψέλες, μικρο-κυψέλες, φεμτοκυψέλες κ.α.) καλύπτοντας διαφορετικού μεγέθους περιοχές αντίστοιχα. Επίσης τα τελευταία χρόνια από τη 3GPP έχει προταθεί η δυνατότητα απευθείας επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών χωρίς τη διαμεσολάβηση του ΣΒ [TR 36.843]. Το γεγονός αυτό παρέχει την ευκαιρία για την καλύτερη δυνατή αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων με τις χαμηλότερες δυνατές παρεμβολές καθώς και τη μεγαλύτερη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας για τις ανάγκες επικοινωνίας των κινητών συσκευών [AWM14], [FDM12].

Τέλος, είναι στις προθέσεις της 3GPP αλλά και της ευρύτερης κοινότητας των ασύρματων κυψελωτών δικτύων (δηλ. παρόχων κινητής τηλεφωνίας, κατασκευαστών δικτύων, ρυθμιστικών αρχών) η προσθήκη περισσότερων κυψελών πολλαπλών επιπέδων στο υπάρχον δίκτυο καθώς κι η παροχή της δυνατότητας απευθείας επικοινωνίας των συσκευών ακολουθώντας τις αρχές σχεδίασης ενός δικτύου 5<sup>ης</sup> γενιάς εξαιρετικά πυκνής κάλυψης [GSG16], [BJM14], [HRT14].

Για αυτό το λόγο αναζητούμε προσεγγίσεις για την αποτελεσματική κατανομή πόρων στο δίκτυο οι οποίες αξιοποιούν την αποκεντρωμένη του δομή, τα κατανεμημένα κι ετερογενή χαρακτηριστικά των χρηστών-συσκευών του και έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν υποβέλτιστες-προσεγγιστικές λύσεις σε ένα αρκετά σύντομο χρονικό διάστημα.

Επίσης τα προβλήματα που μας ενδιαφέρουν στη διδακτορική διατριβή αυτή όπως η κατανομή ισχύος εκπομπής στην άνω ζεύξη ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου καθώς και η επιλογή καναλιού μετάδοσης αλλά και κυψέλης εξυπηρέτησης έχουν την ιδιότητα να εμπλέκουν χρήστες με αντικρουόμενα συμφέροντα. Για όλους αυτούς τους λόγους η θεωρία παιγνίων αναδύεται ως ένα κατάλληλο μαθηματικό εργαλείο για τη μοντελοποίηση, ανάλυση κι αποτελεσματική επίλυση τέτοιων προβλημάτων.

## **1.1. Συμβολή της Διατριβής**

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής πόρων ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου 3<sup>ης</sup>, 4<sup>ης</sup> και 5<sup>ης</sup> γενιάς στο οποίο μπορεί να συνυπάρχουν κυψέλες πολλαπλών επιπέδων (μάκρο, μικρο, φέμτο κτλ.) καθώς και χρήστες του δικτύου που μπορούν να επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους. Η παρούσα μελέτη διερευνά προβλήματα κατανομής πόρων σε ασύρματα κυψελωτά δίκτυα επικοινωνιών και προτείνει την επίλυση τους με καινοτόμες μεθόδους, χρησιμοποιώντας αρχές από τη θεωρία παιγνίων και γενικότερα τη θεωρία μαθηματικής και συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια, επιλύει τα προβλήματα αυτά, τεκμηριώνοντας θεωρητικά και επιβεβαιώνοντας πειραματικά μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων τις λύσεις τους. Τέλος, προτείνει αντίστοιχους επαναληπτικούς κατανεμημένους αλγόριθμους κατανομής πόρων για τον υπολογισμό των λύσεων αυτών. Το σύνολο της μελέτης επικεντρώνεται σε τέσσερις βασικούς άξονες, καθώς επίσης και στην επίλυση των αντίστοιχων προβλημάτων κατανομής πόρων που ανακύπτουν:

1. Ανάθεση πόρων και κατανομή ισχύος εκπομπής σε ασύρματα κυψελωτά δίκτυα με υποστήριξη της απευθείας επικοινωνίας μεταξύ των χρηστών [KTP15], [KTP14]
2. Επιλογή κυψέλης εξυπηρέτησης και κατανομή ισχύος εκπομπής σε διεπίπεδα φεμτοκυψελωτά δίκτυα πολλαπλών υπηρεσιών. [TKF14], [TKV13]
3. Περιορισμός των παρεμβολών σε ένα ασύρματο κυψελωτό δίκτυο με υποστήριξη απευθείας επικοινωνίας μεταξύ των χρηστών [KTP16], [KTP17b].
4. Περιορισμός των παρεμβολών σε ένα ασύρματο δίκτυο πολλαπλών κυψελών με υποστήριξη απευθείας επικοινωνίας [KTP17a], [KTP17b].

Αρχικά διερευνάται η δυνατότητα χρησιμοποίησης παιγνιοθεωρητικών μεθόδων για την κατανομή πόρων σε ασύρματα κυψελωτά δίκτυα στη ζεύξη ανόδου παρουσία μιας μόνο

μακροκυψέλης. Γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση των σχετικών εργασιών και επισημαίνονται χρήσιμα σημεία (αρχές και μέθοδοι) για περαιτέρω μελέτη στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής. Στη συνέχεια διερευνάται η δυνατότητα χρήσης των μεθόδων αυτών και σε αρχιτεκτονικές ασύρματων κυψελωτών δικτύων με πολλαπλά επίπεδα κάλυψης (π.χ. παρουσία φεμτοκυψελών) με στόχο τη βέλτιστη επιλογή κυψέλης εξυπηρέτησης και ισχύος εκπομπής. Στην κατεύθυνση αυτή μοντελοποιείται κι αναλύεται το πρόβλημα επιλογής κυψέλης εξυπηρέτησης και κατανομής ισχύος εκπομπής σε διεπίπεδα φεμτοκυψελωτά δίκτυα πολλαπλών υπηρεσιών. Κάθε χρήστης του δικτύου διαθέτει μια συνάρτηση χρησιμότητας η οποία εξαρτάται από την κυψέλη από την οποία εξυπηρετείται και το είδος της υπηρεσίας που αιτείται. Αποδεικνύεται η ύπαρξη ενός σημείου ισορροπίας για το παίγνιο επιλογής κυψέλης εξυπηρέτησης και κατανομής ισχύος. Τέλος, προτείνεται ένας κατανεμημένος αλγόριθμος που συγκλίνει στα επιθυμητά σημεία ισορροπίας έπειτα από ένα σχετικά μικρό αριθμό επαναλήψεων.

Στη συνέχεια μελετώνται προβλήματα κατανομής πόρων σε ασύρματα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς στα οποία παρέχεται η δυνατότητα στους χρήστες να επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους. Στα δίκτυα αυτά στο κέντρο κάθε κυψέλης βρίσκεται ένας σταθμός βάσης (ΣΒ) με εξελιγμένες δυνατότητες (eNB) συντονισμού κι ελέγχου των επικοινωνιών οι οποίες έχουν προδιαγραφεί από τη 3GPP [TS 36.300]. Οι χρήστες των δικτύων αυτών έχουν τη δυνατότητα επιλογής τρόπου επικοινωνίας είτε συμβατικά, μέσω του ΣΒ της κυψέλης είτε απευθείας με έναν άλλο χρήστη-αποδέκτη. Στο πλαίσιο αυτό προτείνεται ένα καινοτομικό μοντέλο ουρών αναμονής για την επιλογή τρόπου επικοινωνίας κι ανάθεσης των σχετικών ομάδων (μπλοκ) πόρων από το ΣΒ. Στο πρόβλημα αυτό προσδιορίστηκε η βέλτιστη πολιτική ανάθεσης πόρων κι επιλογής τρόπου επικοινωνίας κι αξιολογήθηκε η χωρητικότητα του συστήματος μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων.

Για την ίδια αρχιτεκτονική δικτύων που παρέχεται υποστήριξη απευθείας επικοινωνίας μεταξύ των χρηστών μοντελοποιήθηκε ένα παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής για χρήστες που μοιράζονται κοινές ομάδες πόρων. Αποδείχθηκε η ύπαρξη ενός ΣΙ Nash και προτάθηκε ένας κατανεμημένος αλγόριθμος υπολογισμού του. Η παραπάνω θεωρητική μελέτη επιβεβαιώθηκε μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων κι αποδείχθηκε πειραματικά η συγκριτική της ανωτερότητα από σχετικές προσεγγίσεις της βιβλιογραφίας.

Στη συνέχεια με στόχο τον περιορισμό των παρεμβολών ενός δικτύου με υποστήριξη απευθείας επικοινωνίας μελετάται το πρόβλημα κατανομής ομάδων πόρων. Μια ομάδα πόρων σύμφωνα με τις προδιαγραφές της 3GPP αποτελείται από ένα σύνολο από κανάλια συχνοτήτων (δώδεκα υποφέρουσες) και χρονικών συμβόλων (6 ή 7 ανάλογα με το είδος του κυκλικού προθέματος). Στα δίκτυα αυτά οι χρήστες απευθείας επικοινωνίας και οι παραδοσιακοί χρήστες

ενδιάμεσης επικοινωνίας μέσω του ΣΒ μπορούν να μοιράζονται κοινές ομάδες πόρων με στόχο την εξοικονόμηση φάσματος και την επίτευξη υψηλότερης φασματικής απόδοσης. Στο πλαίσιο αυτό το πρόβλημα ανάθεσης ομάδων πόρων σε ένα τέτοιο δίκτυο προτείνεται να μοντελοποιηθεί ως ένα δυναμικό παίγνιο που έχει στόχο τη μείωση των συνολικών παρεμβολών όλων των χρηστών του δικτύου. Έτσι επιτυγχάνεται η επαναχρησιμοποίηση πόρων του δικτύου με όσο το δυνατόν μικρότερη κατανάλωση ισχύος αφού στόχος του παιγνίου είναι η συνολική μείωση των παρεμβολών. Στη συνέχεια μελετήθηκε το πρόβλημα της κατανομής ομάδων πόρων κι ισχύος εκπομπής σε ένα τέτοιο δίκτυο όπου οι χρήστες του έχουν ορισμένες απαιτήσεις για ελάχιστο επίπεδο σηματοθορυβικού λόγου στο δέκτη τους. Η οπτική αυτή δίνει στο δίκτυο τη δυνατότητα να παρέχει στους χρήστες τους ελάχιστους δυνατούς πόρους για την επίτευξη των απαιτήσεων τους αποφεύγοντας έτσι την αδικαιολόγητη κατασπατάληση πόρων ισχύος και φάσματος.

Τέλος, μελετήθηκε το πρόβλημα της διαχείρισης παρεμβολών σε ένα ασύρματο δίκτυο πολλαπλών κυψελών με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας. Οι χρήστες άμεσης επικοινωνίας μοιράζονται κοινές ομάδες πόρων με τους χρήστες κυψελωτής επικοινωνίας και στόχος είναι η εύρεση του κατάλληλου συνδυασμού από ομάδες πόρων και ισχύος εκπομπής για τους χρήστες του δικτύου έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι συνολικές παρεμβολές αλλά και οι χρήστες να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερα στα επιθυμητά επίπεδα σηματοθορυβικού λόγου. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται η συνολικά καταναλισκόμενη ισχύς ενώ συνήθως αυξάνεται και ο αριθμός των χρηστών που ικανοποιούν την απαίτηση τους ως προς το σηματοθορυβικό λόγο. Επίσης, πραγματοποιήθηκε μια συγκριτική μελέτη της προτεινόμενης προσέγγισης με μια πρόσφατη σχετική εργασία της βιβλιογραφίας η οποία προσπαθεί να μεγιστοποιήσει το συνολικό ρυθμό μετάδοσης των χρηστών. Αποδείχθηκε μέσω αριθμητικών συγκριτικών προσομοιώσεων ότι η προτεινόμενη προσέγγιση επιτυγχάνει συγκρίσιμους ρυθμούς μετάδοσης κρατώντας την ισχύ εκπομπής των χρηστών σταθερή. Παράλληλα οι παρεμβολές που γίνονται αισθητές σε κάθε δέκτη του δικτύου είναι αρκετά χαμηλότερες παρέχοντας τη δυνατότητα σε όλους τους χρήστες του δικτύου να επιτύχουν τα απαιτούμενα επίπεδα σηματοθορυβικού λόγου με χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος εκπομπής.

## ***1.2. Διάρθρωση της Διατριβής***

Η παρούσα μελέτη δομείται ως ακολούθως: Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση παιγνιοθεωρητικών μεθόδων με έμφαση στην προσέγγιση για το πρόβλημα της κατανομής ισχύος εκπομπής σε ένα ασύρματο κυψελωτό δίκτυο με ένα μόνο επίπεδο κάλυψης δηλ. μιας μακροκυψέλης. Στο κεφάλαιο 3 επεκτείνουμε τη μελέτη αυτή σε διεπίπεδα φεμτο-

κυψελωτά δίκτυα όπου μελετάται το πρόβλημα της συνδυαστικής επιλογής κυψέλης εξυπηρέτησης αλλά και κατανομής ισχύος εκπομπής. Στο κεφάλαιο 4 μελετάται το πρόβλημα της ανάθεσης ομάδων πόρων κι επιλογής τρόπου επικοινωνίας σε ασύρματα κυψελωτά δίκτυα με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας. Στο κεφάλαιο 5 μελετάται το πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής στην άνω ζεύξη ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου με υποστήριξη απευθείας επικοινωνίας των χρηστών. Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται μια παιγνιοθεωρητική προσέγγιση για την κατανομή καναλιών μετάδοσης κι ισχύος εκπομπής σε ασύρματα κυψελωτά δίκτυα με στόχο την ελαχιστοποίηση των συνολικών παρεμβολών στο δίκτυο. Στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζεται μια επέκταση της παραπάνω προσέγγισης με στόχο την επίλυση του παραπάνω προβλήματος σε ασύρματα δίκτυα πολλαπλών κυψελών με υποστήριξη απευθείας επικοινωνίας. Τέλος, η παρούσα διδακτορική διατριβή ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των σχετικών συμπερασμάτων και την ανάλυση των προοπτικών για πιθανή μελλοντική ερευνητική εργασία στην περιοχή αυτή.



## ***2. Κατανομή Ισχύος Εκπομπής σε Ασύρματα Κυβελωτά Δίκτυα κατά τη Ζεύξη Ανόδου Μέσω Παιγνιοθεωρητικών Μεθόδων***

Η κατανομή ισχύος εκπομπής έχει παίξει καθοριστικό ρόλο για τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου τόσο από την πλευρά του ρυθμού μετάδοσης του συστήματος, της ενεργειακής κατανάλωσης των συσκευών αλλά και της επίτευξης του αναγκαίου επιπέδου ποιότητας υπηρεσίας στους δέκτες των συσκευών [CHL08]. Στα ασύρματα κυβελωτά δίκτυα επικοινωνιών είναι απαραίτητος ο έλεγχος της ισχύος εκπομπής τόσο στη ζεύξη ανόδου (από το χρήστη στο ΣΒ) [TKP09], [KTP08] αλλά και στη ζεύξη καθόδου (αντίθετη κατεύθυνση). Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής η μελέτη επικεντρώνεται σε προβλήματα κατανομής ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου των κινητών τερματικών.

Τα προβλήματα αυτά βελτιστοποίησης τόσο του ρυθμού μετάδοσης ή της κατανάλωσης ισχύος εκπομπής εμπεριέχουν χρήστες με αλληλοσυγκρουόμενα συμφέροντα και συχνά δεν επιλύονται με τεχνικές κυρτής βελτιστοποίησης [BoV04]. Για αυτό το λόγο επικεντρωνόμαστε σε εναλλακτικές κατανομημένες προσεγγίσεις που επιλύουν το πρόβλημα υποβέλτιστα αλλά χρονικά αποδοτικά.

Τέτοιες προσεγγίσεις για παράδειγμα είναι αυτές που βασίζονται στη θεωρία παιγνίων. Ενδεικτικά παραδείγματα τέτοιων προσεγγίσεων μπορούν να αναζητηθούν στις παρακάτω εργασίες: [TKP10a], [TKP10b], [SMG02]. Η κατανομή ισχύος εκπομπής χρειάζεται στη λειτουργία ασύρματων κυβελωτών δικτύων 3<sup>ης</sup> γενιάς κι έχουν εφαρμοστεί αντίστοιχα κατανομημένες παιγνιοθεωρητικές προσεγγίσεις [TKP10a], [TKP09a], [LMS06]. Επίσης η κατανομή ισχύος εκπομπής συνεχίζει να έχει θεμελιώδη σημασία και σε δίκτυα 4<sup>ης</sup> και 5<sup>ης</sup> γενιάς προκειμένου να γίνουν περισσότερο ενεργειακά αποδοτικά και να ικανοποιούν τις απαιτήσεις περισσότερων χρηστών [TVP17a], [TZP15a], [TZP15b], [TKP13]. Το πρόβλημα της κατανομής ισχύος εκπομπής παραμένει σύγχρονο και υψίστης σημασίας σε ασύρματα κυβελωτά δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς τα οποία υιοθετούν μη ορθογωνικές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης [VTP17b], τεχνικές συλλογής ενέργειας από τα σήματα ραδιο-συχνοτήτων [VTV17] και τεχνικές μετάδοσης πληροφορίας μέσω του ορατού φωτός [TGV16], [TVP16]. Επιπρόσθετα, το πρόβλημα της κατανομής ισχύος μελετάται με παρεμφερείς μηχανισμούς, όπως προτείνονται στην παρούσα διδακτορική διατριβή, στο πεδίο του διαδικτύου των πραγμάτων με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας [TBP17] αλλά και τον εντοπισμό

κακόβουλων συσκευών [TBP16]. Τέλος, κατανομή ισχύος εκπομπής με παιγνιοθεωρητικά εργαλεία έχει εφαρμοστεί και σε περιβάλλοντα στα οποία θεωρείται ότι ο ρυθμός μετάδοσης των χρηστών είναι μεταβαλλόμενος. Εκεί οι συγγραφείς μελετούν συνδυαστικά το πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής αλλά και ρυθμού μετάδοσης [TVP12], [TVK15] στους χρήστες του δικτύου.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση παιγνιο-θεωρητικών μεθόδων για την κατανομή ισχύος στην άνω ζεύξη ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου. Αρχικά κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια σύντομη εισαγωγή σε βασικές έννοιες της θεωρίας παιγνίων που χρησιμοποιούνται από εδώ και στο εξής και κατέχουν κεντρικό ρόλο στη μεθοδολογία ανάλυσης που ακολουθείται.

## 2.1. Εισαγωγή στη Θεωρία Παιγνίων για την Κατανομή Πόρων σε Ασύρματα Κυψελωτά Δίκτυα

**Ορισμός 1. Στρατηγικό Παίγνιο** ορίζεται μια διατεταγμένη τριάδα της παρακάτω μορφής  $G = [N, \{S_i\}_{i \in N}, \{U_i\}_{i \in N}]$  όπου  $N$  είναι το σύνολο των παιχτών που συμμετέχουν στο παίγνιο  $G$ ,  $|N| = n$  είναι ο αριθμός των παιχτών,  $S_i$  είναι το σύνολο των δυνατών επιλογών στρατηγικής για τον παίχτη  $i$  και  $U_i$  είναι η συνάρτηση χρησιμότητας ενός παίχτη  $i$  ορισμένη πάνω στο σύνολο των δυνατών στρατηγικών όλων των παιχτών  $S = \{S_i\}_{i \in N}$ .

**Ορισμός 2. Προφίλ ή Διάνυσμα Επιλογών Στρατηγικής** αποτελεί το διάνυσμα  $\underline{s} = (s_1, s_2, \dots, s_n) \in S$  όλων των παιχτών του παιγνίου  $G$  όπου  $s_1 \in A_1, s_2 \in A_2, \dots, s_n \in A_n$  και  $S = S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n$ .

Από εδώ και στο εξής όταν αναφερόμαστε σε προφίλ ή διάνυσμα επιλογών στρατηγικής υποθέτουμε ότι οι επιλογές στρατηγικής αφορούν καθαρές επιλογές στρατηγικής κι όχι μικτές. Δηλ. κάθε παίχτης επιλέγει με ντετερμινιστικό τρόπο μια από τις διαθέσιμες επιλογές στρατηγικής του και δεν αναθέτει μια τιμή πιθανότητας σε καθεμιά από αυτές.

**Ορισμός 3. Σημείο Ισορροπίας Nash (ΣΙ)** ενός στρατηγικού παιγνίου  $G$  είναι το σύνολο εκείνο των επιλογών στρατηγικής όλων των παιχτών του παιγνίου  $\underline{s}^*$  για το οποίο για κάθε χρήστη  $i \in N$  ισχύει  $U_i(\underline{s}_i^*, \underline{s}_{-i}^*) \geq U_i(s_i, \underline{s}_{-i}^*)$  για όλες τις δυνατές επιλογές στρατηγικής  $s_i \in S_i$ . Δηλ. κανένας παίχτης του παιγνίου δεν μπορεί να επιτύχει καλύτερη τιμή στη συνάρτηση χρησιμότητάς του, μεταβάλλοντας μονομερώς την επιλογή στρατηγικής του.

**Ακριβές Δυναμικό Παίγνιο:** Ορίζεται ένα παίγνιο  $G = [N, \{S_i\}_{i \in N}, \{U_i\}_{i \in N}]$  για το οποίο υπάρχει μια συνάρτηση  $V: S \rightarrow R$  η οποία ικανοποιεί την παρακάτω ιδιότητα  $U_i(b_i, a_{-i}) - U_i(a_i, a_{-i}) = V(b_i, a_{-i}) - V(a_i, a_{-i}), \forall i \in N, \forall a \in S, b_i, a_i \in S_i$ .

Επικεντρωνόμαστε σε παίγνια με μη πεπερασμένο πλήθος διαθέσιμων στρατηγικών και στη συνέχεια παραθέτουμε ορισμένους πολύ βασικούς ορισμούς σχετικά με την κυρτότητα συνόλων και συναρτήσεων καθώς κι ένα πολύ βασικό σχετικό θεώρημα για την ύπαρξη τουλάχιστον ενός σημείου ισορροπίας σε αυτή την κατηγορία παιγνίων.

**Κυρτό Σύνολο:** Ένα σύνολο  $C$  είναι κυρτό όταν για κάθε  $x_1, x_2 \in C$  και  $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}$  με  $\lambda_1 + \lambda_2 = 1, \lambda_1, \lambda_2 \geq 0$  το στοιχείο  $\lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2 \in C$ .

**Κοίλη Συνάρτηση:** Για ένα μη κενό κυρτό υποσύνολο  $C$  του  $\mathbb{R}^n$  μια συνάρτηση  $g: C \rightarrow \mathbb{R}$  λέγεται κοίλη όταν για όλα τα  $x, y \in C$  και για όλα τα  $\lambda \in [0, 1]$  ισχύει ότι  $g(\lambda x + (1 - \lambda)y) \leq \lambda g(x) + (1 - \lambda)g(y)$ .

**Σχεδόν Κοίλη Συνάρτηση** ορίζεται μια συνάρτηση  $g: C \rightarrow \mathbb{R}$  εάν  $g(\lambda x + (1 - \lambda)y) \geq \min\{g(x), g(y)\}$ .

Το άνω contour σύνολο  $U_t$  μιας συνάρτησης  $g: C \rightarrow \mathbb{R}$  ορίζεται ως το σύνολο  $U_t = \{x \in C \mid g(x) \geq t\}$ .

Μια σχεδόν κοίλη συνάρτηση σε ένα κυρτό σύνολο  $C$  έχει κυρτά άνω contour σύνολα για κάθε  $t \in \mathbb{R}$ .

### **Θεώρημα Ύπαρξης ΣΙ (Debreu, Glicksberg, Fan)**

Για ένα στρατηγικό παίγνιο  $G$  εάν ισχύουν για κάθε παίχτη  $i$  ότι το  $S_i$  είναι ένα μη κενό, κυρτό και συμπαγές υποσύνολο ενός πεπερασμένου διαστήσεων Ευκλείδειου χώρου,  $U_i(S)$  είναι μια συνεχής συνάρτηση στο  $S$  και  $U_i(S_i, S_{-i})$  είναι σχεδόν κοίλη στο  $S_i$  τότε:

το παίγνιο  $G = [N, \{S_i\}_{i \in N}, \{U_i\}_{i \in N}]$  έχει ένα ΣΙ Nash.

Στη συνέχεια παραθέτουμε κάποιους βασικούς ορισμούς για το χαρακτηρισμό μιας στρατηγικής ενός παίχτη ή ενός προφίλ ή διανύσματος επιλογών στρατηγικής για όλους τους παίχτες του παιγνίου  $G$ .

### **Επικρατούσα Στρατηγική**

Για το στρατηγικό παίγνιο  $G$  μια στρατηγική  $\hat{s}_i$  ονομάζεται επικρατούσα για το χρήστη  $i$  εάν  $\forall s_{-i} \in S_{-i}, \forall s_i \in S_i, U_i(\hat{s}_i, s_{-i}) > U_i(s_i, s_{-i})$

### **Ισχνή Pareto-Κυριαρχία**

Ένα σύνολο στρατηγικών  $\bar{s}$  κυριαρχεί με την Pareto έννοια ενός άλλου  $s'$  εάν για κάθε χρήστη  $i$ ,  $U_i(\bar{s}) \geq U_i(s')$ .

**Pareto Κυριαρχία με την αυστηρή έννοια** αφορά την παραπάνω περίπτωση αλλά με γνήσια μεγαλύτερη την ανισότητα για τουλάχιστον έναν παίκτη.

**Pareto Βέλτιστο διάνυσμα επιλογών στρατηγικής**  $\bar{s}$  είναι εκείνο το διάνυσμα στρατηγικών το οποίο δεν κυριαρχείται με την Pareto έννοια από κανένα άλλο διάνυσμα επιλογών στρατηγικής.

**Βέλτιστη Απόκριση** ενός χρήστη  $i$  σε ένα διάνυσμα επιλογών στρατηγικής  $\underline{s}_{-i}$  είναι η επιλογή στρατηγικής που δίνεται από την παρακάτω σχέση:  $BR(\underline{s}_{-i}) = \arg \max_{s_i \in S_i} U_i(s_i, \underline{s}_{-i})$

**Θεώρημα μοναδικότητας ΣΙ** (Αυστηρή Διαγώνια Κοιλότητα) [Ros65]

Για ένα στρατηγικό παίγνιο  $G = [N, \{S_i\}_{i \in N}, \{U_i\}_{i \in N}]$  όπου  $S_i$  είναι ένα μη κενό, συμπαγές και κυρτό σύνολο,  $|N| = n$ ,  $U_i(s)$  είναι μια συνεχής συνάρτηση στο  $s \in S$  και κοίλη στο  $s_i$  και για ένα τυχαίο διάνυσμα  $r = (r_1, \dots, r_n) > 0$  όπου  $w_r = r \times u^T$  και

$\gamma_{w_r}(s) = \left[ r_1 \frac{\partial u_1(s)}{\partial s_1}, \dots, r_n \frac{\partial u_n(s)}{\partial s_n} \right]^T$ , ορίζουμε τον  $n \times n$  πίνακα  $M$  με  $M_{ij} = r_i \frac{\partial^2 U_i}{\partial s_i \partial s_j}$ . Εάν ο

πίνακας  $M + M^T$  είναι αυστηρά αρνητικά ορισμένος τότε το ΣΙ Nash είναι μοναδικό.

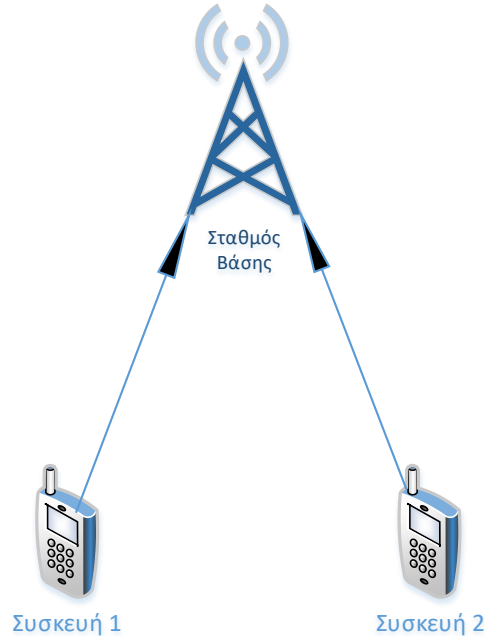
**Κανονική Συνάρτηση** είναι μια διανυσματική συνάρτηση της μορφής  $f: \mathbb{R}_+^n \rightarrow \mathbb{R}_+^n$  για την οποία ισχύουν οι παρακάτω δύο ιδιότητες:

- Θετικότητα:  $\forall s \in \mathbb{R}_+^n \Rightarrow f(s) \geq 0$
- Μονοτονία:  $\forall (s, s') \in \mathbb{R}_+^{2n}, s \leq s' \Rightarrow f(s) \leq f(s')$
- Κλιμακωσιμότητα:  $\forall a > 1, \forall s \in \mathbb{R}_+^n, f(a \cdot s) < a \cdot f(s)$

## 2.2. Μοντέλο Συστήματος

Στα ασύρματα δίκτυα τρίτης γενιάς, στην άνω ζεύξη χρησιμοποιείται ως τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης στο ασύρματο μέσω το σχήμα W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) όπου η πρόσβαση γίνεται με τεχνικές διαίρεσης κώδικα [Qua14], [Hay13], [MZS16]. Όλοι οι χρήστες του δικτύου μοιράζονται μία κοινή ζώνη συχνοτήτων και σε καθέναν από αυτούς ανατίθεται ένας κωδικός διασποράς (spreading code). Κάθε χρήστης κωδικοποιεί με βάση έναν από τους διαθέσιμους κωδικούς διασποράς τα δεδομένα του προς αποστολή στο ΣΒ. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας ο ΣΒ τους αντίστοιχους κωδικούς διασποράς μπορεί να αποκωδικοποιήσει τα απεσταλμένα δεδομένα από κάθε χρήστη.

Παρακάτω παρατίθεται ένα ενδεικτικό μοντέλο συστήματος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση κι ανάλυση της κατανομής ισχύος εκπομπής στην άνω ζεύξη ενός ασύρματου δικτύου W-CDMA.



**Εικόνα 2.1 Άνω Ζεύξη ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου W-CDMA**

Γενικότερα για την αξιολόγηση μιας ασύρματης ζεύξης ανάμεσα σε ένα κινητό τερματικό – χρήστη και το ΣΒ χρησιμοποιείται ο σηματοθορυβικός λόγος κάθε χρήστη  $i$  που επιτυγχάνεται στο ΣΒ κι ο οποίος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$SINR_i(P_i, \bar{P}_{-i}) = \frac{G_i P_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^N G_j P_j + I_0} = \frac{G_i P_i}{I_{-i}(\bar{P}_{-i})} \quad (2.1)$$

όπου  $G_i$  το κέρδος του καναλιού από το χρήστη  $i$  στο ΣΒ της κυψέλης,  $P_i$  είναι η ισχύς εκπομπής του χρήστη  $i$ ,  $\bar{P}_{-i}$  είναι το διάνυσμα τιμών ισχύος εκπομπής για όλους τους χρήστες εκτός από τον χρήστη  $i$  και  $I_0$  είναι η ισχύς του θορύβου στο δέκτη του χρήστη  $i$ . Συνεπώς, ο παράγοντας  $I_{-i}(\bar{P}_{-i})$  συμβολίζει το σύνολο των παρεμβολών που δέχεται ο ΣΒ όταν εκπέμπει ο χρήστης  $i$ .

$$I_{-i}(\bar{P}_{-i}) = \sum_{j=1}^N G_j P_j - G_i P_i + I_0 \quad (2.2)$$

Επίσης, ο λόγος της μέσης ενέργειας κάθε bit για κάθε χρήστη  $i$  προς τη συνολική φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου χρησιμοποιείται σε W-CDMA κυψελωτά συστήματα ως ένας δείκτης ποιότητας μιας τέτοιας ζεύξης [MZS16]. Ο λόγος μέσης ενέργειας bit προς τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$\gamma_i = \left( \frac{E_b}{I_0} \right)_i = \frac{W}{R_i} \frac{G_i P_i}{\sum_{j=1}^N G_j P_j - G_i P_i + I_0} = \frac{W}{R_i} \frac{G_i P_i}{I_{-i}(\bar{P}_{-i})} = \frac{W}{R_i} \text{SINR}_i(P_i, \bar{P}_{-i}) \quad (2.3)$$

όπου  $R_i$  είναι ο ρυθμός μετάδοσης του χρήστη  $i$  και  $W$  το διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Οι χρήστες του δικτύου σε τέτοια ασύρματα περιβάλλοντα ενδιαφέρονται για την επίτευξη όσο το δυνατόν υψηλότερων επιπέδων λόγου ενέργειας bit προς τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου με την όσο το δυνατόν χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος εκπομπής [SMG02], [TsV05]. Με στόχο τη μοντελοποίηση αυτού του συμβιβασμού μεταξύ λόγου ενέργειας bit προς τη φασματική πυκνότητα θορύβου και κατανάλωσης ισχύος έχει προταθεί στα δίκτυα αυτά η εισαγωγή της έννοιας της συνάρτησης χρησιμότητας  $U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$  για κάθε χρήστη του δικτύου. Η συνάρτηση αυτή έχει την ιδιότητα να εκφράζει την επιθυμία κάθε χρήστη  $i$  για τη χρήση πόρων του δικτύου κι εν προκειμένω για την εκπομπή ισχύος  $P_i$ . Η τιμή της συνάρτησης αυτής εξαρτάται επίσης από τις τιμές ισχύος όλων των υπολοίπων χρηστών του δικτύου δηλ. από το διάνυσμα ισχύος  $\bar{P}_{-i}$  που εκπέμπουν σε κοινή ομάδα πόρων με το χρήστη  $i$ . Συνεπώς παρατηρούμε ότι είναι μια συνάρτηση πολλών μεταβλητών, όχι μόνο δηλ. της ισχύος εκπομπής του χρήστη  $i$  αλλά και των υπολοίπων χρηστών που εκπέμπουν σε κοινή ομάδα πόρων με το χρήστη  $i$ . Επίσης η αύξηση της ισχύος εκπομπής ενός χρήστη επιδρά αρνητικά στην επίτευξη μιας υψηλής τιμής λόγου ενέργειας bit προς φασματική πυκνότητα του θορύβου για κάποιον που μοιράζονται την ίδια περιοχή φάσματος με βάση τη σχέση (2.3). Αυτό καθιστά τη θεωρία παιγνίων ως ένα κατάλληλο μαθηματικό εργαλείο για τη μοντελοποίηση αυτού του είδους αλληλοεπιδράσεων μεταξύ των χρηστών του δικτύου.

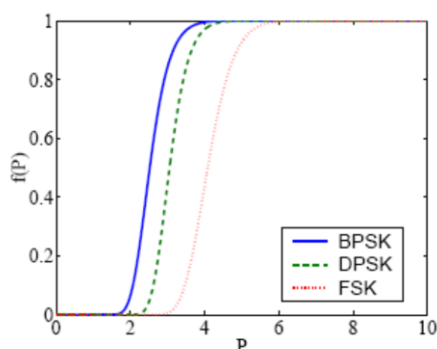
Ενδεικτικά η συνάρτηση χρησιμότητας αυτή μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$U_i(P_i, \bar{P}_{-i}) = \frac{R_{\max,i} f_i(\gamma_i)}{P_i} = \frac{T_i(\gamma_i)}{P_i} \quad (2.4)$$

όπου η συνάρτηση  $f_i(\gamma_i): \mathbb{R}^+ \rightarrow [0,1]$  είναι μια συνάρτηση του λόγου ενέργειας bit προς τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου στο ΣΒ για το χρήστη  $i$  κι εκφράζει με βάση την εργασία [SMG02] το ποσοστό των επιτυχώς μεταδιδόμενων bits στο ΣΒ. Στόχος κάθε χρήστη είναι η επίτευξη όσο το δυνατόν υψηλότερων ποσοστών επιτυχώς μεταδιδόμενων bits στο ΣΒ με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος δηλ. κατανάλωση ισχύος.

Η συνάρτηση απόδοσης  $f_i(\gamma_i)$  αντιπροσωπεύει την πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης πακέτου για το χρήστη  $i$  και είναι μία γνησίως αύξουσα συνάρτηση του λόγου της μέσης ενέργειας bit προς τη φασματική πυκνότητα του θορύβου. Η συνάρτηση απόδοσης  $f_i(\gamma_i)$  διαφέρει ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και συνήθως έχει μία σιγμοειδή μορφή σε σχέση με το λόγο ενέργειας bit προς τη φασματική

πυκνότητα ισχύος του θορύβου. Μια ενδεικτική μορφή της συνάρτησης απόδοσης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Εικόνα 2.2 Η συνάρτηση απόδοσης σε σχέση με το λόγο ενέργειας bit προς φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου για BPSK, DPSK, FSK σχήματα διαμόρφωσης**

Πιο συγκεκριμένα, η συνάρτηση απόδοσης  $f_i$  του χρήστη  $i$  έχει τις ακόλουθες ιδιότητες.

1. Η  $f_i$  είναι μια γνησίως αύξουσα συνάρτηση του  $\gamma_i$ .
2. Η  $f_i$  είναι μια συνεχής, διπλά παραγωγίσιμη, σιγμοειδής συνάρτηση ως προς το  $\gamma_i$ .
3. Ισχύει  $f_i(0) = 0$  για να εξασφαλιστεί ότι  $U_i = 0$  όταν  $P_i = 0$ .
4.  $\lim_{\gamma_i \rightarrow \infty} f_i(\gamma_i) = 1$ .

Η ορθότητα των παραπάνω ιδιοτήτων έχει αποδειχθεί σε διάφορα πρακτικά σενάρια με αρκετά μεγάλο μέγεθος των πακέτων δεδομένων  $M$  (δηλ.  $M \geq 100bits$ ) [SMG02], [XSC03].

Στη συνέχεια παρατηρώντας την εξίσωση (4) θα περιγράψουμε σύντομα τη συνάρτηση

$$T_i(\gamma_i) = R_{\max,i} \cdot f(\gamma_i) \quad (2.5)$$

Η συνάρτηση  $T_i(\gamma_i)$  εκφράζει τον επιτευξιμό ρυθμό μετάδοσης στο δέκτη κι όπως αποδεικνύεται στην εργασία [TKP09a], [TKP09b] είναι σιγμοειδής ως προς το ρυθμό μετάδοσης  $R_i$  αλλά κι ως προς το λόγο ενέργειας bit προς φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου. Η ιδιότητα αυτή της συνάρτησης  $T_i(\gamma_i)$  θα φανεί πολύ χρήσιμη για την ύπαρξη και μοναδικότητα ενός ΣΙ κατά Nash στο σύνολο δυνατών επιλογών τιμών ισχύος εκπομπής των χρηστών.

### 2.3. Απαιτήσεις σε Ποιότητα Υπηρεσίας

Όπως προβλέπεται από τη 3GPP στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών 3<sup>ης</sup>; 4<sup>ης</sup> και 5<sup>ης</sup> γενιάς οι χρήστες μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες ανάλογα με τις απαιτήσεις τους ως προς την ποιότητα υπηρεσίας. Η ποιότητα υπηρεσίας στα πλαίσια της μελέτης/έρευνας που γίνεται στη διδακτορική διατριβή αυτή αφορά το ασύρματο φυσικό μέσο μετάδοσης και

αποτιμάται με βάση το ποσοστό των επιτυχώς λαμβανόμενων bits στο δέκτη και κατ' επέκταση μέσω του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης στο δέκτη. Να σημειώσουμε ότι ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης στο δέκτη μπορεί να υπολογισθεί μέσω του τύπου του Shannon ως εξής:

$$R_i = \log_2(1 + \gamma_i) \quad (2.6)$$

Από τον τύπο αυτό προκύπτει η 1 προς 1 κι αύξουσα σχέση μεταξύ σηματοθορυβικού λόγου κι επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης στο δέκτη. Όπως υποθέσαμε και στην προηγούμενη ενότητα και με βάση προηγούμενες εργασίες στο πεδίο αυτό [SMG02] υπάρχει αποδεδειγμένα μια σχέση μεταξύ ποσοστού επιτυχώς λαμβανόμενων bits στο δέκτη και ενέργειας bit προς φασματική πυκνότητα θορύβου στο δέκτη η οποία περιγράφεται μαθηματικά μέσω της συνάρτησης απόδοσης  $f_i(\gamma_i)$ .

Οι υπηρεσίες που παρέχονται από το δίκτυο μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου. Οι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου π.χ. υπηρεσίες φωνής, video είναι ελάχιστα ανεκτικές ως προς την καθυστέρηση αλλά πιθανόν αρκετά ανεκτικές ως προς την απώλεια ορισμένων πακέτων. Αντίθετα οι υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου όπως υπηρεσίες Web, e-mail κ.α. πιθανόν να είναι ανεκτικές σε ένα βαθμό ως προς την καθυστέρηση αλλά καθόλου έως ελάχιστα ανεκτικές ως προς την απώλεια κάποιου πακέτου. Για τις ανάγκες αξιολόγησης μιας ασύρματης ζεύξης θα θεωρήσουμε ότι οι υπηρεσίες που παρέχει το δίκτυο μπορούν να διαχωριστούν σε αυτές που απαιτούν έναν εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης άρα και μια μέγιστη ανεκτή καθυστέρηση όπως οι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και σε αυτές που δεν έχουν μια τέτοια απαίτηση και συνεπώς είναι πιο ανεκτικές σε καθυστερήσεις όπως οι υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου.

Θεωρούμε ότι ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης στο δέκτη συνδέεται άμεσα με τη χρονική καθυστέρηση λήψης ενός μεταδιδόμενου πακέτου. Θεωρούμε ότι οι χρήστες που απαιτούν έναν εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης στο δέκτη ο οποίος είναι ο επιθυμητός ρυθμός μετάδοσης  $R_{D,i}^*$  κι εκφράζει την ιδανική τιμή του ρυθμού μετάδοσης του χρήστη, σύμφωνα με τον οποίο ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του χρήστη σε ποιότητα υπηρεσίας, ενώ ένας παράγοντας ελαστικότητας (Elasticity Factor - EF) προσδιορίζει τα επιτρεπτά όρια διακύμανσης του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης σε σχέση με τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης για τον κάθε χρήστη. Έτσι μπορούμε να ορίσουμε διαφορετικές κατηγορίες χρηστών με βάση διαφορετικά επίπεδα επιθυμητών ρυθμών μετάδοσης στο δέκτη. Για παράδειγμα για τους χρήστες υπηρεσιών μη πραγματικού χρόνου μπορούμε να ορίσουμε αρκετά χαμηλά επιθυμητά επίπεδα ρυθμών μετάδοσης ενώ για τους χρήστες υπηρεσιών πραγματικού χρόνου αρκετά υψηλότερα. Με αυτό τον τρόπο στοχεύουμε σε μια ανάθεση πόρων του δικτύου που υπακούει στις ετερογενείς επιθυμίες των χρηστών για τη χρήση υπηρεσιών του δικτύου με την οικονομικότερη δυνατόν κατανάλωση πόρων.



Σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση η συνάρτηση επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης ενός χρήστη  $i \in N$  έχει παρόμοιες ιδιότητες με τη συνάρτηση απόδοσης  $f_i(\gamma_i)$  κι έχουν αναφερθεί παραπάνω.

Στο επόμενο υποκεφάλαιο θα δείξουμε πως μεταβάλλοντας κατάλληλα τη μορφή της συνάρτησης  $T_i(\gamma_i)$  μπορούμε να λάβουμε υπόψιν τις διαφορετικές επιθυμίες κάθε χρήστη για την επίτευξη ενός επιθυμητού επιπέδου λόγου ενέργειας bit προς φασματική πυκνότητα θορύβου στο δέκτη. Όπως έχει εξηγηθεί και παραπάνω μια ελάχιστη τιμή λόγου ενέργειας bit προς τη φασματική πυκνότητα του θορύβου  $\gamma_i$  οδηγεί σε μια ελάχιστη τιμή της συνάρτησης απόδοσης  $f_i(\gamma_i)$  και κατά συνέπεια σε μια εγγυημένη τιμή του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης  $R_i = R_{\max,i} f_i(\gamma_i)$ .

## **2.4. Μοντελοποίηση μη Συνεργατικού Παιγνίου Κατανομής Ισχύος Εκπομπής στην Άνω Ζεύξη W-CDMA Δικτύων**

Στην ενότητα αυτή διατυπώνεται ένα μη συνεργατικό παίγνιο κατανομής ισχύος στην άνω ζεύξη ενός W-CDMA δικτύου. Στο δίκτυο αυτό θεωρούμε ένα στιγμιότυπο όπου  $N$  διαφορετικοί χρήστες επιθυμούν να στείλουν δεδομένα προς το ΣΒ. Για το σκοπό αυτό διαθέτουν ένα ψευδοκωδικό διασποράς φάσματος. Αυτός χρησιμοποιείται στη μετάδοση τους για να διασπείρουν φασματικά το μεταδιδόμενο σήμα τους προκειμένου να καταστεί δυνατή η μετάδοση δεδομένων πολλαπλών χρηστών την ίδια χρονική στιγμή σε κοινή φασματική περιοχή. Αποδεικνύεται η ύπαρξη και η μοναδικότητα ενός ΣΙ κατά Nash για το παίγνιο αυτό και προτείνεται ένας επαναληπτικός και κατανεμημένος αλγόριθμος που συγκλίνει σε αυτό το ΣΙ κατά Nash.

Το προτεινόμενο μη συνεργατικό παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής συμβολίζεται με  $G = [N, \{A_i\}_{i \in N}, \{U_i\}_{i \in N}]$ , όπου  $N$  είναι το σύνολο των χρηστών/παικτών και  $A_i = [0, P_i^{\max}]$  είναι το σύνολο στρατηγικών του χρήστη  $i \in N$ ,  $P_i^{\max}$  είναι η μέγιστη δυνατή τιμή ισχύος εκπομπής για το χρήστη  $i$  και  $U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$  είναι η συνάρτηση χρησιμότητας κάθε χρήστη  $i$ , όπως έχει οριστεί στη σχέση (2.4)  $U_i(P_i, \bar{P}_{-i}) = \frac{T_i(\gamma_i)}{P_i}$ .

Για το παραπάνω ορισμένο παίγνιο αποδεικνύεται η ύπαρξη ενός ΣΙ Nash στο σύνολο επιλογών στρατηγικής τιμών ισχύος εκπομπής  $A = [0, P_1^{\max}] \times [0, P_2^{\max}] \dots \times [0, P_N^{\max}]$ . Προς απόδειξη αυτού γίνεται χρήση του Θεωρήματος των Debreu et al. (1952) περί ύπαρξης ΣΙ κατά Nash [FuI91].

Συγκεκριμένα όλες οι προϋποθέσεις του εν λόγω θεωρήματος πληρούνται δηλ. τα σύνολα των στρατηγικών όλων των παιχτών είναι κυρτά και συμπαγή και για όλους τους παίχτες, η συνάρτηση χρησιμότητας  $U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$  είναι μια συνεχής συνάρτηση στο διάνυσμα στρατηγικών  $A$  και σχεδόν κοίλη στο διάστημα στρατηγικής κάθε χρήστη  $A_i$ .

Για τον υπολογισμό του ΣΙ κάθε χρήστης προσπαθεί διαισθητικά να επιλέξει μια τιμή ισχύος εκπομπής που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση χρησιμότητάς του. Συνεπώς, κάθε χρήστης  $i$  καλείται να επιλέξει ανά πάσα χρονική στιγμή την τιμή ισχύος εκπομπής που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση χρησιμότητάς του όπως διατυπώνεται στην παρακάτω σχέση:

$$\max_{P_i} U_i = \max_{P_i} U_i(P_i, \bar{P}_{-i}) \quad \text{for } i=1, \dots, N \quad (2.7)$$

υπό τον περιορισμό της άνω φραγμένης και μη μηδενικής ισχύος εκπομπής των χρηστών.

Η ύπαρξη ενός ΣΙ κατά Nash με βάση το θεώρημα των Debreu et. al. δεν έπεται και τη μοναδικότητα του ΣΙ αυτού.

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η συνάρτηση χρησιμότητας  $U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$  είναι σχεδόν ημικοίλη [SMG02] τότε μπορούμε να βρούμε ότι αυτή μεγιστοποιείται στο σημείο

$$P_i^* = \min\left\{\frac{\gamma_i^* R_{Max,i}^* I_{-i}(\bar{P}_{-i})}{WG_i}, P_i^{Max}\right\} \quad \text{όπου } \gamma_i^* \text{ προέρχεται από τη μοναδική θετική λύση της εξίσωσης } \frac{\partial T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} \cdot \gamma_i - T_i(\gamma_i) = 0 \quad (2.8).$$

Στο σημείο  $\gamma_i^*$  μηδενίζεται η πρώτη παράγωγος της συνάρτησης χρησιμότητας  $U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$  ως προς την ισχύ εκπομπής  $P_i$ . Στην περίπτωση που η τιμή του λόγου ενέργειας bit προς τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου αντιστοιχεί σε τιμή ισχύος μεγαλύτερη από τη μέγιστη δυνατή του χρήστη  $i$  τότε ο χρήστης  $i$  επιλέγει να εκπέμψει με τη μέγιστη δυνατή τιμή ισχύος του  $P_i^{max}$ , τιμή η οποία μεγιστοποιεί τη συνάρτηση χρησιμότητάς του.

Υιοθετώντας μια διαφορετική για κάθε χρήστη  $i$  συνάρτηση απόδοσης  $T_i$  μπορούμε να μεταβάλλουμε ανάλογα με την επιθυμία κάθε χρήστη το επιθυμητό επίπεδο του λόγου  $\gamma_i^*$  που όπως αναφέραμε παραπάνω προκύπτει ως η μοναδική θετική λύση της εξίσωσης (2.8). Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνουμε υπόψιν στον υπολογισμό του επιθυμητού ΣΙ τις ενδεχόμενα διαφορετικές απαιτήσεις των χρηστών για το επιθυμητό επίπεδο λόγου ενέργειας bit προς φασματική πυκνότητα θορύβου στο δέκτη (στη συγκεκριμένη περίπτωση στο ΣΒ). Να σημειώσουμε ότι μεταξύ του επιθυμητού επιπέδου λόγου ενέργειας bit προς φασματική πυκνότητα θορύβου στο δέκτη και του επιτευξιμού ρυθμού μετάδοσης στο δέκτη υπάρχει μια αύξουσα σχέση όπως έχει εξηγηθεί και στο προηγούμενο υπο-κεφάλαιο 2.3. Επομένως ένα ελάχιστο επίπεδο λόγου ενέργειας bit προς φασματική πυκνότητα θορύβου στο δέκτη μπορεί

να μεταφραστεί ισοδύναμα και σε ένα ελάχιστο επίπεδο επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης στο δέκτη.

## 2.5. Αλγόριθμος Υπολογισμού Σημείου Ισορροπίας Nash

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζουμε ένα σύγχρονο, κατανεμημένο αλγόριθμο ο οποίος υπολογίζει το ΣΙ του παραπάνω παίγνιου  $G$ . Στόχος μας είναι ο σχεδιασμός ενός κατανεμημένου αλγορίθμου (που εκτελείται δηλ. από κάθε χρήστη παράλληλα) και υπολογίζει το επιθυμητό ΣΙ. Όπως είπαμε και προηγουμένως η ικανοποίηση των προϋποθέσεων του θεωρήματος των Debreu et. al. δεν οδηγεί απαραίτητα σε ένα μοναδικό ΣΙ. Όμως αξιοποιώντας το θεωρητικό πλαίσιο του [Yat95] μπορούμε να αποδείξουμε τη μοναδικότητα του ζητούμενου ΣΙ και να σχεδιάσουμε ένα σύγχρονο και κατανεμημένο αλγόριθμο που συγκλίνει στο ΣΙ αυτό.

Σύμφωνα με την εργασία του [Yat95] εάν η βέλτιστη απόκριση κάθε χρήστη είναι μια «κανονική» συνάρτηση τότε υπάρχει ένας σύγχρονος και κατανεμημένος αλγόριθμος που συγκλίνει στο μοναδικό ΣΙ του παιγνίου  $G$ . Οι προϋποθέσεις για να χαρακτηριστεί η βέλτιστη απόκριση κάθε χρήστη ως κανονική συνάρτηση είναι οι παρακάτω:

- Θετικότητα:  $\forall s \in \mathbb{R}_+^n \Rightarrow f(s) \geq 0$
- Μονοτονία:  $\forall (s, s') \in \mathbb{R}_+^{2n}, s \leq s' \Rightarrow f(s) \leq f(s')$
- Κλιμακωσιμότητα:  $\forall a > 1, \forall s \in \mathbb{R}_+^n, f(a \cdot s) < a \cdot f(s)$

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η βέλτιστη απόκριση κάθε χρήστη  $i$ ,  $BR(P_{-i})$ , έχοντας ως δεδομένο τις επιλογές ισχύος εκπομπής για όλους τους υπόλοιπους χρήστες του δικτύου δίνεται από τον παρακάτω τύπο δηλ.

$$BR(P_{-i}) = \arg \max_{p_i \in A_i} U_i(P_i, P_{-i}) = \min \left\{ \frac{\gamma_i^* R_{Max,i}^* I_{-i}(\bar{P}_{-i})}{WG_i}, P_i^{Max} \right\} \quad (2.9)$$

Στην εργασία αυτή αποδεικνύεται ότι μια βέλτιστη απόκριση της μορφής της (2.9) είναι κανονική συνάρτηση και κατά συνέπεια το ΣΙ στο οποίο συγκλίνει ένας παράλληλος κατανεμημένος αλγόριθμός όπως θα δείξουμε παρακάτω είναι μοναδικό.

### Αλγόριθμος υπολογισμού ΣΙ Nash

**Βήμα 1<sup>ο</sup>** : Αρχικά θεωρούμε ότι ο κάθε χρήστης  $i$  εκπέμπει με μια τυχαία τιμή ισχύος εκπομπής  $p_i \in [0, P_i^{max}]$ ,  $\forall i \in N$ . Έστω,  $P_i^{*(0)} = P_i \forall i \in N$ .

**Βήμα 2<sup>ο</sup>** : Ο ΣΒ υπολογίζει το συνολικό θόρυβο που φτάνει σε αυτόν και στέλνει μέσω ευρυεκπομπής (broadcasting) την τιμή αυτή. Στη συνέχεια, κάθε χρήστης υπολογίζει το θόρυβο

που αντιλαμβάνεται εξαιτίας της εκπομπής των υπολοίπων χρηστών  $I_{-i}^{(k)}(\bar{P}_{-i}^{(k)})$  από τη σχέση (2.2) και επαναπροσδιορίζει την ισχύ εκπομπής του,  $P_i^{*(k+1)}$  σύμφωνα με τη σχέση (2.9).

**Βήμα 3<sup>ο</sup>** : Εάν η ισχύς εκπομπής όλων των χρηστών συγκλίνουν, δηλαδή  $|P_i^{*(k+1)} - P_i^{*(k)}| \leq \varepsilon, \forall i \in N$  όπου  $\varepsilon$  μια επαρκώς μικρή θετική σταθερά, τότε ο αλγόριθμος σταματά, διαφορετικά ο δείκτης επανάληψης του αλγορίθμου αυξάνεται κατά ένα και ο έλεγχος επιστρέφει στο βήμα 2.

## 2.6. Αναποδοτικότητα κατά Pareto του ΣΙ Nash

Όπως μπορεί να αποδειχθεί, το παραπάνω ΣΙ κατά Nash δεν είναι Pareto βέλτιστο [SMG02]. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει τουλάχιστον ένα διάνυσμα επιλογών ισχύος εκπομπής το οποίο εξασφαλίζει για όλους τους παίκτες μεγαλύτερη ή ίση ωφέλεια/χρησιμότητα και για τουλάχιστον έναν από αυτούς γνήσια μεγαλύτερη χρησιμότητα. Στην εργασία [SMG02] αποδεικνύεται ότι οι χρήστες μπορούν να επιτύχουν ΣΙ τα οποία κυριαρχούν με την Pareto έννοια του ΣΙ του παραπάνω παιγνίου  $G$  μειώνοντας την εκπεμπόμενη ισχύ τους. Σε αυτή την κατεύθυνση έχουν γίνει προσπάθειες βελτίωσης του αποτελέσματος αυτού εισάγοντας παράγοντες κοστολόγησης [SMG02], [TKP12] στον ορισμό της συνάρτησης χρησιμότητας κάθε χρήστη.

Στην εργασία [SMG02] προτείνεται ένα γραμμικό σχήμα κοστολόγησης της παρακάτω μορφής:  $cost_i(p_i) = c_i p_i$ . Συγκεκριμένα ορίζεται ένα παίγνιο  $G^c = [N, A, \{U_i^c(\cdot)\}]$  όπου  $N, A$  έχουν ορισθεί παραπάνω και

$$U_i^c(p_i, p_{-i}) = \frac{T_i(\gamma_i)}{P_i} - c_i p_i \quad (2.10)$$

Με τον τρόπο αυτό γίνεται μια προσπάθεια μετριασμού σε ένα βαθμό της εγωιστικής συμπεριφοράς κάθε χρήστη για την κατανάλωση ισχύος εκπομπής και το δίκτυο οδηγείται σε περισσότερο κοινωνικά επωφελή αποτελέσματα.

Στην εργασία αυτή ακολουθείται η ίδια διαδικασία με την προηγούμενη ενότητα για την ανάλυση και τον υπολογισμό των νέων ΣΙ. Δυστυχώς λόγω της εισαγωγής του παράγοντα κοστολόγησης οι επιθυμητές ιδιότητες της κοιλότητας και της σχεδόν κοιλότητας των συναρτήσεων χρησιμότητας των χρηστών χάνονται κι οι συγγραφείς αναζητούν στη θεωρία υπερ-αρθρωτών (supermodular) παιγνίων [Top98] τις απαραίτητες συνθήκες για την ύπαρξη και μοναδικότητα ενός επιθυμητού ΣΙ.

Προτού δώσουμε τον ορισμό ενός υπεραρθρωτού παιγνίου δίνουμε δύο χρήσιμους ορισμούς που αφορούν τις έννοιες της άνω ημισυνέχειας και των μη φθίνουσών διαφορών μιας συνάρτησης.

Μια συνάρτηση  $U_i(s)$  είναι **άνω ημισυνεχής** στο  $s_0$  εάν για κάθε  $\varepsilon > 0$ , υπάρχει μια γειτονιά  $N(s_0)$  τέτοια ώστε αν  $s \in N(s_0)$  έπεται ότι  $U_i(s) < U_i(s_0) + \varepsilon$ . Η συνάρτηση  $U_i(s)$  είναι άνω ημισυνεχής στο  $S$  εάν είναι άνω ημισυνεχής για κάθε  $s_0 \in S$ .

Μια συνάρτηση  $U_i(p_i, \bar{p}_{-i})$  έχει **μη φθίνουσες διαφορές** στο διάστημα  $(p_i, \bar{p}_{-i})$  εάν για κάθε  $\bar{p}_{-i} \geq \bar{p}'_{-i}$  η διαφορά  $U_i(p_i, \bar{p}_{-i}) - U_i(p'_i, \bar{p}'_{-i})$  είναι μη φθίνουσα συνάρτηση στο  $\bar{p}'_{-i}$ , δηλ.  $U_i(p_i, \bar{p}_{-i}) - U_i(p'_i, \bar{p}_{-i}) \geq U_i(p_i, \bar{p}'_{-i}) - U_i(p'_i, \bar{p}'_{-i})$  για  $p_i \geq p'_i$ . Ισοδύναμα, για συνεχείς και διαφορίσιμες  $C^2$  συναρτήσεις χρησιμότητας  $U_i(p_i, \bar{p}_{-i})$ , η ικανή κι αναγκαία συνθήκη για την επίτευξη μη φθίνουσών διαφορών είναι  $\frac{\partial^2 U_i(p_i, \bar{p}_{-i})}{\partial p_i \partial p_j} \geq 0 \quad \forall i \neq j$ .

Ένας τυπικός ορισμός ενός υπεραρθρωτού παιγνίου μίας διάστασης πεδίου στρατηγικών των χρηστών δίδεται ακολούθως.

**Ορισμός (Υπεραρθρωτό Παίγνιο):** Ένα παίγνιο  $G = [N, \{A_i\}, \{U_i\}]$  είναι υπεραρθρωτό εάν για κάθε χρήστη  $i$ , το πεδίο στρατηγικών  $S_i$  είναι ένα μη κενό και συμπαγές υποσύνολο του  $\mathbb{R}$ , η συνάρτηση χρησιμότητας  $U_i$  είναι άνω ημι-συνεχής στο  $S$  και έχει μη φθίνουσες διαφορές (non-decreasing differences - NDD) στο  $S$ .

Σύμφωνα με την εργασία [Top79] ένα υπεραρθρωτό παίγνιο  $G$  διαθέτει ένα σύνολο από ΣΙ Nash το οποίο σύνολο έχει ένα μέγιστο κι ένα ελάχιστο στοιχείο (σύγκριση μεταξύ των διανυσμάτων ισχύος γίνεται συνιστώσα προς συνιστώσα, δηλ.  $x \leq y \Leftrightarrow x_i \leq y_i, \forall i \in N$ ).

**Παραμετροποιημένο υπεραρθρωτό παίγνιο με παράμετρο  $\varepsilon$ :** είναι το  $G = [N, A, \{U_i^\varepsilon(\cdot)\}]$  αν  $U_i^\varepsilon(p_i, p_{-i}, \varepsilon)$  έχει μη φθίνουσες διαφορές στο  $(p_i, \bar{p}_{-i})$  και στο  $(p_i, \varepsilon)$  για όλους τους παίκτες του παιγνίου  $G$ .

Επίσης αποδεικνύεται ότι για το παίγνιο  $G^c = [N, A, \{U_i^c(\cdot)\}]$  όπου  $U_i^c(p_i, p_{-i}) = \frac{T_i(\gamma_i)}{P_i} - c_i p_i$  είναι ένα παραμετροποιημένο υπεραρθρωτό παίγνιο εάν τροποποιηθεί κατάλληλα το σύνολο  $A$  των επιλογών στρατηγικής όλων των παιχτών του παιγνίου  $G^c$ . Η αναγκαία τροποποίηση στο πεδίο στρατηγικών κάθε χρήστη σχετίζεται με την επίτευξη μιας ελάχιστης απαίτησης σχετικά με το λόγο ενέργειας bit προς τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου στο δέκτη. Η ελάχιστη απαίτηση αυτή αποδεικνύεται ότι είναι

της μορφής  $\gamma_i \geq \frac{\ln M}{A}$  στην περίπτωση που  $f_i(\gamma_i) = (1 - \exp(-A \cdot \gamma_i))^M$  προκειμένου το παίγνιο  $G^c$  να είναι υπεραρθρωτό. Επομένως ορίζοντας κατάλληλα τις σταθερές  $M$  και  $A$  μπορούμε να ορίσουμε διαφορετικές κλάσεις χρηστών με διαφορετικές ελάχιστες απαιτήσεις ως προς το λόγο ενέργειας bit προς τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου. Να σημειώσουμε ότι διαφορετικές απαιτήσεις ως προς το ελάχιστο  $\gamma_i$  έπονται και διαφορετικές απαιτήσεις ως προς τον ελάχιστο επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης στο δέκτη.

Από τη στιγμή που το παίγνιο  $G^c$  είναι ένα παραμετροποιημένο υπεραρθρωτό παίγνιο έχει ένα μέγιστο κι ένα ελάχιστο σημείο ισορροπίας κατά Nash [SMG02].

Επίσης αποδεικνύεται ότι για το συγκεκριμένο παίγνιο αν  $E = \{p \in P : p_L(c) \leq p \leq p_H(c)\}$  είναι το σύνολο των ΣΙ του παιγνίου  $G^c$  το μικρότερο σημείο ισορροπίας  $p_L(c)$  αποτελεί το κυρίαρχο με την Pareto έννοια δηλ.  $U(p_L(c)) \geq U(p(c))$  για όλα τα σημεία ισορροπίας  $p(c)$  του παιγνίου  $G^c$ .

Επίσης οι συγγραφείς παραθέτουν κι έναν αλγόριθμο για τον κατανεμημένο υπολογισμό του μικρότερου ΣΙ του παιγνίου  $G^c$  το οποίο όπως είπαμε και παραπάνω αποτελεί το περισσότερο κυρίαρχο κατά την Pareto έννοια. Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται στον κατανεμημένο υπολογισμό της βέλτιστης απόκρισης για κάθε χρήστη του δικτύου με τη διαφορά ότι σε περίπτωση πολλαπλών μεγίστων της συνάρτησης βέλτιστης απόκρισης επιλέγεται το μικρότερο από αυτά. Ακολουθώντας αυτή τη διαδικασία ο αλγόριθμος συγκλίνει στο μικρότερο από τα σημεία ισορροπίας του παιγνίου  $G^c$ .

Στη βιβλιογραφία έχουν παρουσιαστεί κι άλλα σχήματα κοστολόγησης για τη χρήση των πόρων του δικτύου. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι στις εργασίες [TKP12], [VTP17a] έχουν προταθεί κυρτά σχήματα κοστολόγησης.

## 2.7. Ανακεφαλαιωτικά Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε μια σύντομη ανασκόπηση παιγνιοθεωρητικών προσεγγίσεων για την επίλυση του προβλήματος της κατανομής ισχύος εκπομπής στην άνω ζεύξη ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου τεχνολογίας ασύρματης πρόσβασης W-CDMA. Παρουσιάστηκε ένα ενδεικτικό μοντέλο συστήματος για την ανάλυση του παραπάνω προβλήματος. Το πρόβλημα αυτό έχει μοντελοποιηθεί ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο για το οποίο έχει αποδειχθεί η ύπαρξη κι η μοναδικότητα ενός ΣΙ Nash. Στόχος των χρηστών εντός της κυψέλης είναι η επίτευξη ενός ικανοποιητικού ρυθμού μετάδοσης με τη χαμηλότερη δυνατή κατανάλωση ισχύος εκπομπής. Για αυτό το λόγο προτείνεται η εισαγωγή συναρτήσεων

χρησιμότητας που συνδυάζουν και τα δύο παραπάνω χαρακτηριστικά. Επίσης προτείνεται ένας καταναλισκόμενος αλγόριθμος ο οποίος υπολογίζει το επιθυμητό ΣΙ Nash μετά από ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων. Ακόμη έχει αποδειχθεί ότι το ΣΙ Nash αυτό δεν είναι αποδοτικό κατά Pareto. Για τη βελτίωση της Pareto αποδοτικότητάς του προτείνεται η εισαγωγή σχημάτων κοστολόγησης των καταναλισκόμενων πόρων ισχύος εκπομπής. Έτσι τροποποιείται η προηγούμενη εισαχθείσα συνάρτηση χρησιμότητας με έναν παράγοντα κοστολόγησης της ισχύος εκπομπής. Τέλος αποδεικνύεται η ύπαρξη σχετικών ΣΙ Nash για το τροποποιημένο παίγνιο κάνοντας χρήση της θεωρίας των υπεραρθρωτών παιγνίων. Αποδεικνύεται ότι υπάρχει ένα σύνολο από ΣΙ Nash από τα οποία επιλέγεται αυτό με τη χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος εκπομπής.

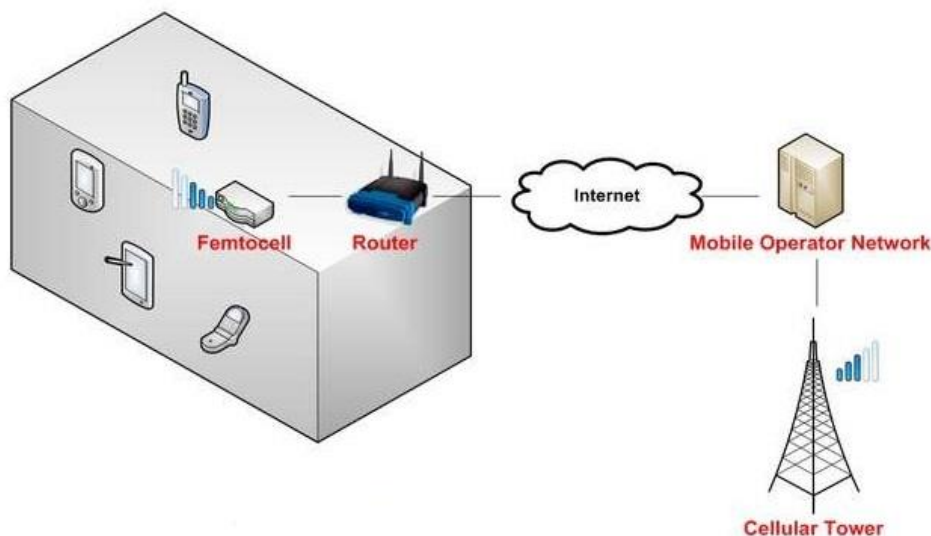
Στη συνέχεια αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της κατανομής ισχύος εκπομπής αλλά κι επιλογής κυψέλης εξυπηρέτησης σε ένα ασύρματο διεπίπεδο φεμτοκυβελωτό δίκτυο.





### ***3. Επιλογή Κυψέλης Εξυπηρέτησης και Ισχύος Εκπομπής σε Διεπίπεδα Φεμτοκυψελωτά Δίκτυα***

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται το πρόβλημα της συνδυαστικής επιλογής κυψέλης εξυπηρέτησης και ισχύος εκπομπής στην άνω ζεύξη ενός διεπίπεδου φεμτοκυψελωτού ασύρματου δικτύου με παράλληλη υποστήριξη πολλαπλών τύπων υπηρεσιών (π.χ. πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου).



Εικόνα 3.1 Αρχιτεκτονική ενός διεπίπεδου φεμτοκυψελωτού ασύρματου δικτύου

#### ***3.1. Σχετικές Εργασίες & Πληροφορίες***

Τα διεπίπεδα φεμτοκυψελωτά ασύρματα δίκτυα ως επέκταση των ασύρματων κυψελωτών δικτύων ενός επιπέδου έχουν αναδειχθεί τα τελευταία χρόνια προκειμένου να αποσυμφορηθεί το κύριο μακροκυψελωτό δίκτυο από την αυξανόμενη κίνηση δεδομένων και την αύξηση του αριθμού των χρηστών [Man08], [CGA08]. Σύμφωνα με σχετικά στατιστικά δεδομένα, το 90% του όγκου των υπηρεσιών δεδομένων και το 60% του όγκου των υπηρεσιών φωνής πραγματοποιούνται σήμερα στο εσωτερικό κτιριακών εγκαταστάσεων [CGA08]. Οι φεμτοκυψέλες συνήθως είναι εγκατεστημένες στο εσωτερικό κτιρίων όπως σπιτιών, γραφείων, εμπορικών καταστημάτων, αεροδρομίων κ.α. Αποτελούνται από ένα σημείο πρόσβασης (Access Point) με μικρή εμβέλεια, συνήθως 10-50m και το οποίο συνδέεται με κάποιου άλλου είδους ζεύξη (π.χ. ευρυζωνική) με το δίκτυο του παρόχου και είναι σε θέση να προσφέρει

υπηρεσίες διαδικτύου. Επίσης τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των ζεύξεων που προσφέρουν είναι αρκετά καλά εξαιτίας της κοντινής απόστασης μεταξύ χρηστών και κυψέλης εξυπηρέτησης. Τέλος έχουν χαμηλό κόστος εγκατάστασης και παρέχουν κάλυψη σε περιοχές που πιθανόν δεν παρέχεται από το πρωτεύον ασύρματο κυψελωτό δίκτυο [CGA08], [AHM12], [RVP10].

Ένα διεπίπεδο ασύρματο κυψελωτό δίκτυο αποτελείται από ένα συμβατικό μακροκυψελωτό δίκτυο και από ένα σύνολο από φεμτοκυψέλες που παρέχουν κάλυψη μικρής εμβέλειας σε εσωτερικούς χώρους. Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που κάνει η 3GPP οι φεμτοκυψέλες αυτές μπορούν να διαχωριστούν σε φεμτοκυψέλες κλειστής πρόσβασης όπου μόνο συγκεκριμένοι εγγεγραμμένοι εκ των προτέρων χρήστες μπορούν να εξυπηρετηθούν από το σημείο πρόσβασης της φεμτοκυψέλης και σε φεμτοκυψέλες ανοικτής πρόσβασης όπου οποιοσδήποτε χρήστης, χωρίς προεγγραφή, μπορεί να έχει πρόσβαση στις υπηρεσίες της φεμτοκυψέλης εφόσον φυσικά βρίσκεται εντός της περιοχής κάλυψής της. Λόγω της χωρικής κατανομής των φεμτοκυψελών με την ταυτόχρονη παρουσία μιας μακροκυψέλης δυνητικά παρέχεται στους χρήστες η πιθανότητα σύνδεσης σε περισσότερες της μιας κυψέλης εξυπηρέτησης. Για αυτό το λόγο έχει ενδιαφέρον η μελέτη του προβλήματος βέλτιστης επιλογής κυψέλης εξυπηρέτησης σε μια τέτοια αρχιτεκτονική δικτύου δύο επιπέδων.

Σχετικές εργασίες στην περιοχή αυτή αποτελούν οι [LiF11], [FSH13], [TKS13], [DSD13]. Στην εργασία [LiF11] αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της ανάθεσης πρόσβασης κατά προτεραιότητα σε ορισμένους χρήστες των φεμτοκυψελών. Στην [FSH3] διατυπώνεται ένα εξελικτικό παίγνιο για την επιλογή κυψέλης εξυπηρέτησης σε ένα διεπίπεδο φεμτοκυψελωτό δίκτυο. Στην [TKS13] επεκτείνεται η παραπάνω μελέτη και στην περίπτωση τόσο της άνω και όσο και της προς τα κάτω ζεύξης. Τέλος στην [DSD13] προτείνεται ένα σχήμα που υπολογίζει την χωρητικότητα της προς τα κάτω ζεύξης και διασφαλίζει ένα ελάχιστο επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας.

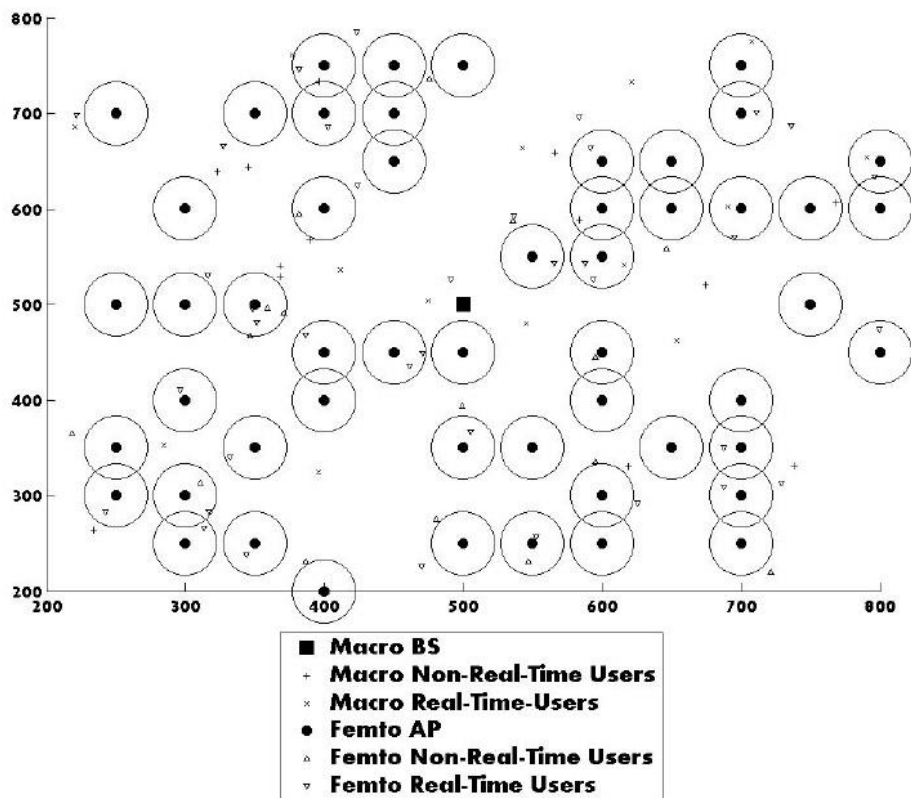
### **3.2. Συμβολή & Καινοτομία**

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής εξετάζεται το πρόβλημα της επιλογής κυψέλης εξυπηρέτησης συνδυαστικά με το πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής στην άνω ζεύξη ενός διεπίπεδου δικτύου [TKF14]. Από τη μοντελοποίηση του συνδυαστικού προβλήματος προκύπτει ότι το πρόβλημα επιλογής κυψέλης εξυπηρέτησης δεν εξαρτάται από τις επιλογές κυψέλης των υπολοίπων χρηστών, δεδομένων των ισχύων εκπομπής τους αλλά από τις θέσεις των χρηστών εντός της περιοχής κάλυψης του διεπίπεδου δικτύου. Επομένως οι χρήστες έχοντας ως δεδομένο τις επιλογές ισχύος εκπομπής, επιλέγουν μεταξύ των διαθέσιμων κυψελών εξυπηρέτησης εκείνη που τους προσφέρει τη μεγαλύτερη χρησιμότητα (με όρους συναρτήσεων χρησιμότητας: εκεί όπου μεγιστοποιείται η συνάρτηση χρησιμότητάς τους).

Επίσης στο δίκτυο αυτό προσφέρεται η δυνατότητα παροχής υπηρεσιών τόσο πραγματικού όσο και μη πραγματικού χρόνου και μοντελοποιείται ένα παίγνιο συνδυαστικής επιλογής κυψέλης εξυπηρέτησης αλλά και ισχύος εκπομπής για το οποίο αποδεικνύεται η ύπαρξη ενός συνόλου από ΣΙ Nash χρησιμοποιώντας μαθηματικά εργαλεία από τη θεωρία υπεραρθρωτών παιγνίων [Top98]. Τέλος προτείνεται ένας καταναμημένος αλγόριθμος που συγκλίνει στο Pareto βέλτιστο διάνυσμα επιλογών κυψέλης εξυπηρέτησης και ισχύος εκπομπής για όλους τους χρήστες του δικτύου.

### 3.3. Μοντέλο Συστήματος

Θεωρούμε ένα ασύρματο κυψελωτό δίκτυο δύο επιπέδων το οποίο αποτελείται από μια κεντρική μάκρο-κυψέλη  $B_0$  η οποία εξυπηρετεί μια περιοχή  $R$ , έχει ακτίνα κάλυψης  $R_0$  και διαθέτει πολλαπλές φεμτοκυψέλες  $B_j$  ( $j=1,2,\dots,F$ ) οι οποίες βρίσκονται εντός της περιοχής κάλυψης της κεντρικής μακροκυψέλης και χρησιμοποιούν κοινή ζώνη συχνοτήτων.



Εικόνα 3.2 Τοπολογία του διεπίπεδου δικτύου

Καθεμία φεμτοκυψέλη καλύπτει μια υποπεριοχή  $C$  της περιοχής κάλυψης  $R$  κι έχει ακτίνα κάλυψης  $R_c \ll R_0$ . Στο προτεινόμενο μοντέλο θεωρούμε φεμτοκυψέλες ανοικτής πρόσβασης

όπου δηλ. είναι ελεύθερο σε όλους τους χρήστες να έχουν πρόσβαση σε κάθε κυψέλη εφόσον οι συνθήκες του καναλιού τους αλλά και οι υπάρχουσες παρεμβολές το επιτρέπουν. Κατά συνέπεια είναι απαραίτητος ένας μηχανισμός επιλογής κυψέλης εξυπηρέτησης που διασφαλίζει την εξισορρόπηση φορτίου μεταξύ των κυψελών αλλά και την εξασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας μεταξύ των χρηστών.

Σε κάθε χρονοσχιμή θεωρούμε ότι υπάρχουν  $M(t)$  χρήστες οι οποίοι αποτελούνται από  $M_{MRT}(t)$  και  $M_{MNRT}(t)$  μακροχρήστες,  $M_{FRT}(t)$  και  $M_{FNRT}(t)$  φεμτοχρήστες οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου αντίστοιχα. Στη συνέχεια παραλείπεται ο συμβολισμός του χρόνου για τα σύνολα των χρηστών για λόγους ευκολίας. Σε κάθε χρονοσχιμή ένας μηχανισμός επιλογής κυψέλης εξυπηρέτησης κι ισχύος εκπομπής είναι υπεύθυνος για την ανάθεση των χρηστών στις κυψέλες που θα τους εξυπηρετούν και των τιμών ισχύος που θα χρησιμοποιήσουν.

Θεωρούμε ότι ο χρήστης  $i \in M$  συνδέεται είτε στην κυψέλη  $B_0$  είτε σε μια φεμτοκυψέλη  $B_j (j=1,2,\dots,F)$ , εκπέμπει με ισχύ  $P_i$  και το κέρδος του καναλιού του προς τον παραλήπτη  $i' \neq i$  είναι  $G_{i'}$  και  $\sigma^2$  είναι η μέση τιμή του θερμικού θορύβου σε κάθε κυψέλη. Έτσι ο λόγος ενέργειας bit προς τη φασματική πυκνότητα του θορύβου του χρήστη  $i$  στην κυψέλη  $B_j$  δίνεται από τον τύπο

$$\gamma_i = \frac{WG_{ib(i)}P_i}{R\left(\sigma^2 + \sum_{i' \neq i} G_{i'b(i)}P_{i'}\right)} \quad (3.1)$$

όπου  $W [Hz]$  είναι το διαθέσιμο εύρος ζώνης διασποράς και  $R$  ο ρυθμός των μεταδιδόμενων bits και  $b(i)$  είναι η επιλογή κυψέλης εξυπηρέτησης του χρήστη  $i$ . Να σημειώσουμε ότι θεωρήσαμε ότι όλες οι κυψέλες επικοινωνούν με τους χρήστες μέσω της τεχνολογίας W-CDMA για την πρόσβαση στο ασύρματο μέσο.

Επίσης κάθε χρήστης διαθέτει μια συνάρτηση χρησιμότητας η οποία απεικονίζει την επιθυμία του να καταναλώσει πόρους του δικτύου αλλά και να συνδεθεί σε μια κυψέλη ικανοποιώντας την απαίτησή του για μια ελάχιστη τιμή λόγου ενέργειας bit προς τη φασματική πυκνότητα του θορύβου. Η συνάρτηση χρησιμότητας εξαρτάται από το επίπεδο του λόγου ενέργειας bit προς τη φασματική πυκνότητα του θορύβου στην κυψέλη που τον εξυπηρετεί (μάκρο –ή φεμτο-) καθώς και από το είδος της υπηρεσίας που αιτείται. Συγκεντρωτικά, οι συναρτήσεις χρησιμότητας όλων των χρηστών του δικτύου ορίζονται παρακάτω:

$$U_i(B_{ij}, P_i, P_{-i}) = \begin{cases} \frac{R_F f(\gamma_i)}{P_i}, & i \in M_{MRT}, M_{FRT} \\ \frac{\log(1 + D \cdot f(\gamma_i))}{P_i}, & i \in M_{MNRT}, M_{FNRT} \end{cases} \quad (3.2)$$

για όλες τις πιθανές κυψέλες εξυπηρέτησης  $B_{ij} \in B_j (j=1, \dots, F)$  όπου  $R_{F,i}$ ,  $D_i$  είναι θετικές σταθερές και  $f(\gamma_i) = (1 - \exp(-A_i \gamma_i))^{M_i}$  όπου  $A_i$  και  $M_i$  είναι θετικές σταθερές που μεταβάλλονται από χρήστη σε χρήστη εκφράζοντας έτσι τις διαφορετικές επιθυμίες των χρηστών για διαφορετικούς τύπους υπηρεσίας. Επίσης οι χρήστες υπηρεσιών μη πραγματικού χρόνου διαθέτουν μια συνάρτηση χρησιμότητας ανάλογη με τον τύπο του Shannon χωρίς να υπάρχει κάποια ελάχιστη απαίτηση ως προς το λόγο ενέργειας bit προς τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου. Από την άλλη μεριά οι χρήστες υπηρεσιών πραγματικού χρόνου διαθέτουν μια σιγμοειδή συνάρτηση ως προς το λόγο ενέργειας bit προς τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου δείχνοντας ότι έχουν μια ελάχιστη απαίτηση ως προς το λόγο ενέργειας bit προς τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου, κι επομένως διαθέτουν μια απαίτηση ελάχιστου επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης στο δέκτη λόγω του τύπου του Shannon.

### 3.4. Παίγνιο Επιλογής Κυψέλης Εξυπηρέτησης και Κατανομής Ισχύος Εκπομπής

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε το συνδυαστικό παίγνιο κατανομής ισχύος κι επιλογής κυψέλης εξυπηρέτησης. Το συνδυαστικό παίγνιο αυτό μπορεί να αναλυθεί σε δύο υποπαίγνια, καθένα από τα οποία αφορά τα επί μέρους πεδία στρατηγικής των παιχτών δηλ. το σύνολο των κυψελών εξυπηρέτησης καθώς και το σύνολο των δυνατών τιμών ισχύος εκπομπής.

Σχετικά με το υπο-παίγνιο των κυψελών εξυπηρέτησης  $G^c = \{N, \{B_i\}_{i \in N}, \{U_i\}_{i \in N}\}$  όπου  $N$  το σύνολο των παιχτών,  $B_i$  το σύνολο των προσβάσιμων από το χρήστη  $i$  κυψελών εξυπηρέτησης και  $U_i$  είναι η συνάρτηση χρησιμότητας του χρήστη  $i$  όπως έχει οριστεί στη σχέση (3.2).

Για κάθε διάνυσμα επιλογής τιμών ισχύος εκπομπής υπάρχει μια αυστηρά επικρατούσα στρατηγική του παιγνίου  $G^c$ . Αυτό φαίνεται από απλή επισκόπηση της σχέσης (3.2) καθώς οι επιλογές στρατηγικής (κυψελών) των υπολοίπων χρηστών δεν επηρεάζουν τη συνάρτηση χρησιμότητας κάθε χρήστη  $i$ , άρα για δεδομένες θέσεις όλων των παιχτών του παιγνίου οι λαμβανόμενες παρεμβολές σε κάθε κυψέλη δε μεταβάλλονται από την επιλογή κυψέλης εξυπηρέτησης κάθε χρήστη  $i$ . Κατά συνέπεια για δεδομένο διάνυσμα επιλογών τιμών ισχύος εκπομπής η συνάρτηση χρησιμότητας κάθε χρήστη  $i$  εξαρτάται μόνο από το κέρδος του καναλιού του χρήστη  $i$  προς την εκάστοτε κυψέλη εξυπηρέτησης. Οπότε αν κάθε χρήστης

επιλέξει την κυψέλη εξυπηρέτησης με το καλύτερο δυνατό κανάλι (γεγονός το οποίο εξαρτάται μόνο από τη σχετική θέση-απόσταση του χρήστη  $i$  με την εκάστοτε κυψέλη εξυπηρέτησης) αλλά και αυτή που υφίσταται τις λιγότερες παρεμβολές τότε το σχηματιζόμενο διάνυσμα επιλογών στρατηγικής αποτελεί ένα αυστηρά επικρατούν διάνυσμα επιλογών στρατηγικής.

Με δεδομένο ότι σε πρώτη φάση κάθε χρήστης έχει επιλέξει την καλύτερη δυνατή κυψέλη εξυπηρέτησης του, τότε εισέρχεται σε ένα δεύτερο υποπαίγνιο  $G^P = \{N, \{A_i\}_{i \in N}, \{U_i\}_{i \in N}\}$  όπου  $N$  το σύνολο των παιχτών,  $A_i = [0, P_i^{\max}]$  και  $U_i$  δίνεται από τη σχέση (3.2).

Το παίγνιο  $G^P$  όπως έχει αποδειχθεί στην εργασία [TKV13] είναι υπεραρθρωτό με συνέπεια να έχει τις επιθυμητές ιδιότητες της ύπαρξης ενός συνόλου από ΣΙ Nash και της ύπαρξης ενός καταναμημένου αλγορίθμου σύγκλισης στο βέλτιστο κατά Pareto ΣΙ Nash. Τέλος όπως έχει αναλυθεί στην εργασία [TKV13] οι χρήστες μέσω των σταθερών  $M_i$  και  $A_i$  είναι σε θέση να ορίζουν τα ελάχιστα επιθυμητά επίπεδα λόγου ενέργειας bit προς τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου στο δέκτη τους. Συγκεκριμένα προκειμένου το παίγνιο  $G^P$  να είναι υπεραρθρωτό, το πεδίο επιλογών στρατηγικής κάθε χρήστη τροποποιείται έτσι ώστε  $\gamma_i \geq \frac{\ln M_i}{A_i}$ .

### 3.5. Αλγόριθμος Υπολογισμού ΣΙ Nash για το Συνδυαστικό Παίγνιο Επιλογής Κυψέλης κι Ισχύος Εκπομπής

Στην ενότητα αυτή προτείνεται ένας καταναμημένος αλγόριθμος ο οποίος συγκλίνει στο Pareto βέλτιστο διάνυσμα επιλογής κυψέλης εξυπηρέτησης και ισχύος εκπομπής. Επίσης μέσω του θεωρητικού πλαισίου των προηγούμενων υποενοτήτων οι χρήστες είναι σε θέση μέσω των σταθερών  $A_i$  και  $M_i$  να εκφράζουν τις διαφοροποιημένες προτιμήσεις τους ως προς το ελάχιστο επιθυμητό επίπεδο λόγου ενέργειας bit προς τη φασματική πυκνότητα του θορύβου στο δέκτη τους και κατά συνέπεια να απολαμβάνουν διαφορετικά επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο εν λόγω αλγόριθμος:

#### Αλγόριθμος υπολογισμού ΣΙ Nash

**Βήμα 1<sup>ο</sup>:** Όλοι οι χρήστες επιλέγουν μια αρχική τυχαία τιμή ισχύος εκπομπής  $p_i \in [0, P_i^{\max}]$ ,  $\forall i \in N$ . Έστω,  $P_i^{*(0)} = P_i \forall i \in N$ .

**Βήμα 2<sup>ο</sup>:** Στην αρχή κάθε χρονοσχιμής  $t$ , ο κάθε χρήστης  $i$  προχωρά σε μια εκτίμηση του κέρδους του καναλιού του προς κάθε δυνατή κυψέλη εξυπηρέτησης καθώς και του συνόλου των υφιστάμενων παρεμβολών σε κάθε κυψέλη εξυπηρέτησης. Υπολογίζει δηλ. όλες τις τιμές  $G_{ij}$

για κάθε  $j \in B_i$  καθώς και του συνόλου των παρεμβολών σε κάθε κυψέλη εξυπηρέτησης δηλ.

$$I_j(\bar{P}_{-i}) \text{ κι επιλέγει ως κυψέλη εξυπηρέτησης την } b(i) = \arg \max_{j \in B(i)} \frac{G_{ij}}{I_j(\bar{P}_{-i})}.$$

**Βήμα 3<sup>ο</sup>:** Δεδομένων των τιμών ισχύος εκπομπής των υπολοίπων χρηστών, κάθε κυψέλη εξυπηρέτησης κάθε χρήστη υπολογίζει το συνολικά λαμβανόμενο θόρυβο και τον αποστέλλει μέσω ευρυεκπομπής στους εξυπηρετούμενους χρήστες της.

**Βήμα 4<sup>ο</sup>:** Κάθε χρήστης υπολογίζει το θόρυβο που αντιλαμβάνεται εξαιτίας της εκπομπής των υπολοίπων χρηστών  $I_{-i}^{(k)}(\bar{P}_{-i}^{(k)})$  και επαναπροσδιορίζει την ισχύ εκπομπής του,  $P_i^{*(k+1)} = \underset{P_i \in [0, P_i^{\max}]}{\operatorname{argmax}} U_i(P_i, P_{-i})$  όπου η  $U_i(P_i, P_{-i})$  δίνεται από τη σχέση (3.2).

**Βήμα 5<sup>ο</sup>:** Εάν οι ισχύς εκπομπής όλων των χρηστών συγκλίνουν, δηλαδή  $|P_i^{*(k+1)} - P_i^{*(k)}| \leq \varepsilon$  όπου  $\varepsilon$  μια επαρκώς μικρή θετική σταθερά, τότε ο αλγόριθμός συνεχίζει στο Βήμα 6<sup>ο</sup>, διαφορετικά ο δείκτης επανάληψης του αλγορίθμου αυξάνεται κατά ένα και ο έλεγχος επιστρέφει στο βήμα 3<sup>ο</sup>.

**Βήμα 6<sup>ο</sup>:** Με βάση τις τιμές ισχύος εκπομπής του βήματος 5<sup>ο</sup> επαναυπολογίζονται οι βέλτιστες κυψέλες εξυπηρέτησης όπως στο βήμα 1<sup>ο</sup>. Εάν αυτές δεν αλλάξουν για όλους τους χρήστες τότε ο αλγόριθμος σταματά διαφορετικά ο έλεγχος επιστρέφει στο βήμα 3<sup>ο</sup>.

### 3.6. Ανακεφαλαιωτικά Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε μια ενδεικτική παιγνιοθεωρητική προσέγγιση για το συνδυαστικό πρόβλημα επιλογής κυψέλης και κατανομής ισχύος εκπομπής για την άνω ζεύξη ενός ασύρματου φεμτοκυψελωτού δικτύου. Το μοντέλο αυτό αντιστοιχεί σε κάθε χρήστη μια συνάρτηση χρησιμότητας η οποία διαφέρει ανάλογα με τον τύπο της υπηρεσίας που αιτείται και την κυψέλη από την οποία εξυπηρετείται. Το μοντέλο αυτό αφορά ένα ασύρματο κυψελωτό δίκτυο στο οποίο η πρόσβαση στο ασύρματο μέσο γίνεται μέσω της τεχνολογίας W-CDMA. Για το πρόβλημα αυτό αποδεικνύεται η ύπαρξη ενός Pareto βέλτιστου ΣΙ Nash μέσω της θεωρίας των υπεραρθρωτών παιγνίων. Τέλος σχεδιάστηκε ένας καταναεμημένος αλγόριθμος ο οποίος υπολογίζει το εν λόγω ΣΙ Nash.

Στη συνέχεια η μελέτη επικεντρώνεται σε προβλήματα κατανομής πόρων που αντιμετωπίζουν ασύρματα κυψελωτά δίκτυα με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας.

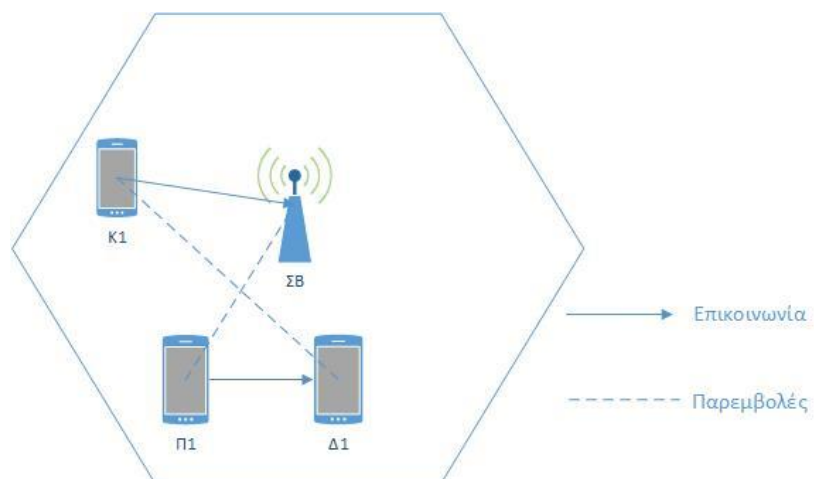




# 4. Ανάθεση Πόρων σε Ασύρματα Κυψελωτά Δίκτυα με Υποστήριξη Άμεσης Επικοινωνίας των Χρηστών (overlay)

## 4.1. Εισαγωγή

Η υποστήριξη της απευθείας επικοινωνίας μεταξύ των χρηστών ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου έχει πρόσφατα προταθεί από την αρμόδια ομάδα εργασίας του 3GPP [TS 36.211] ως ένα επιπλέον χαρακτηριστικό της λειτουργίας του κυψελωτού δικτύου. Η άμεση επικοινωνία μεταξύ των χρηστών ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου αφορά την απευθείας επικοινωνία μεταξύ δύο κινητών τερματικών χωρίς τη διαμεσολάβηση του ΣΒ.



Εικόνα 4.1 Αρχιτεκτονική ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας

Η υποστήριξη της άμεσης επικοινωνίας σε ένα ασύρματο κυψελωτό δίκτυο βελτιώνει την επίδοση του δικτύου και επιφέρει σημαντικά οφέλη για το δίκτυο (εξοικονόμηση φάσματος, ενέργειας, επίτευξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης και μείωση των καθυστερήσεων). Επίσης ανοίγει το δρόμο για την επιτυχή υποστήριξη πολλαπλών σεναρίων χρήσης του δικτύου εκμεταλλευόμενοι τη χωρική εγγύτητα μεταξύ των συνδεδεμένων συσκευών. Τέλος, παρέχει τη δυνατότητα αποτελεσματικότερης διαχείρισης των πόρων του δικτύου συγκρινόμενη με την περίπτωση του παραδοσιακού ασύρματου κυψελωτού δικτύου επικοινωνιών.

## 4.2. Σχετική Βιβλιογραφία

Σε ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί κανείς να διακρίνει τους χρήστες σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη από αυτές αποτελείται από τους χρήστες που έχουν ταυτόχρονα τη δυνατότητα άμεσης και ενδιάμεσης (μέσω του ΣΒ) επικοινωνίας. Η δεύτερη κατηγορία αφορά στους χρήστες που έχουν δυνατότητα επικοινωνίας αποκλειστικά μέσω του ΣΒ. Σε αυτήν την περίπτωση ο ΣΒ καλείται να αποφασίσει το πλήθος των διαθέσιμων πόρων για κάθε είδους επικοινωνία (αξιολόγηση χωρητικότητας) καθώς και την πολιτική ανάθεσης πόρων που θα εφαρμόσει στο δίκτυο [FDM12], [LZL12].

Οι σχεδιαστές ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας ακολουθούν διάφορες πολιτικές σχετικά με τη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου. Οι σχετικές προτάσεις που έχουν γίνει στη βιβλιογραφία αφορούν τρία διαφορετικά σενάρια διαχείρισης πόρων σε ένα ασύρματο κυψελωτό δίκτυο με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας [AWM14], [LAG14]. Το πρώτο αφορά την εκτός ζώνης συχνοτήτων (out of band) κυψελωτών επικοινωνιών χρήση πόρων για άμεση επικοινωνία των κινητών χρηστών. Το δεύτερο αφορά την εντός ζώνης συχνοτήτων (inband) χρήση πόρων κι αυτή μπορεί να διαχωριστεί σε δύο διαφορετικές υπο-περιπτώσεις. Στην πρώτη οι χρήστες άμεσης επικοινωνίας μοιράζονται κοινές ομάδες πόρων με τους χρήστες κυψελωτής επικοινωνίας (underlay) και στη δεύτερη οι διαθέσιμοι πόροι του δικτύου διακρίνονται σε αυτούς που θα χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την άμεση επικοινωνία των χρηστών και σε αυτούς που χρησιμοποιούνται για ενδιάμεση επικοινωνία μέσω του σταθμού βάσης (overlay) [AWM14], [LAG14].

Στην περίπτωση της από κοινού χρήσης πόρων μεταξύ χρηστών ενδιάμεσης κι άμεσης επικοινωνίας απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην διαχείριση των παρεμβολών μεταξύ αυτών των δύο τύπων επικοινωνίας έτσι ώστε να διασφαλιστεί η ποιότητα της επικοινωνίας και για τους δύο τύπους χρήσης πόρων με παράλληλη φυσικά την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη εξοικονόμηση φάσματος.

Σχετικές εργασίες στη βιβλιογραφία για την επιλογή τρόπου επικοινωνίας σε ένα τέτοιο δίκτυο είναι οι παρακάτω όπως [APH12], [DYR10], [LPX12] όπου οι συγγραφείς λαμβάνουν υπόψιν τις παρεμβολές που υπάρχουν σε κάθε διαθέσιμο κανάλι μετάδοσης με στόχο την επίτευξη όσο το δυνατόν υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης με τη χαμηλότερη δυνατή κατανάλωση ισχύος και με παράλληλη υποστήριξη/ικανοποίηση της ποιότητας όλων των τύπων ζεύξεων τόσο της συμβατικής - κυψελωτής αλλά και της άμεσης επικοινωνίας. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι στις παραπάνω εργασίες δεν αντιμετωπίζονται θέματα διαθεσιμότητας των ίδιων των καναλιών μετάδοσης.

Στην περίπτωση (overlay) δεν υφίστανται παρεμβολές μεταξύ των χρησιμοποιούμενων καναλιών και το ενδιαφέρον του σχεδιαστή του δικτύου στρέφεται στην εκ των προτέρων δυναμική εκτίμηση του ποσοστού των πόρων που θα διαθέσει για την ενδιάμεση μέσω του ΣΒ αλλά και κατ' επέκταση για την άμεση επικοινωνία [LAG14]. Στην εργασία αυτή γίνεται εκτίμηση του ποσοστού αυτού με στόχο τη μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης των χρηστών κι εδώ επίσης αγνοούνται θέματα διαθεσιμότητας των χρησιμοποιούμενων καναλιών μετάδοσης.

### **4.3. Συμβολή και Καινοτομία**

Σε ένα τέτοιο δίκτυο όπως προαναφέρθηκε, ο ΣΒ είναι σε θέση να ελέγχει την ανάθεση πόρων αλλά και τρόπου επικοινωνίας στους χρήστες που ζητούν εξυπηρέτηση. Για αυτό το λόγο ο ΣΒ θα πρέπει να είναι σε θέση να εκτιμήσει με δυναμικό τρόπο την ανάγκη για την κατανάλωση πόρων του δικτύου τόσο για την ενδιάμεση όσο και την άμεση επικοινωνία των χρηστών [LAG14]. Εδώ θα πρέπει να σημειώσουμε ότι είναι προς όφελος του δικτύου να ενισχύει την άμεση επικοινωνία εφόσον είναι αυτή δυνατή για τους λόγους που αναλύσαμε παραπάνω. Παρόλα αυτά, αυτό δεν θα πρέπει να γίνεται σε ένα τέτοιο βαθμό που να δημιουργεί πρόβλημα στους συμβατικούς χρήστες της ενδιάμεσης επικοινωνίας μέσω του ΣΒ. Για αυτό το λόγο είναι ενδιαφέρον να διερευνηθεί ακριβώς αυτό το κενό στη βιβλιογραφία σχετικά με την εκτίμηση-αξιολόγηση του ποσοστού των πόρων του δικτύου που θα διατίθενται για άμεση και του ποσοστού που θα διατίθεται για την κλασσική, ενδιάμεση κυψελωτή επικοινωνία.

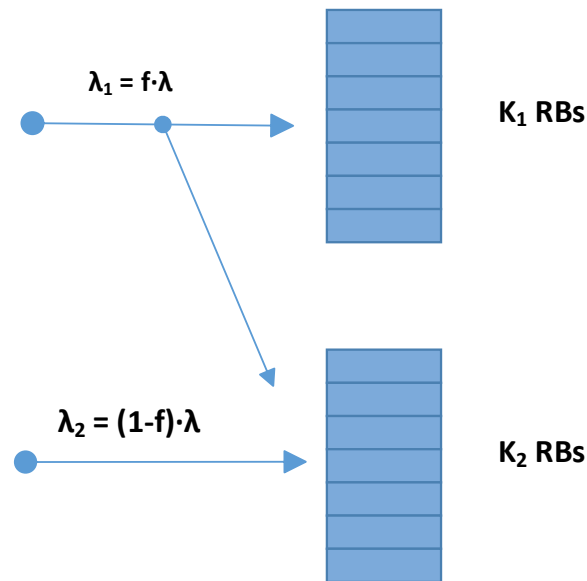
Σε αυτή την κατεύθυνση κάλυψης του κενού αυτού που υπάρχει στη βιβλιογραφία παρουσιάζεται ένα μοντέλο ουρών αναμονής [KTP15] το οποίο προσομοιώνει τη διαδικασία ανάθεσης πόρων κι επιλογής τρόπου επικοινωνίας από το σύστημα για τους χρήστες του δικτύου. Τέλος, το προτεινόμενο μοντέλο αυτό είναι σε θέση να προσδιορίζει με δυναμικό τρόπο το βέλτιστο ποσοστό από πόρους που θα προορίζεται για τους χρήστες άμεσης επικοινωνίας και κατά συνέπεια το αντίστοιχο ποσοστό από πόρους για τους χρήστες κυψελωτής επικοινωνίας.

### **4.4. Μοντέλο Συστήματος**

Θεωρούμε ένα ασύρματο κυψελωτό δίκτυο που υποστηρίζει την άμεση επικοινωνία μεταξύ των χρηστών. Έστω ότι οι διαθέσιμοι πόροι του δικτύου είναι  $N$ . Ένα ποσοστό από αυτούς προορίζεται για την άμεση επικοινωνία των χρηστών και το υπόλοιπο για την επικοινωνία μέσω του ΣΒ (ενδιάμεση). Τα αιτήματα των χρηστών για επικοινωνία μπορούν να διαχωρισθούν σε δύο κατηγορίες: σε αυτά που μπορούν να ικανοποιηθούν τόσο μέσω της ενδιάμεσης αλλά και της άμεσης επικοινωνίας μεταξύ των χρηστών (τύπος I) και σε αυτά που

αφορούν αποκλειστικά την ενδιάμεση επικοινωνία (τύπος II). Επίσης αρχικά υποθέτουμε ότι ένα ποσοστό των πόρων αφορά την άμεση επικοινωνία μεταξύ των χρηστών κι ένα ποσοστό την ενδιάμεση (έστω  $R_1$  και  $R_2$  αντίστοιχα). Αν ακόμη υποθέσουμε ότι οι χρήστες άμεσης επικοινωνίας μπορούν να επαναχρησιμοποιούν τους αντίστοιχους πόρους με ένα συντελεστή  $x$  εντός της κυψέλης εξυπηρέτησής τους τότε ο πραγματικός αριθμός πόρων του συστήματος γίνεται  $R_1 \cdot x + R_2 > N$ .

Υποθέτουμε ότι ο ρυθμός αφίξεων των αιτημάτων ακολουθεί κατανομή Poisson με μέσο ρυθμό  $\lambda$  και η αφικνούμενη κίνηση διαχωρίζεται με ένα συντελεστή διαχωρισμού  $f$ . Ο πρώτος τύπος κίνησης αφορά τα αιτήματα τύπου I κι αντίστοιχα ο δεύτερος τα αιτήματα τύπου II. Σχετικά με την εξυπηρέτηση του συστήματος θεωρούμε ότι αποτελείται από δύο εξυπηρετητές όπου ο πρώτος είναι υπεύθυνος για την ανάθεση πόρων άμεσης επικοινωνίας και ο δεύτερος για την ανάθεση πόρων ενδιάμεσης επικοινωνίας. Τέλος, θεωρούμε ότι οι χρόνοι εξυπηρέτησης είναι τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν εκθετική κατανομή με μέσο χρόνο εξυπηρέτησης  $1/\mu$ . Εποπτικά το περιγραφέν σύστημα φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



**Εικόνα 4.2 Μοντέλο εξυπηρέτησης αιτημάτων για επικοινωνία σε ένα ασύρματο κυψελωτό δίκτυο με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας.**

Η κατάσταση του συστήματος περιγράφηκε από ένα δισδιάστατο διάνυσμα στοχαστικών διαδικασιών  $\mathbf{X}(t) = (i(t), j(t))$  όπου καθεμία από αυτές συμβολίζει το πλήθος των κατειλημμένων πόρων (απευθείας κι ενδιάμεσης κυψελωτής επικοινωνίας). Το πεδίο τιμών αυτής της στοχαστικής διαδικασίας είναι το  $X = X^1 \times X^2$ , όπου  $X^1 = \{0, 1, \dots, K_1\}$  και  $X^2 = \{0, 1, \dots, K_2\}$ ,  $K_1$  είναι ο μέγιστος αριθμός διαθέσιμων πόρων τύπου I και  $K_2$  ο μέγιστος αριθμός διαθέσιμων πόρων τύπου II αντίστοιχα.

## 4.5. Διατύπωση Προβλήματος – Επιλογή Βέλτιστης Πολιτικής

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η κατάσταση του συστήματος κάθε χρονική στιγμή περιγράφεται από μια δισδιάστατη στοχαστική διαδικασία  $X(t) = (i(t), j(t))$ . Τα γεγονότα τα οποία μπορούν να συμβούν σε κάθε χρονική στιγμή στο παραπάνω σύστημα είναι η άφιξη ενός αιτήματος, η εξυπηρέτηση του αιτήματος ή τίποτα από τα δύο. Παρακάτω περιγράφονται όλες οι δυνατές μεταβάσεις του συστήματος ανάλογα με το κάθε πιθανό γεγονός που μπορεί να συμβεί κάθε φορά:

$$\begin{aligned}
 A_1 : (i, j) &= (i+1, j) \text{ if } i < K_1 \\
 A_1 : (i, j) &= (i, (j+1)^*) \text{ εάν } i = K_1 \\
 A_2 : (i, j) &= (i, (j+1)^*) \\
 D_1 : (i, j) &= ((i-1)^+, j) \\
 D_2 : (i, j) &= (i, (j-1)^+)
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

όπου  $n^+ = \max\{n, 0\}$  και  $m^* = \min\{m, K_2\}$ ,  $A_1, A_2$  συμβολίζουν αφίξεις αιτημάτων τύπου I ή τύπου II και  $D_1, D_2$  εξυπηρετήσεις από τους διαθέσιμους πόρους τύπου I ή τύπου II αντίστοιχα.

Με βάση το παραπάνω μοντέλο ο διαχειριστής του δικτύου έχει την ευελιξία να εφαρμόσει μια πολιτική στο δίκτυο κατά την οποία με βάση την κατάσταση του συστήματος και το γεγονός που συμβαίνει κάθε στιγμή είναι σε θέση να αποφασίζει αν θα αναθέσει ένα συγκεκριμένο είδος πόρου σε κάθε πιθανό αίτημα.

Η πολιτική αυτή μπορεί να εκφραστεί μέσω μιας στοχαστικής διαδικασίας  $z_t^i$  που συμβολίζει την πιθανότητα απόρριψης ενός αιτήματος τύπου  $i$  τη χρονική στιγμή  $t$ . Το παραπάνω σύστημα μπορεί να μετατραπεί από συνεχούς χρόνου σε ένα ισοδύναμο διακριτού χρόνου λαμβάνοντας δείγματα του συνεχούς σε τυχαίες χρονικές στιγμές. Θεωρούμε ότι στις χρονικές στιγμές που γίνεται η δειγματοληψία, είτε ένα νέο αίτημα θα λάβει χώρα, είτε κάποιο αίτημα θα εξυπηρετηθεί, είτε τίποτα από τα δύο. Έστω ότι η δειγματοληψία γίνεται τις χρονικές στιγμές  $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_k < \dots$  κι έτσι δημιουργείται μια αλυσίδα Markov  $X_k = X(t_k)$ , η οποία περιγράφει την κατάσταση του συστήματος κάθε χρονική στιγμή.

Στη συνέχεια φαίνεται παρακάτω ο πίνακας πιθανοτήτων των μεταβάσεων όπου  $\lambda_1 + \lambda_2 + (K_1 + K_2) \cdot \mu = 1$  και

$$\begin{aligned}
& P(X_{k+1}|X_k = (i, j), z_k) \\
& = \begin{cases} \lambda_1 & \text{if } X_{k+1} = A_1 X_k, z_k^1 = 0 \\ \lambda_1 & \text{if } X_{k+1} = X_k, z_k^1 = 1 \\ \lambda_2 & \text{if } X_{k+1} = A_2 X_k, z_k^2 = 0 \\ \lambda_2 & \text{if } X_{k+1} = X_k, z_k^2 = 1 \\ i\mu & \text{if } X_{k+1} = D_1 X_k \\ j\mu & \text{if } X_{k+1} = D_2 X_k \\ (K_1 + K_2)\mu - i\mu - j\mu & \text{if } X_{k+1} = X_k \end{cases} \quad (4.2)
\end{aligned}$$

όπου  $\lambda_1$  συμβολίζει την άφιξη ενός αιτήματος τύπου I,  $\lambda_2$  την άφιξη ενός αιτήματος τύπου II.

Αντίστοιχα κι η πολιτική ανάθεσης πόρων στο διακριτό πεδίο παίρνει τη μορφή  $z = (z_1, z_2, \dots, z_k, \dots)$  και  $z_k = (z_k^1, z_k^2)$ , όπου  $z_i^k = 0$  εάν συμβεί ένα οποιοδήποτε γεγονός εκτός από άφιξη ενός αιτήματος και  $z_i^k \in [0, 1]$  εάν πρόκειται για άφιξη αιτήματος.

Στόχος του σχεδιαστή του δικτύου είναι να μειώνει όσο το δυνατόν περισσότερο το ποσοστό των απορριφθέντων αιτημάτων σε ένα εύλογο βάθος χρόνου ανεξάρτητα από τον τύπο του αιτήματος. Το ποσοστό των απορριφθέντων αιτημάτων σε βάθος χρόνου εκφράζεται μαθηματικά από την πιθανότητα απόρριψης ενός αιτήματος και μπορεί να εκτιμηθεί με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$P_{l,g}(x) = \limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \cdot E_x^g \left[ \sum_{k=0}^{n-1} z_k^l \right], \quad x \in X \quad (4.3)$$

όπου  $l$  συμβολίζει τον τύπο του αιτήματος και  $g$  είναι η πολιτική ανάθεσης πόρων που ακολουθεί ο διαχειριστής του δικτύου.

Πιο συγκεκριμένα το πρόβλημα που καλείται να λύσει ο διαχειριστής του δικτύου είναι το εξής:

$$\begin{aligned}
(P) : \min \{ \max(P_{1,g}, P_{2,g}) \} \\
\forall g \in G \quad (4.4)
\end{aligned}$$

όπου  $G$  είναι το σύνολο όλων των δυνατών πολιτικών ανάθεσης πόρων από το δίκτυο.

Το παραπάνω πρόβλημα είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μιας μαρκοβιανής στοχαστικής διαδικασίας, η οποία αφορά τη διαδικασία ανάθεσης πόρων από το δίκτυο στα διάφορα αιτήματα των χρηστών. Στόχος της παραπάνω διαδικασίας είναι η ελαχιστοποίηση της μέγιστης τιμής των πιθανοτήτων απόρριψης τύπου I και II, παρέχοντας κατά κάποιο τρόπο δικαιοσύνη μεταξύ των δύο τύπων αιτημάτων.

Αποδεικνύεται ότι το παραπάνω πρόβλημα  $P$  [PTT94] έχει λύση η οποία ανήκει στο σύνολο των πολιτικών  $G$  τύπου κατωφλίου. Μια λύση τύπου κατωφλίου του παραπάνω προβλήματος  $P$  είναι μια πολιτική ανάθεσης πόρων τύπου κατωφλίου και μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

$$z_k^1 = \begin{cases} 0 & i < K_1 \\ 0 & i = K_1, j < T \\ 1 - q & i = K_1, j = T \\ 1 & i = K_1, j > T \end{cases} \quad (4.5)$$

για τα αιτήματα τύπου I, ενώ για τα αιτήματα τύπου II μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$z_k^2 = \begin{cases} 0 & j < K_2 \\ 1 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.6)$$

Χρησιμοποιώντας τεχνικές από τη θεωρία ουρών αναμονής και δυναμικού προγραμματισμού [PTT94] μπορούμε να αποδείξουμε ότι η βέλτιστη πολιτική ανάθεσης ομάδων πόρων περιγράφεται από τις δύο παραπάνω σχέσεις. Αυτό σημαίνει ότι οι χρήστες που έχουν τη δυνατότητα και ενδιάμεσης αλλά και άμεσης επικοινωνίας εξαντλούν πρώτα τους πόρους της άμεσης και στη συνέχεια στρέφονται προς τους πόρους της ενδιάμεσης επικοινωνίας. Επίσης υπάρχει ένα άνω κατώφλι  $T$  από πόρους ενδιάμεσης επικοινωνίας πέραν του οποίου οι πόροι ενδιάμεσης επικοινωνίας δε διατίθενται για τους χρήστες τύπου I.

#### 4.6. Εμπειρικός Υπολογισμός Κατωφλίου

Η βέλτιστη πολιτική ανάθεσης πόρων που προτάθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο απαιτεί τον προσδιορισμό των παραμέτρων  $T$  και  $q$  προκειμένου να εφαρμοστεί από το δίκτυο. Στο κεφάλαιο αυτό θα προτείνουμε έναν εμπειρικό επαναληπτικό αλγόριθμο που συγκλίνει στις απαιτούμενες επιθυμητές τιμές των παραμέτρων  $T$  και  $q$ .

Οι τιμές των παραμέτρων αυτών θα πρέπει να είναι τέτοιες που να εξισορροπούν την πιθανότητα απόρριψης ενός αιτήματος είτε είναι τύπου I είτε τύπου II. Για αυτό το λόγο στον υπολογισμό των παραμέτρων  $T$  και  $q$  παίζει καθοριστικό ρόλο η διαφορά μεταξύ των πιθανοτήτων απόρριψης των δύο τύπων αιτημάτων. Ο υπολογισμός της πιθανότητας απόρριψης βασίζεται σε προηγούμενα στατιστικά δεδομένα του δικτύου.

Πιο συγκεκριμένα ο επαναληπτικός εμπειρικός αλγόριθμος αυτός φαίνεται παρακάτω:

$$\begin{aligned} h_{n+1} &= I[h_n + b_n] \\ T_{n+1} &= \lfloor h_{n+1} \rfloor \\ q_{n+1} &= h_{n+1} - \lfloor h_{n+1} \rfloor \end{aligned} \quad (4.7)$$

όπου  $h_n = T_n + q_n$  και  $T_n \in [0, K_2]$ ,  $q_n \in [0, 1]$  και

$$I[x] = \begin{cases} x & \text{if } 0 \leq x \leq K_2 \\ 0 & \text{if } x < 0 \\ K_2 & \text{if } x > K_2 \end{cases} \quad (4.8)$$

Η παράμετρος  $b_n$  εκφράζει την απαραίτητη μεταβολή στην παράμετρο  $h_n$  έτσι ώστε να εξισορροπείται η διαφορά στις δύο πιθανότητες απόρριψης. Οι πιθανότητες απόρριψης εκτιμώνται από προηγούμενα στατιστικά δεδομένα του δικτύου κι αναθεωρούνται οι τιμές τους ανά συγκεκριμένες χρονικές περιόδους. Η επιλογή της χρονικής περιόδου αυτής είναι κρίσιμης σημασίας για την επιτυχή προσαρμογή των παραμέτρων  $T$  και  $q$  στις ξαφνικές αλλαγές στην προσφερόμενη κίνηση από τους χρήστες.

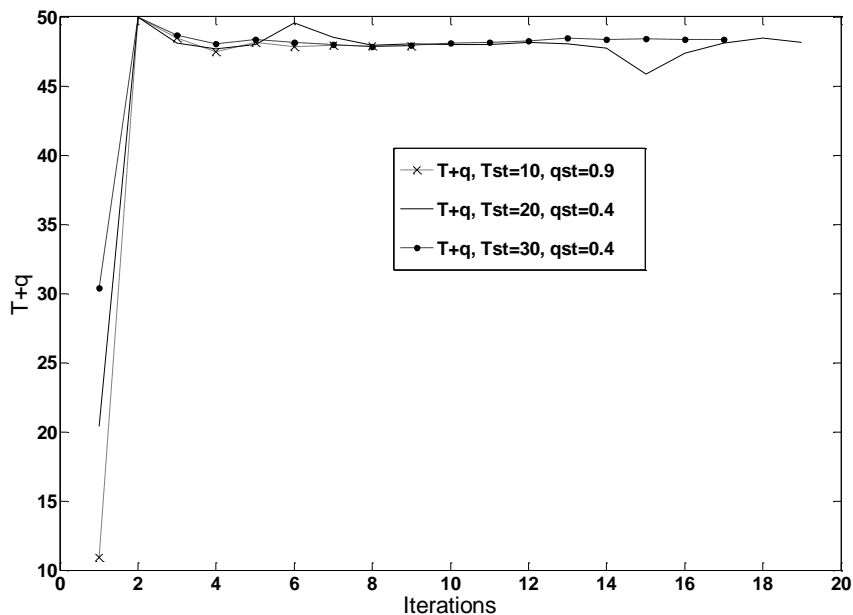
Μια επιλογή για την παράμετρο  $b_n$  που μπορεί να εξισορροπεί τις δυο πιθανότητες απόρριψης είναι της παρακάτω μορφής:  $b_n = a(P_1^n - P_2^n)$  όπου  $a \in \mathbb{R}$  είναι μια σταθερά. Το πρόσημο της διαφοράς των δύο πιθανοτήτων δείχνει αν θα πρέπει να αυξηθούν ή να μειωθούν οι σταθερές  $T$  και  $q$ . Στη συνέχεια κρίθηκε σκόπιμο να επιλεγεί η σταθερά  $a$  ως μια κατά κάποιο τρόπο εκτίμηση της παραγώγου του αθροίσματος των παραμέτρων  $T$  και  $q$  ως προς τη μεταβολή της διαφοράς των πιθανοτήτων απόρριψης των δύο διαφορετικών αιτημάτων εξυπηρέτησης.

$$b_n = \frac{\Delta_{T,q}^n}{|(P_1^n - P_2^n) - (P_1^{n-1} - P_2^{n-1})|} (P_1^n - P_2^n) \quad (4.9)$$

όπου  $\Delta_{T,q}^n = |(T_n + q_n) - (T_{n-1} + q_{n-1})|$ .

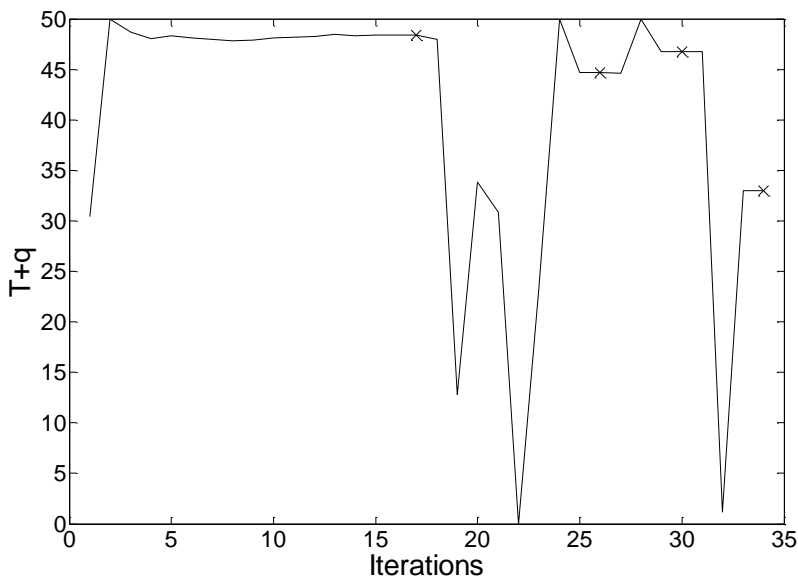
Στη συνέχεια παρατίθενται αριθμητικά αποτελέσματα που επιβεβαιώνουν τη σύγκλιση του επαναληπτικού αλγορίθμου υπό διαφορετικές αρχικές τιμές των παραμέτρων και διαφορετικές τιμές φορτίου κίνησης.





Εικόνα 4.3 Σύγκλιση του αλγορίθμου υπό διαφορετικές αρχικές τιμές των παραμέτρων.

Στην Εικόνα 5 παρατηρούμε τη σύγκλιση του παραπάνω επαναληπτικού αλγορίθμου για διαφορετικές αρχικές τιμές των παραμέτρων  $T$  και  $q$ , σε ένα σενάριο λειτουργίας του δικτύου με 50 πόρους τύπου I, 50 πόρους τύπου II, μέσο ρυθμό άφιξης αιτημάτων 80 αιτήματα ανά μονάδα χρόνου και συντελεστή διαχωρισμού  $f = 0,6$ .

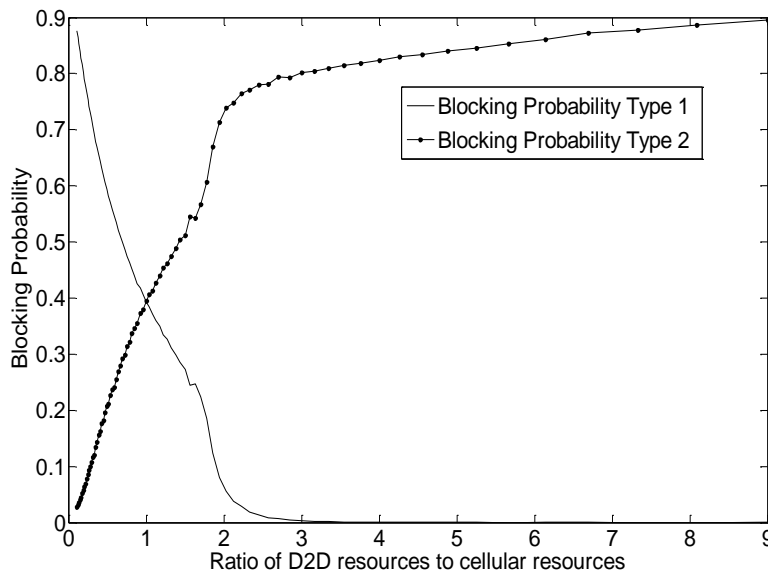


Εικόνα 4.4 Σύγκλιση του αλγορίθμου υπό διαφορετικές τιμές φορτίου κίνησης.

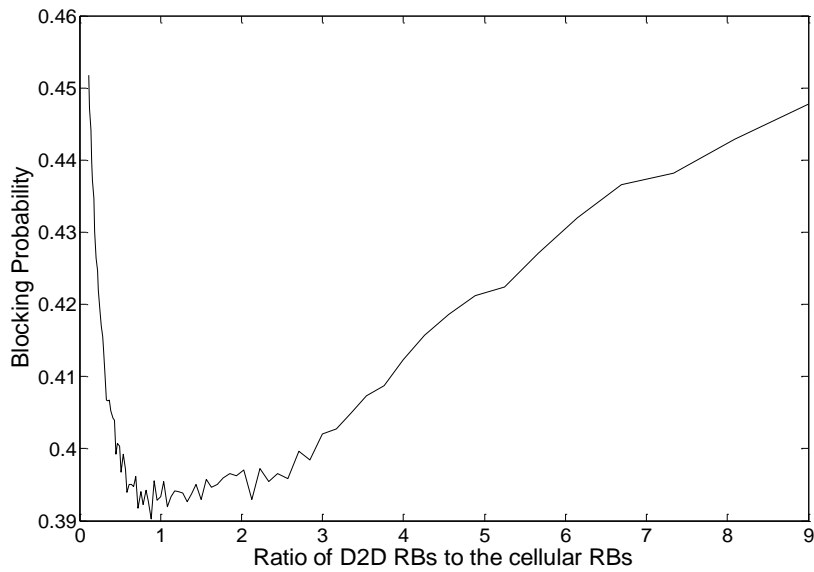
Στην Εικόνα 4.4 σημειώνονται οι χρονικές στιγμές στις οποίες το φορτίο της προσφερόμενης κίνησης αλλάζει και συγκεκριμένα παίρνει τις τιμές 80, 50, 70 και 30 αιτήματα ανά χρονική μονάδα σε ένα δίκτυο με 50 ομάδες πόρων τύπου I και 50 ομάδες πόρων τύπου II.

## 4.7. Αριθμητικά Αποτελέσματα

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζουμε αριθμητικά αποτελέσματα του προτεινόμενου μοντέλου. Πρώτα αξιολογούμε την επίδοση του συστήματος ως προς την πιθανότητα απόρριψης ενός αιτήματος είτε αυτό είναι τύπου I είτε τύπου II. Θεωρούμε ότι στο σύστημα είναι διαθέσιμος ένας σταθερός αριθμός από ομάδες πόρων ο οποίος μπορεί να διαχωριστεί με δυναμικό τρόπο σε πόρους που προορίζονται για απευθείας αλλά και για κυψελωτή (ενδιάμεση) επικοινωνία.

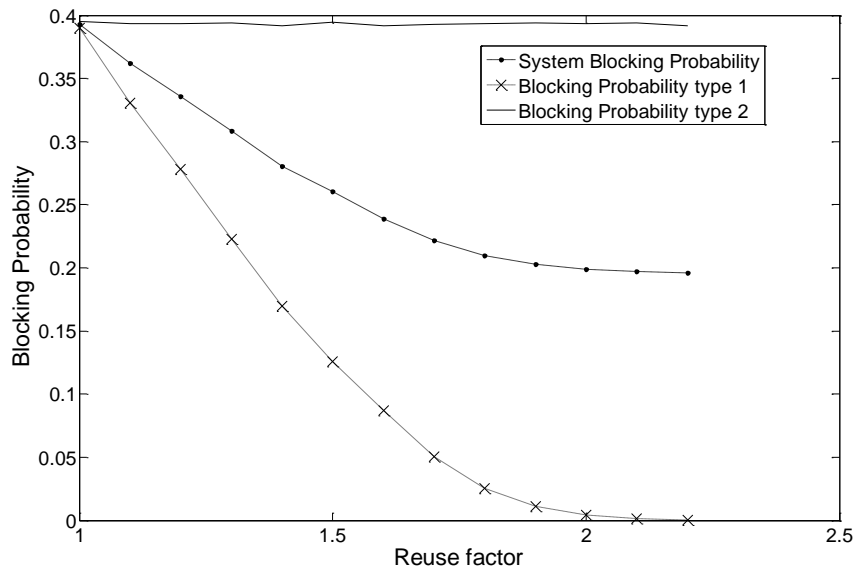


**Εικόνα 4.5** Πιθανότητα απόρριψης ενός αιτήματος σε σχέση με το λόγο των πόρων άμεσης προς κυψελωτής επικοινωνίας.



**Εικόνα 4.6 - Πιθανότητα απόρριψης συστήματος σε σχέση με το λόγο των πόρων άμεσης προς κυψελωτής επικοινωνίας.**

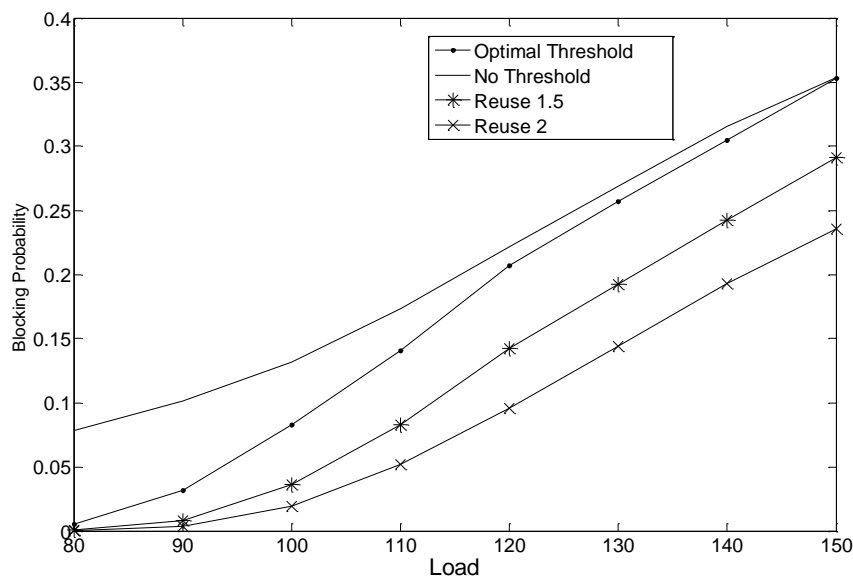
Μέσω των επόμενων γραφημάτων επιβεβαιώνονται πειραματικά τα οφέλη από την επαναχρησιμοποίηση των πόρων άμεσης επικοινωνίας ως προς την πιθανότητα απόρριψης.



**Εικόνα 4.7 - Πιθανότητα απόρριψης σε σχέση με το βαθμό επαναχρησιμοποίησης πόρων άμεσης επικοινωνίας.**

Τέλος, παρουσιάζονται συγκριτικά αριθμητικά αποτελέσματα ως προς την πιθανότητα απόρριψης του συστήματος σε σχέση με την προσφερόμενη στο σύστημα κίνηση. Παρατηρείται ότι τα συγκριτικά καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται κάνοντας χρήση της προτεινόμενης βέλτιστης πολιτικής ανάθεσης πόρων από το σύστημα και ταυτόχρονα

επιβεβαιώνονται για άλλη μια φορά τα συγκριτικά πλεονεκτήματα της επαναχρησιμοποίησης πόρων για απευθείας επικοινωνία.



Εικόνα 4.8 - Πιθανότητα απόρριψης από το σύστημα σε σχέση με την προσφερόμενη κίνηση.

#### 4.8. Ανακεφαλαιωτικά Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε ένα μοντέλο ουρών αναμονής με το οποίο προσομοιώνεται η διαδικασία ανάθεσης ομάδων πόρων σε ένα ασύρματο κυψελωτό δίκτυο με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας. Στο δίκτυο αυτό γίνεται η υπόθεση ότι οι χρήστες κυψελωτής κι άμεσης επικοινωνίας δε μοιράζονται ταυτόχρονα κοινές ομάδες πόρων (overlay). Επίσης γίνεται η υπόθεση ότι οι χρήστες άμεσης επικοινωνίας μπορούν να χρησιμοποιήσουν τόσο μια ομάδα πόρων που προορίζεται αμιγώς για αυτούς όσο και μια ομάδα πόρων που προορίζεται για χρήστες κυψελωτής επικοινωνίας.

Με αυτόν τον τρόπο ο ΣΒ είναι σε θέση να προσδιορίζει με δυναμικό τρόπο βασισόμενος στην τρέχουσα κίνηση του δικτύου τη βέλτιστη ανάθεση ομάδων πόρων άμεσης και κυψελωτής επικοινωνίας. Στόχος του σχεδιαστή είναι η ελαχιστοποίηση της πιθανότητας απόρριψης ενός αιτήματος για επικοινωνία είτε αυτό προέρχεται από ένα χρήστη άμεσης είτε από ένα χρήστη κυψελωτής επικοινωνίας. Επίσης στόχος του σχεδιαστή αποτελεί η αντιμετώπιση με δίκαιο τρόπο και για τις δύο κατηγορίες χρηστών που εμφανίζονται στο δίκτυο. Τέλος με το μοντέλο αυτό είναι εθικτή η διαστασιολόγηση του δικτύου βασισόμενοι στην εκτίμηση της πιθανότητας απόρριψης ενός αιτήματος για επικοινωνία. Τα παραπάνω συμπεράσματα επιβεβαιώθηκαν μέσω της εκτέλεσης σχετικών αριθμητικών προσομοιώσεων.

## ***5. Έλεγχος Ισχύος Εκπομπής σε Ασύρματα Κυψελωτά Δίκτυα με Υποστήριξη Άμεσης Επικοινωνίας***

Η άμεση επικοινωνία μεταξύ των κινητών τερματικών είναι ένα μοντέλο αποκεντρωμένης επικοινωνίας στο οποίο κάθε κινητό τερματικό έχει τις ίδιες δυνατότητες και οι δύο χρήστες/κινητά τερματικά μπορούν να ξεκινήσουν μία συνεδρία επικοινωνίας. Σε αντίθεση με το κλασικό μοντέλο επικοινωνίας του χρήστη με το ΣΒ, στο οποίο ο χρήστης πραγματοποιεί μια αίτηση υπηρεσίας και ο ΣΒ ανταποκρίνεται στο αίτημα αυτό, το μοντέλο της άμεσης επικοινωνίας επιτρέπει σε κάθε χρήστη να λειτουργεί ταυτόχρονα τόσο ως πομπός όσο και ως δέκτης ενός άλλου κινητού τερματικού. Η υποστήριξη της άμεσης επικοινωνίας μεταξύ κινητών τερματικών σε ένα ασύρματο κυψελωτό δίκτυο επικοινωνιών έχει προδιαγραφεί από τη σχετική ομάδα εργασίας της 3GPP και έχει προταθεί ως ένας επιπλέον τρόπος επικοινωνίας μεταξύ των κινητών τερματικών στα ασύρματα κυψελωτά δίκτυα επόμενης γενιάς [TS 36.211].

Τα σύγχρονα ασύρματα κυψελωτά δίκτυα κατακλύζονται από ολοένα αυξανόμενη κίνηση δεδομένων, προκαλούμενη σε μεγάλο βαθμό από τον αυξανόμενο αριθμό συνδεδεμένων κινητών συσκευών [Cis14]. Στα ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς αναμένεται το πλήθος των συνδεδεμένων κινητών συσκευών να ανέλθει στα 50 δισεκατομμύρια, ενώ η αύξηση του όγκου της κίνησης μέσω των ασύρματων δικτύων αναμένεται να πολλαπλασιαστεί επί χίλια εντός της επόμενης δεκαετίας [Cis14]. Το γεγονός αυτό δημιουργεί έντονες προκλήσεις για τους σχεδιαστές του δικτύου οι οποίοι καλούνται να σχεδιάσουν και να υλοποιήσουν μηχανισμούς που θα αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά προβλήματα διαχείρισης πόρων (καναλιών, ρυθμού μετάδοσης, ισχύος εκπομπής κ.α.) που εμφανίζονται σε αυτά τα κυψελωτά δίκτυα ευρείας κλίμακας.

Ένα από τα κλασικά προβλήματα που αντιμετωπίζει ένα ασύρματο κυψελωτό δίκτυο το οποίο εντείνεται από την κατακόρυφη αύξηση των συνδεδεμένων συσκευών είναι η αποτελεσματική διαχείριση των παρεμβολών λόγω της από κοινού χρήσης ομάδων πόρων (καναλιών/χρονοσχισμών) του δικτύου. Μεταξύ άλλων, η άμεση επικοινωνία κινητών τερματικών συσκευών μπορεί να αποβεί χρήσιμη για την αντιμετώπιση του προβλήματος της αποτελεσματικής διαχείρισης των παρεμβολών σε ένα ασύρματο κυψελωτό δίκτυο. Σε ένα τέτοιο δίκτυο οι χρήστες που βρίσκονται στο όριο μεταξύ δύο ή περισσότερων γειτονικών

κυψελών αντιμετωπίζουν έντονα προβλήματα παρεμβολών. Σε αυτού του είδους τα σενάρια λειτουργίας του δικτύου η άμεση επικοινωνία μεταξύ δυο τέτοιων χρηστών μπορεί να μειώσει σημαντικά τα επίπεδα των καταγραφόμενων παρεμβολών και κατά συνέπεια να βελτιώσει σημαντικά την ποιότητα επικοινωνίας των συνδεδεμένων συσκευών.

### **5.1. Σχετική Βιβλιογραφία & Συμβολή**

Ένας από τους βασικούς τρόπους που γίνεται η διαχείριση των παρεμβολών σε ένα ασύρματο κυψελωτό δίκτυο είναι μέσω του ελέγχου ισχύος εκπομπής για τα κινητά τερματικά που μοιράζονται κοινές ομάδες πόρων (δηλ. κοινά σύνολα από υποφέρουσες σε κοινές χρονικές στιγμές). Στα δίκτυα αυτά συνυπάρχουν και μοιράζονται κοινές ομάδες πόρων χρήστες οι οποίοι επικοινωνούν όχι μόνο μέσω του ΣΒ, αλλά και απευθείας μεταξύ τους, εφόσον συγκεκριμένοι τεχνικοί λόγοι το επιτρέπουν (χωρική εγγύτητα, διαθεσιμότητα σχετικών ομάδων πόρων).

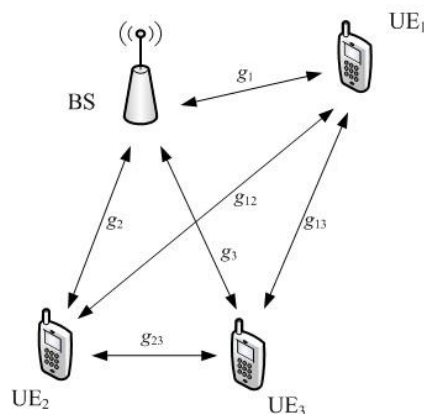
Αναφορικά με το πρόβλημα της διαχείρισης πόρων σε ένα τέτοιο δίκτυο, έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία δύο τρόποι διαμοιρασμού των πόρων (διαθέσιμων καναλιών) του δικτύου. Στο πρώτο σενάριο το δίκτυο έχει δεσμεύσει εκ των προτέρων συγκεκριμένο διακριτό αριθμό καναλιών τα οποία προορίζονται για την άμεση επικοινωνία των συσκευών και ένα άλλο διακριτό σύνολο από κανάλια για την επικοινωνία των συσκευών μέσω του ΣΒ. Στην πρώτη περίπτωση γίνεται η υπόθεση ότι μεταξύ διαφορετικών καναλιών οι παρεμβολές είναι μηδαμινές και κατά συνέπεια η υλοποίηση του ελέγχου ισχύος δε λαμβάνει υπόψιν τη λαμβανόμενη ισχύ από μεταδόσεις από διαφορετικά κανάλια. Στη δεύτερη περίπτωση το πρόβλημα των παρεμβολών είναι υπαρκτό κι εκεί χρειάζονται ειδικοί μηχανισμοί για την αντιμετώπιση του.

Σχετικές εργασίες της βιβλιογραφίας που έχουν αντιμετωπίσει το πρόβλημα του ελέγχου ισχύος σε ένα ασύρματο κυψελωτό δίκτυο με υποστήριξη της άμεσης επικοινωνίας μεταξύ των χρηστών είναι [YTD09a], [GBC11], [YTD09b]. Στην [YTD09a] ένας απλός αλγόριθμος ελέγχου ισχύος προτείνεται όπου οι χρήστες παίρνουν αποφάσεις βασιζόμενοι στα στατιστικά του καναλιού τους. Στην [GBC11] οι συγγραφείς προτείνουν ένα δυναμικό μηχανισμό κατανομής ισχύος όπου ρυθμίζουν την ισχύ των χρηστών άμεσης επικοινωνίας αποκλείοντας ορισμένους χρήστες από συγκεκριμένες περιοχές της κυψέλης όπου οι παρεμβολές ξεπερνούν κάποια μέγιστα όρια. Στην [YTD09b] οι συγγραφείς προτείνουν μια κεντρικοποιημένη προσέγγιση κατανομής ισχύος όπου ο ΣΒ προσπαθεί να μεγιστοποιήσει το συνολικό άθροισμα των ρυθμών μετάδοσης των χρηστών της κυψέλης. Στην εργασία αυτή μελετάται η περίπτωση ενός μόνο κυψελωτού κι ενός ζευγαριού από χρήστες άμεσης επικοινωνίας (δηλ. συσκευής προς συσκευή).

Αντίθετα η προσέγγιση που ακολουθείται στη διδακτορική διατριβή αυτή είναι καταναμημένη αξιοποιώντας βασικές αρχές κι εργαλεία από τη θεωρία παιγνίων. Η προσέγγιση αυτή αντιμετωπίζει αποτελεσματικά το πρόβλημα του ελέγχου ισχύος εκπομπής σε ένα ασύρματο κυψελωτό δίκτυο με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας μεταξύ των κινητών τερματικών στην οποία μια ομάδα πόρων του δικτύου μπορεί να χρησιμοποιείται ταυτόχρονα από χρήστες με διαφορετικούς τρόπους επικοινωνίας. Το πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής μοντελοποιείται ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο για το οποίο αποδεικνύεται η ύπαρξη ενός ΣΙ και προτείνεται ένας αλγόριθμος για τον καταναμημένο υπολογισμό του.

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε αναλυτικότερα την παιγνιοθεωρητική προσέγγιση που προτείναμε για τον έλεγχο ισχύος εκπομπής σε ένα δίκτυο που επιτρέπει την άμεση επικοινωνία μεταξύ των τερματικών και στο οποίο ένα κανάλι του δικτύου μπορεί να χρησιμοποιείται ταυτόχρονα από χρήστες με διαφορετικούς τρόπους επικοινωνίας [KTP14].

## 5.2. Μοντέλο Συστήματος



Εικόνα 5.1 Τοπολογία ενός ενδεικτικού δικτύου μιας κυψέλης με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας

Το εν λόγω μοντέλο αφορά την κατανομή ισχύος εκπομπής στην άνω ζεύξη ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου με υποστήριξη της άμεσης επικοινωνίας μεταξύ των κινητών τερματικών. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της ομάδας 3GPP για τα LTE-Advanced δίκτυα, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, οι πόροι του δικτύου οργανώνονται σε ομάδες πόρων (resource-blocks: RBs) [TS 36.211]. Κάθε ομάδα πόρων αποτελείται από ένα συγκεκριμένο αριθμό από κανάλια συχνοτήτων (δώδεκα υποφέρουσες) και χρονικών συμβόλων (6 ή 7 ανάλογα με το είδος του κυκλικού προθέματος). Τα έξι ή επτά αυτά χρονικά σύμβολα συγκροτούν μια χρονοσχισμή στο πεδίο του χρόνου. Ο ΣΒ είναι υπεύθυνος για την ανάθεση των πόρων του δικτύου στους χρήστες που αιτούνται είτε άμεση επικοινωνία, είτε ενδιάμεση/κυψελωτή (μέσω του ΣΒ).

Λόγω του πεπερασμένου αριθμού διαθέσιμων πόρων για το δίκτυο οι σχεδιαστές του δικτύου επιδιώκουν την επαναχρησιμοποίηση καναλιών μεταξύ χρηστών του δικτύου την ίδια χρονοσχισμή, εφόσον βέβαια συγκεκριμένα κριτήρια ποιότητας επικοινωνίας το επιτρέπουν. Για αυτό το λόγο η σχεδίαση κι η υλοποίηση ευφώνων μηχανισμών που χειρίζονται με συνετό τρόπο τους διαθέσιμους πόρους του δικτύου αλλά παράλληλα εξασφαλίζουν και συγκεκριμένα κριτήρια ποιότητας επικοινωνίας στους χρήστες κρίνεται επιβεβλημένη.

Στην κατεύθυνση αυτή προτάθηκε μια παιγνιοθεωρητική προσέγγιση για το πρόβλημα του ελέγχου ισχύος εκπομπής στην άνω ζεύξη ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου με υποστήριξη της άμεσης επικοινωνίας μεταξύ των κινητών συσκευών. Σε αυτό το παιγνιοθεωρητικό μοντέλο θεωρήθηκαν ως παίχτες του παιγνίου οι χρήστες του δικτύου που εκπέμπουν στην άνω ζεύξη και ως στρατηγικές των παιχτών αποτέλεσαν οι επιλογές ισχύος εκπομπής που διέθεταν. Τέλος, κάθε χρήστης του δικτύου ήταν εφοδιασμένος με μια συνάρτηση χρησιμότητας η οποία εκφράζει την επιθυμία του χρήστη για κατανάλωση ισχύος σε μια συγκεκριμένη μοιραζόμενη ομάδα πόρων.

Κρίσιμη σημασία στην επιτυχία του προτεινόμενου μοντέλου έχει ο σχεδιασμός μιας κατάλληλης συνάρτησης χρησιμότητας η οποία θα λαμβάνει υπόψιν τις ιδιαιτερότητες του κάθε χρήστη σχετικά με την επιθυμία του για επικοινωνία με συγκεκριμένο τρόπο σε δεδομένη ομάδα πόρων. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η έννοια μιας συνάρτησης χρησιμότητας η οποία απεικονίζει τις επιθυμίες του αποφασίζοντα χρήστη προέρχεται από το πεδίο των οικονομικών επιστημών αλλά η εφαρμογή της στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών έχει παρουσιασθεί σε αρκετές ερευνητικές εργασίες στο παρελθόν [MPS05], [SMG02].

Η συνάρτηση που προτάθηκε είναι η παρακάτω:

$$U_i(P_i) = R_{\max,i} \cdot f_i(\gamma_i) - c_i \cdot P_i \quad (5.1)$$

όπου  $R_{\max,i}$  είναι η μέγιστη επιθυμητή τιμή για το ρυθμό μετάδοσης του χρήστη  $i$ ,  $\gamma_i$  είναι η τιμή του σηματοθορυβικού λόγου, δηλαδή του λόγου του επιθυμητού λαμβανόμενου σήματος στο δέκτη προς το σύνολο των παρεμβολών που δέχεται στη συγκεκριμένη ομάδα πόρων, υπολογίζεται από τη σχέση (2.1) και  $c_i$  είναι ένας θετικός συντελεστής κοστολόγησης της ισχύος εκπομπής  $P_i$  του χρήστη  $i$ . Τέλος η  $f_i(\gamma_i)$  είναι μια συνάρτηση του χρήστη  $i$  που εκφράζει την πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης σε σχέση με ένα συγκεκριμένο επίπεδο τιμών για το λόγο  $\gamma_i$ . Η συνάρτηση αυτή είναι σε θέση να απεικονίζει τη διαφορετική επιρροή που ασκεί το χρησιμοποιούμενο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης στη σχέση μεταξύ σηματοθορυβικού λόγου στο δέκτη κι επιτυχούς μετάδοσης ενός bit.

Η συνάρτηση  $f_i(\gamma_i)$  είναι μια γνησίως αύξουσα συνεχής συνάρτηση του λόγου  $\gamma_i$  και λαμβάνει τιμές στο κλειστό διάστημα  $[0,1]$ . Έχουν προταθεί συγκεκριμένα παραδείγματα



συναρτήσεων στη βιβλιογραφία που απεικονίζουν με αποτελεσματικό τρόπο την επίπτωση της επιλογής του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης στην πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης του χρήστη [SMG02]. Οι ιδιότητες της συνάρτησης  $f_i(\gamma_i)$  έχουν περιγραφεί διεξοδικά στο υποκεφάλαιο 2.2.

Παρατηρώντας τη συνάρτηση  $U_i(P_i)$  βλέπουμε ότι αποτελείται από δύο όρους: ο πρώτος σχετίζεται με την επιθυμία του χρήστη για κατανάλωση ισχύος που θα του εξασφαλίζει ένα επιθυμητό επίπεδο ποιότητας επικοινωνίας και ένα δεύτερο όρο που αποτελεί έναν παράγοντα κοστολόγησης της εκπεμπόμενης ισχύος του κάθε χρήστη. Έτσι παρατηρούμε ότι κάθε χρήστης προσπαθεί με την κατάλληλη επιλογή ισχύος εκπομπής να συμβιβάσει την επιθυμία του για ένα καλύτερο επίπεδο σηματοθορυβικού λόγου από τη μια πλευρά κι από την άλλη την επιθυμία του για χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος εκπομπής.

Ο σηματοθορυβικός λόγος  $\gamma_i = \frac{g_{ii}P_i}{\sum_{j \neq i} g_{ji}P_j + \sigma^2}$  στο κεφάλαιο αυτό βασίζεται στον ορισμό

της σχέσης (2.1) στο κεφάλαιο 2.2 καθότι σύμφωνα με τις προδιαγραφές της [TS 36.211] το χρησιμοποιούμενο σχήμα πολλαπλής πρόσβασης στο ασύρματο μέσο είναι SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access). Παρατηρούμε από τη σχέση (5.1) αλλά και από τη σχέση (2.1) ότι η συνάρτηση χρησιμότητας κάθε χρήστη  $i$  εξαρτάται τόσο από την ισχύ εκπομπής του χρήστη  $i$  όσο κι από τις τιμές της ισχύος εκπομπής των υπολοίπων χρηστών που χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι. Αυτού του είδους την αλληλεπίδραση προσπαθεί να μοντελοποιήσει η προτεινόμενη παιγνιοθεωρητική προσέγγιση.

### 5.3. Μη Συνεργατικό Παίγνιο Κατανομής Ισχύος Εκπομπής

Λαμβάνοντας υπόψιν τα προηγούμενα, διατυπώθηκε ένα μη συνεργατικό παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής  $G$  για την άνω ζεύξη ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου επόμενης γενιάς με την υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας των χρηστών. Σε αυτό το παιγνιοθεωρητικό μοντέλο θεωρήθηκαν ως παίκτες του παιγνίου οι χρήστες του δικτύου που εκπέμπουν στην άνω ζεύξη και ως στρατηγικές των παιχτών αποτέλεσαν οι επιλογές ισχύος εκπομπής που έκαναν. Τέλος, κάθε χρήστης του δικτύου ήταν εφοδιασμένος με μια συνάρτηση χρησιμότητας όπως περιγράφηκε παραπάνω.

Σε μαθηματικούς όρους, το παίγνιο κατανομής ισχύος  $G$  ορίζεται ως  $G = [T, \mathbf{A}, \mathbf{U}]$  όπου  $T$  είναι το σύνολο των χρηστών,  $\mathbf{A} = [A_1, A_2, \dots, A_n]$  και  $A_i = [0, p_{\max,i}]$  είναι το σύνολο των στρατηγικών των χρηστών και  $\mathbf{U} = [U_1, U_2, \dots, U_n]$  είναι το σύνολο των συναρτήσεων

χρησιμότητας των χρηστών, όπου η συνάρτηση χρησιμότητας του χρήστη  $i$  έχει οριστεί παραπάνω στη σχέση(5.1).

### Λήμμα

Το παραπάνω παίγνιο  $G$  έχει ένα ΣΙ Nash στο σύνολο στρατηγικών  $A$  των παιχτών του.

### Απόδειξη

Προκειμένου να αποδείξουμε την ύπαρξη τουλάχιστον ενός ΣΙ Nash στο σύνολο στρατηγικών  $A$  θα κάνουμε χρήση του θεωρήματος ύπαρξης ΣΙ των Debreu et al. (βλ. κεφ. 2.1).

Τα σύνολα στρατηγικών  $A_i$  είναι κυρτά συμπαγή υποσύνολα του συνόλου των πραγματικών αριθμών, η συνάρτηση  $U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$  είναι συνεχής στο σύνολο στρατηγικών  $A$  και σχεδόν κοίλη στο σύνολο στρατηγικών  $A_i$  για κάθε χρήστη  $i$ .

Για το τελευταίο θα δείξουμε ότι η δεύτερη παράγωγος της συνάρτησης χρησιμότητας  $U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$  ακολουθεί ως προς το πρόσημο τη δεύτερη παράγωγο της συνάρτησης  $f_i(\gamma_i)$ .

$$\frac{\partial U_i(P_i)}{\partial P_i} = R_{\max,i} \frac{\partial f_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} \frac{\gamma_i}{P_i} - c_i \quad (5.2)$$

Έστω  $N(\gamma_i) = \frac{\partial f_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} \cdot \gamma_i$ . Τότε  $\frac{\partial N(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} = f_i''(\gamma_i) \cdot \gamma_i + f_i'(\gamma_i)$  (5.3). Επίσης ισχύει ότι

$$\frac{\partial \gamma_i}{\partial P_i} = \frac{\gamma_i}{P_i} \quad (5.4)$$

λόγω της γραμμικής σχέσης που συνδέει το σηματοθορυβικό λόγο όπως έχει

οριστεί στη σχέση (2.1) και την ισχύ εκπομπής του χρήστη  $i$ .

Επομένως λόγω της (5.3) και της (5.4) και της (5.2) έχουμε ότι

$$\frac{\partial^2 U_i(P_i)}{\partial P_i^2} = R_{\max,i} \frac{1}{P_i^2} f_i''(\gamma_i) \gamma_i \quad (5.5)$$

Άρα, εάν η  $f_i''(\gamma_i) \leq 0$  τότε και η  $U_i(P_i)$  είναι κοίλη κι άρα και σχεδόν κοίλη στο διάστημα ορισμού της  $A_i$ . Οπότε αποδείχθηκε και το ζητούμενο.▪

Για το εν λόγω παίγνιο αποδείχθηκε η ύπαρξη τουλάχιστον ενός ΣΙ εφόσον η συνάρτηση χρησιμότητας κάθε χρήστη έχει κοίλη καμπυλότητα σε όλο το πεδίο ορισμού της. Τέλος, αποδείχθηκε ότι αυτό μεταφράζεται σε μια αντίστοιχη επιθυμητή συμπεριφορά και για τη συνάρτηση  $f_i(\gamma_i)$  ως προς το λόγο  $\gamma_i$ .

## 5.4. Αλγόριθμος Υπολογισμού Σημείου Ισορροπίας Nash

Στη συνέχεια προτείναμε ένα καταναμημένο αλγόριθμο ο οποίος προσεγγιστικά υπολογίζει το επιθυμητό ΣΙ. Ο αλγόριθμος αυτός εκτελείται καταναμημένα σε κάθε χρήστη του δικτύου. Τα βήματα εκτέλεσης του αλγορίθμου παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

**Βήμα 1<sup>ο</sup>** Υποθέτουμε ένα αρχικό διάνυσμα τιμών ισχύος για όλους τους χρήστες του δικτύου. ( $P(0)=[p_1(0), p_2(0), \dots, p_n(0)]$ ).

**Βήμα 2<sup>ο</sup>** Κάθε χρήστης υπολογίζει μια νέα για αυτόν τιμή ισχύος εκπομπής, η οποία μεγιστοποιεί την τρέχουσα τιμή της συνάρτησης χρησιμότητάς του:  $p_i^* = \arg \max_{p_i} (U(p_i, p_{-i}))$ ,  $\forall i \in N$ .

**Βήμα 3<sup>ο</sup>** Εάν τουλάχιστον ένας χρήστης υπολογίσει μια νέα τιμή ισχύος η οποία διαφέρει από την προηγούμενή του επαρκώς, τότε η εκτέλεση του αλγορίθμου επιστρέφει στο βήμα 2, διαφορετικά ο αλγόριθμος σταματά.

Να σημειωθεί ότι οι απαιτούμενοι υπολογισμοί του βήματος 2 μπορούν να γίνουν πλήρως καταναμημένα δεδομένου ότι κάθε δέκτης μπορεί να ανιχνεύσει το επίπεδο των παρεμβολών στο χρησιμοποιούμενο κανάλι και με τη σειρά του ο πομπός έχοντας αυτή την πληροφορία μπορεί να υπολογίσει τη βέλτιστη νέα τιμή για το χρήστη που επιθυμεί να μεταδώσει.

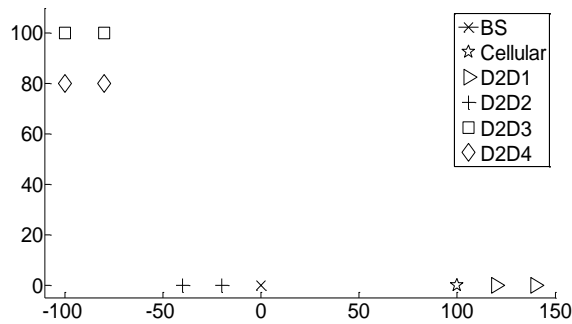
## 5.5. Αριθμητικά Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα από την πειραματική προσομοίωση του αλγορίθμου εύρεσης του επιθυμητού ΣΙ για το παίγνιο κατανομής ισχύος στην άνω ζεύξη ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας των χρηστών. Στα σενάρια τα οποία προσομοιώθηκαν θεωρήθηκε μια κυψέλη ακτίνας 300m. Το εύρος των διαθέσιμων καναλιών ήταν 180kHz και τα κέρδη καναλιού ακολουθούσαν το νόμο του αντιστρόφου της απόστασης με εκθέτη  $n=3$ . Ρυθμίζοντας κατάλληλα το συντελεστή κοστολόγησης  $c_i$  για κάθε χρήστη  $i$  μπορεί κανείς να ελέγξει τα επίπεδα εκπεμπόμενης ισχύος στο επιθυμητό σημείο ισορροπίας.

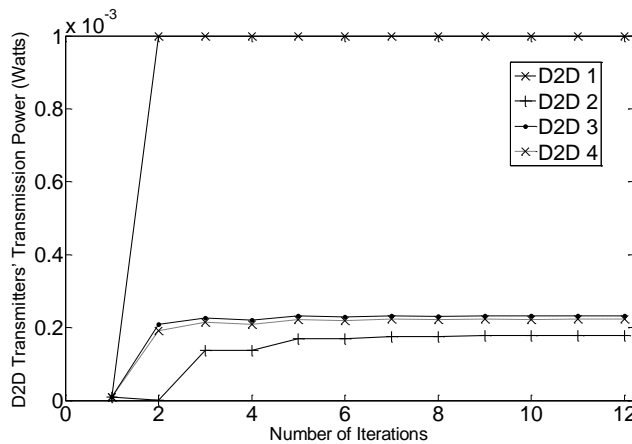
Θεωρείται ότι ένα διαθέσιμο κανάλι μπορεί να χρησιμοποιηθεί από ένα χρήστη που εξυπηρετείται από το ΣΒ (κυψελωτός χρήστης), αλλά κι από χρήστες που επικοινωνούν απευθείας. Να σημειώσουμε ότι θεωρούμε ότι μια ομάδα πόρων δεν μπορεί να μοιραστεί μεταξύ δύο κυψελωτών χρηστών από τη στιγμή που το χρησιμοποιούμενο σχήμα μετάδοσης είναι SC-FDMA. Στο σενάριο που προσομοιώθηκε θεωρήθηκε ότι υπάρχει ένας κυψελωτός χρήστης και τέσσερα ζευγάρια χρηστών που επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους. Θεωρήθηκε ότι ο κυψελωτός χρήστης βρίσκεται κοντά στο χρήστη άμεσης επικοινωνίας 1 δημιουργώντας

του σημαντικές παρεμβολές. Ένα δεύτερο ζευγάρι από χρήστες άμεσης επικοινωνίας βρίσκονται κοντά στο ΣΒ προκαλώντας με τη σειρά τους αξιόλογη παρεμβολή στην επικοινωνία του κυψελωτού χρήστη. Τέλος, θεωρήθηκαν δύο ζεύγη χρηστών άμεσης επικοινωνίας οι οποίοι μοιράζονται το ίδιο κανάλι και βρίσκονται σχετικά κοντά μεταξύ τους. Με το σενάριο αυτό καλύπτονται όλα τα είδη παρεμβολών που μπορούν να υπάρξουν σε ένα τέτοιου είδους δίκτυο και με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια καταδεικνύεται η δυνατότητα του συγκεκριμένου παιγνιοθεωρητικού μηχανισμού να ελέγξει με επιτυχία την εκπεμπόμενη ισχύ των χρηστών.

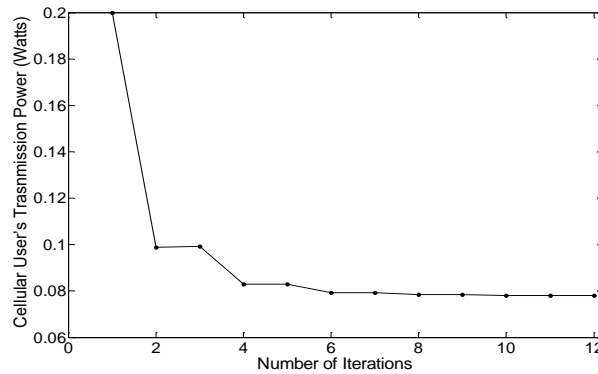
Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα της εκπεμπόμενης ισχύος σε κάθε βήμα εκτέλεσης του επαναληπτικού κατανεμημένου αλγορίθμου κατανομής ισχύος, τόσο για τους κυψελωτούς χρήστες, όσο και για τους χρήστες άμεσης επικοινωνίας. Επίσης παρουσιάζεται η τοπολογία που υιοθετήθηκε.



Εικόνα 5.2 – Τοπολογία ασύρματων χρηστών.



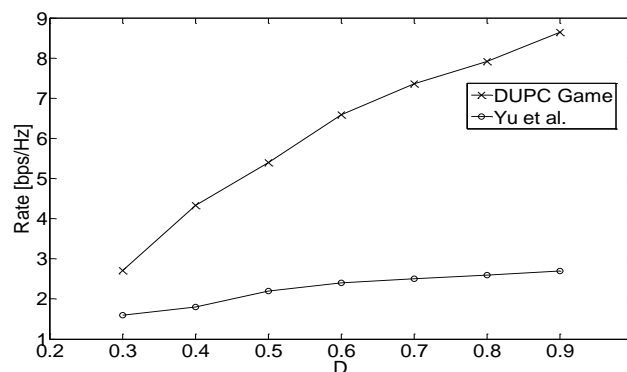
Εικόνα 5.3 - Σύγκλιση ισχύος εκπομπής για τους χρήστες άμεσης επικοινωνίας.



**Εικόνα 5.4 - Σύγκλιση ισχύος εκπομπής για τον κυψελωτό χρήστη**

Παρατηρούμε ότι μέσα σε ένα αρκετά μικρό αριθμό επαναλήψεων ο αλγόριθμος συγκλίνει στο επιθυμητό ΣΙ Nash. Η ισχύς εκπομπής του κυψελωτού χρήστη είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτές των χρηστών άμεσης επικοινωνίας γεγονός το οποίο είναι αναμενόμενο λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών της κάθε είδους επικοινωνίας (απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη). Επίσης, ο χρήστης άμεσης επικοινωνίας 1 εκπέμπει σε αρκετά υψηλότερα επίπεδα από τους άλλους χρήστες άμεσης επικοινωνίας έτσι ώστε να αντιμετωπίσει τη σημαντικά μεγαλύτερη παρεμβολή που δέχεται από τον κυψελωτό χρήστη.

Τέλος γίνεται συγκριτική αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτών ενός άλλου μηχανισμού κατανομής ισχύος εκπομπής [YTD09b] που ήδη έχει προταθεί στη βιβλιογραφία και καταδεικνύεται η συγκριτική ανωτερότητα του προτεινόμενου μηχανισμού για το εν λόγω σενάριο λειτουργίας του δικτύου. Σε αυτό το σενάριο θεωρήθηκε ότι υπάρχει ένα κυψελωτός χρήστης κι ένα ζεύγος από χρήστες άμεσης επικοινωνίας κι ακτίνα της κυψέλης είναι κανονικοποιημένη στη μονάδα.



**Εικόνα 5.5 - Μέσος ρυθμός μετάδοσης του κυψελωτού χρήστη ανά μονάδα χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης σε σχέση με την απόσταση του χρήστη άμεσης επικοινωνίας από το ΣΒ.**

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ο μέσος ρυθμός μετάδοσης του κυψελωτού χρήστη ανά μονάδα χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης που επιτυγχάνεται από την προτεινόμενη προσέγγιση (DUPC Game) κι αυτός της εργασίας [YTD09b]. Στο διάγραμμα αυτό

υπολογίστηκε ο μέσος ρυθμός μετάδοσης του κυψελωτού χρήστη ανά μονάδα χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης για διάφορες τιμές της απόστασης  $D$  του χρήστη άμεσης επικοινωνίας από το ΣΒ.

## **5.6. Ανακεφαλαιωτικά Συμπεράσματα**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε μια παιγνιοθεωρητική προσέγγιση για την κατανομή ισχύος εκπομπής στην άνω ζεύξη ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας. Το χρησιμοποιούμενο σχήμα μετάδοσης θεωρείται ότι είναι το SC-FDMA. Κάθε κυψέλη του δικτύου διαθέτει ένα σύνολο από κανάλια μετάδοσης – ομάδες πόρων. Σε κάθε κυψέλη, σε κάθε διαθέσιμο κανάλι μετάδοσης μπορούν να συνυπάρχουν ένας χρήστης κυψελωτής επικοινωνίας με πολλαπλούς χρήστες άμεσης επικοινωνίας. Οι χρήστες αυτοί ανταγωνίζονται μεταξύ τους για την επιλογή της κατάλληλης για αυτούς τιμής ισχύος εκπομπής.

Η αλληλεπίδραση αυτή μοντελοποιήθηκε μέσω ενός μη συνεργατικού κοίλου παιγνίου ισχύος εκπομπής. Αποδείχθηκε ότι το παίγνιο αυτό διαθέτει τουλάχιστον ένα ΣΙ Nash και προτάθηκε ένας αλγόριθμος βέλτιστης απόκρισης για τον κατανεμημένο υπολογισμό του. Τέλος, παρουσιάστηκαν αριθμητικά αποτελέσματα που αποδεικνύουν τη σύγκλιση του αλγορίθμου μετά από ένα μικρό σχετικά αριθμό επαναλήψεων.

## **6. Διαχείριση Παρεμβολών σε Ασύρματα Δίκτυα μιας Κυψέλης με Υποστήριξη Άμεσης Επικοινωνίας**

Όπως έχει προαναφερθεί η διαχείριση παρεμβολών σε ένα ασύρματο κυψελωτό δίκτυο με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας παίζει καθοριστικό ρόλο για την αποδοτική του λειτουργία. Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζουμε το πρόβλημα της διαχείρισης παρεμβολών τόσο στο χώρο των καναλιών μετάδοσης όσο και στο χώρο της ισχύος εκπομπής.

### **6.1. Σχετικές Εργασίες**

Τα τελευταία χρόνια παρατηρήθηκε έντονο ενδιαφέρον στη μελέτη προβλημάτων κατανομής πόρων σε ασύρματα κυψελωτά δίκτυα με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας [FLY14], [PHD13], [YDR11]. Σε αυτού του είδους τα δίκτυα κάθε χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει το βέλτιστο τρόπο για αυτόν επικοινωνίας είτε αυτός είναι μέσω του ΣΒ είτε απευθείας με κάποιον άλλο κοντινό χρήστη. Η επιλογή αυτή μπορεί να εξαρτάται από τις λαμβανόμενες παρεμβολές, την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος αλλά και την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη [DYR10], [FDM12].

Αφού επιλεγούν οι τρόποι επικοινωνίας όλων των χρηστών τίθεται το θέμα της κατανομής των σχετικών πόρων σε αυτούς. Οι εν λόγω πόροι αφορούν κανάλια μετάδοσης και ισχύ εκπομπής. Τα σχήματα κατανομής πόρων περιλαμβάνουν περιπτώσεις κοινής χρήσης πόρων (underlay) μεταξύ των χρηστών κυψελωτής και άμεσης επικοινωνίας αλλά και χρήσης ξένων πόρων (overlay). Στην πρώτη περίπτωση της κοινής χρήσης πόρων οι χρήστες της κυψελωτής επικοινωνίας μοιράζονται κοινές ομάδες πόρων με τους χρήστες της άμεσης επικοινωνίας. Μια ομάδα πόρων όπως έχει προδιαγραφεί από τη 3GPP αφορά ένα συνδυασμό από υποφέρουσες και χρονικά σύμβολα.

Τα σχήματα κατανομής πόρων με βάση τις σχετικές εργασίες της βιβλιογραφίας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αυτά που στόχο έχουν τη βελτιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης [PHD13], [YDR11], [WZZ13], της μείωσης των συνολικών παρεμβολών [GTP14], [YZZ15], [XYH12] αλλά και της αύξησης του λόγου του ρυθμού μετάδοσης προς την καταναλισκόμενη ισχύ εκπομπής [JLZ16], [MPH07], [ZDO15], [FJD12]. Επίσης οι προσεγγίσεις αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν είτε στις κεντρικοποιημένες είτε στις κατανεμημένες. Στις κεντρικοποιημένες προσεγγίσεις οι συγγραφείς προσπαθούν να επιλύσουν ένα κεντρικοποιημένο πρόβλημα στο ΣΒ [PHD13], [YDR11], [WZZ13], [ZHS10],

[FLY13]. Το κεντρικοποιημένο πρόβλημα διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης του αθροίσματος των συναρτήσεων χρησιμότητας [CWG95] όπου καθεμία από τις συναρτήσεις χρησιμότητας αντιπροσωπεύει την επιθυμία κάθε χρήστη για τη χρήση πόρων του δικτύου είτε αυτοί είναι ένα κανάλι μετάδοσης είτε είναι ισχύς εκπομπής. Στις περισσότερες από τις παραπάνω εργασίες καθεμία συνάρτηση χρησιμότητας αφορά το ρυθμό μετάδοσης κάθε χρήστη, μέγεθος το οποίο υπολογίζεται μέσω του τύπου του Shannon. Όμως το συνολικό άθροισμα των ρυθμών μετάδοσης στο συνδυαστικό χώρο καναλιών μετάδοσης και ισχύος εκπομπής δεν αποτελεί ένα κυρτό πρόγραμμα [BoV04] γεγονός το οποίο δυσκολεύει την αποτελεσματική του επίλυση.

Για αυτό το λόγο αναζητούμε εναλλακτικές μεθόδους για την επίλυσή του οι οποίες προάγουν μια ταχεία και κατανεμημένη επίλυση του προβλήματος. Στην κατεύθυνση αυτή έχουν γίνει σχετικές εργασίες οι οποίες αξιοποιούν μοντέλα από τη θεωρία δημοπρασιών και τη θεωρία παιγνίων [XSH13], [WXS15], [YZY15]. Οι συγγραφείς στις παραπάνω εργασίες προτείνουν προσεγγιστικές λύσεις για την επίλυση του προβλήματος από τη στιγμή που η ακριβής του επίλυση είναι εξαιρετικά δύσκολη εξαιτίας της NP-hard πολυπλοκότητας του προβλήματος. Οι συγγραφείς στις παραπάνω εργασίες δίνουν έμφαση στη μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης του συστήματος είτε αγνοώντας είτε λαμβάνοντας υπόψιν κάποια ελάχιστα επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας στο δέκτη. Συγκεκριμένα στην [XSH13] οι συγγραφείς προτείνουν ένα μηχανισμό διαπραγμάτευσης για την κατανομή πόρων στην προς τα κάτω ζεύξη του δικτύου. Αποδεικνύεται ότι η υπολογιστική πολυπλοκότητα του προβλήματος είναι NP-hard. Παρότι οι συγγραφείς προτείνουν μια αντίστροφη επαναληπτική διαδικασία, η πολυπλοκότητα του προβλήματος παραμένει εκθετική ως προς τον αριθμό των καναλιών μετάδοσης. Στην εργασία [WXS15] οι συγγραφείς προτείνουν ένα μηχανισμό διαπραγμάτευσης και θεωρίας παιγνίων σε δύο βήματα για τη συνδυαστική κατανομή καναλιών μετάδοσης και ισχύος εκπομπής. Λόγω της NP-hard πολυπλοκότητας του προβλήματος προτείνουν έναν επαναληπτικό αλγόριθμο που δίνει προσεγγιστικές λύσεις. Οι συγγραφείς ενδιαφέρονται για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης δηλ. του λόγου του ρυθμού μετάδοσης προς την καταναλισκόμενη ισχύ και δεν λαμβάνουν άμεσα υπόψιν τις απαιτήσεις των χρηστών ως προς το σηματοθορυβικό λόγο. Τέλος στην εργασία [YZY15] προτείνουν μια παιγνιοθεωρητική προσέγγιση τύπου Stackelberg για το συνδυαστικό πρόβλημα παρέχοντας προστασία ως προς το σηματοθορυβικό λόγο μόνο για τους χρήστες κυψελωτής επικοινωνίας.

Από την άλλη πλευρά στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής αυτής δίνουμε έμφαση στον όσο το δυνατόν μεγαλύτερο περιορισμό των καταναλισκόμενων πόρων (καναλιών μετάδοσης, ισχύος εκπομπής) με παράλληλο στόχο την επίτευξη ενός ελάχιστου επιπέδου ποιότητας επικοινωνίας σε κάθε δέκτη.



## 6.2. Συμβολή & Καινοτομία

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής αυτής μελετήθηκε το πρόβλημα της συνδυαστικής κατανομής καναλιών μετάδοσης και ισχύος εκπομπής σε ένα ασύρματο κυψελωτό δίκτυο με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας. Στο δίκτυο αυτό οι χρήστες άμεσης επικοινωνίας μοιράζονται κοινές ομάδες πόρων με τους χρήστες κυψελωτής επικοινωνίας. Στόχος αποτελεί η ελαχιστοποίηση των συνολικών παρεμβολών στο δίκτυο με την παράλληλη υποστήριξη των απαιτήσεων των χρηστών ως προς το σηματοθορυβικό λόγο [KTP16].

Λόγω της NP-hard πολυπλοκότητας του παραπάνω προβλήματος [KTP16] προτείνεται μια προσέγγιση δύο σταδίων η οποία επιλύει το πρόβλημα με κατανεμημένο τρόπο με ιδιαίτερα χαμηλότερη πολυπλοκότητα. Στο πρώτο στάδιο θεωρείται ότι όλοι οι χρήστες εκπέμπουν με σταθερή ισχύ κι επιλύεται το πρόβλημα της κατανομής ομάδας πόρων. Το πρόβλημα αυτό μοντελοποιείται ως ένα ακριβές δυναμικό παίγνιο [MoS96]. Η συνάρτηση δυναμικού του παιγνίου αυτού αποδεικνύεται ότι ισούται με το σύνολο των παρεμβολών στο δίκτυο. Για αυτή την κατηγορία παιγνίων αποδεικνύεται ότι υπάρχει τουλάχιστον ένα ΣΙ Nash. Επίσης αποδεικνύεται ότι υπάρχουν αλγόριθμοι βέλτιστης ή καλύτερης απόκρισης που συγκλίνουν σε ένα από αυτά τα ΣΙ Nash. Η υπολογιστική πολυπλοκότητα εύρεσης αυτών των ΣΙ ανήκει στην κλάση πολυπλοκότητας PLS (Polynomial Local Search) [Yan09]. Αυτό σημαίνει ότι σε κάποιες περιστάσεις μπορεί να χρειαστεί εκθετικός αριθμός επαναλήψεων σε σχέση με το μέγεθος της εισόδου του προβλήματος προκειμένου ο αλγόριθμος να συγκλίνει. Παρόλα αυτά κατά μέσο όρο όπως έχει αποδειχθεί στην εργασία [DuG16] ο αλγόριθμος βέλτιστης απόκρισης έχει πολυωνυμική πολυπλοκότητα.

Στο δεύτερο στάδιο και με δεδομένη την επιλογή καναλιών μετάδοσης που προκύπτει από το πρώτο στάδιο προχωρούμε στην επιλογή ισχύος εκπομπής η οποία λαμβάνει υπόψιν τις απαιτήσεις των χρηστών ως προς τον ελάχιστο επιθυμητό σηματοθορυβικό λόγο. Για το σκοπό αυτό μοντελοποιείται για κάθε διαθέσιμο κανάλι μετάδοσης ένα παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής. Για το παίγνιο αυτό αποδεικνύεται η ύπαρξη κι η μοναδικότητα του αντίστοιχου ΣΙ Nash. Τέλος, προτείνεται ένας κατανεμημένος αλγόριθμος που συγκλίνει σε αυτό. Στην πράξη αποδεικνύεται ότι ο αλγόριθμος αυτός συγκλίνει μετά από ένα σχετικά μικρό αριθμό επαναλήψεων.

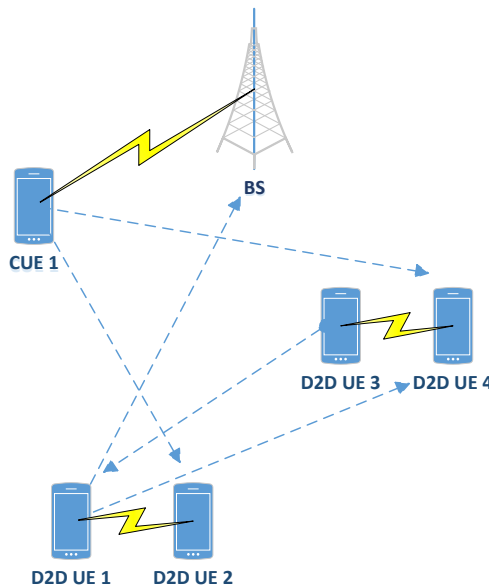
Η προτεινόμενη προσέγγιση διαφοροποιείται από την υπάρχουσα βιβλιογραφία στα εξής σημεία:

- Είναι η πρώτη φορά που διατυπώνεται κι επιλύεται ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης παρεμβολών για αυτή την αρχιτεκτονική δικτύων δηλ. για ασύρματα κυψελωτά δίκτυα με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας.

- Δεν περιορίζεται ο αριθμός των χρηστών άμεσης επικοινωνίας που μπορούν να μοιράζονται μια κοινή ομάδα πόρων που έχει ανατεθεί σε ένα χρήστη κυψελωτής επικοινωνίας. Αυτό καθορίζεται ξεκάθαρα από το στόχο της ελαχιστοποίησης των συνολικών παρεμβολών.
- Το πρόβλημα προτείνεται να επιλυθεί σε δύο στάδια εκμεταλλευόμενοι καταναμημένους αλγορίθμους χαμηλής πολυπλοκότητας.
- Η επίδοση των προτεινόμενων αλγορίθμων αξιολογείται μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων και καταδεικνύεται η συγκριτική τους ανωτερότητα σε σχέση με άλλες σχετικές εργασίες της βιβλιογραφίας [WXS15], [ZHS10].

### 6.3. Μοντέλο Συστήματος

Θεωρούμε την άνω ζεύξη ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας. Η ανάλυση που ακολουθεί αφορά την περίπτωση μιας κυψέλης. Στο επόμενο κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με την περίπτωση πολλαπλών κυψελών. Στην περίπτωση μιας κυψέλης θεωρούμε ότι υπάρχει ένας αριθμός συσκευών που επικοινωνεί με το ΣΒ κι ένας αριθμός ζευγών συσκευών που μιλούν απευθείας μεταξύ τους.



**Εικόνα 6.1** Αρχιτεκτονική ενός ασύρματου δικτύου μιας κυψέλης με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας

Οι συσκευές αυτές θεωρούμε ότι χρησιμοποιούν το SC-FDMA ως σχήμα μετάδοσης. Επίσης θεωρείται ότι ο ΣΒ διαθέτει ένα σύνολο από διαθέσιμα κανάλια μετάδοσης, έστω  $K$  σε αριθμό. Κάθε χρήστης κυψελωτής επικοινωνίας χρησιμοποιεί ένα κανάλι, διαφορετικό από τους υπόλοιπους χρήστες κυψελωτής επικοινωνίας. Κάθε χρήστης άμεσης επικοινωνίας

επαναχρησιμοποιεί ένα από τα κανάλια που έχουν διατεθεί για τους χρήστες κυψελωτής επικοινωνίας. Αυτό γίνεται για λόγους εξοικονόμησης πόρων. Το πρόβλημα που δημιουργείται από την επαναχρησιμοποίηση πόρων είναι η αύξηση των παρεμβολών στους δέκτες των συσκευών. Για αυτό το λόγο, ορίζουμε στο δέκτη κάθε συσκευής την ποσότητα του σηματοθορυβικού λόγου όπως έχει οριστεί στο κεφάλαιο 2 στη σχέση (2.1) ως εξής:

$$\gamma_i^c = \frac{G_{ii}^c \cdot P_i^c}{\sum_{j \neq i} \delta_{j,c} G_{ji}^c \cdot P_j^c + \sigma^2} \quad (6.1)$$

όπου  $\gamma_i^c$  είναι ο σηματοθορυβικός λόγος στο δέκτη του χρήστη  $i$  στο κανάλι  $c$ ,  $G_{ii}^c$  είναι το απευθείας κέρδος του καναλιού για το χρήστη  $i$ ,  $P_i^c$  είναι η ισχύς του χρήστη  $i$  στο κανάλι  $c$ ,  $G_{ji}^c$  είναι το κέρδος του καναλιού από το πομπό του χρήστη  $j$  έως το δέκτη του χρήστη  $i$  στο κανάλι  $c$ . Τέλος η συνάρτηση  $\delta_{j,c}$  ορίζεται ως εξής:

$$\delta_{j,c} = \begin{cases} 1, & \text{εάν ο χρήστης } j \text{ χρησιμοποιεί το κανάλι } c \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (6.2)$$

Ο ρυθμός μετάδοσης κάθε χρήστη που πετυχαίνει στο δέκτη του θεωρείται ότι υπολογίζεται μέσω του τύπου του Shannon δηλ.

$$R_i^c = W \cdot \log(1 + \gamma_i^c) \quad (6.3)$$

όπου  $W$  το διαθέσιμο εύρος ζώνης του καναλιού μετάδοσης  $c$

Στη συνέχεια με στόχο την ελαχιστοποίηση των συνολικών παρεμβολών στο δίκτυο διατυπώνεται το παρακάτω πρόβλημα

$$\min_p \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^{L+D} \delta_{i,c} \cdot I_i^c \quad (6.4)$$

υπό

$$0 \leq p_i^c \leq p_i^{\max}, \forall c \in C, i \in L \cup D \quad (6.5)$$

$$\gamma_i^c \geq \gamma_i^{\text{tar}}, \forall i \in L \cup D, \forall c \in C \quad (6.6)$$

όπου  $I_i^c = \sum_{j \neq i} \delta_{j,c} \cdot G_{ji}^c \cdot P_j^c + \sigma^2$  είναι οι συνολικές παρεμβολές που δέχεται ο δέκτης του

χρήστη  $i$  στο κανάλι  $c$ ,  $C$  είναι το σύνολο των διαθέσιμων καναλιών της κυψέλης,  $L$  είναι το σύνολο των χρηστών κυψελωτής επικοινωνίας,  $D$  είναι το σύνολο των χρηστών άμεσης επικοινωνίας,  $\gamma_i^{\text{tar}}$  είναι το ελάχιστο επίπεδο σηματοθορυβικού λόγου στο δέκτη του χρήστη  $i$ . Το πρόβλημα (6.4) είναι ένα πρόβλημα μικτού ακέραιου προγραμματισμού [PaS98]. Είναι γνωστό ότι μέχρι τώρα δεν έχει βρεθεί αποδοτικός αλγόριθμος για την επίλυση αυτού του είδους των προβλημάτων. Για αυτό το λόγο αναζητούνται προσεγγιστικοί αλγόριθμοι που

υπολογίζουν υποβέλτιστες λύσεις με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Σε αυτή την κατεύθυνση προτείνουμε την μοντελοποίηση του παραπάνω προβλήματος μέσω ενός δυναμικού παίγνιου.

## 6.4. Κατανομή Ομάδας Πόρων

Το πρόβλημα της κατανομής ομάδων πόρων σε ένα ασύρματο δίκτυο μιας κυψέλης με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο για το οποίο θα αποδειχθεί ότι ανήκει στην κατηγορία των δυναμικών παιγνίων. Πιο συγκεκριμένα, έστω  $G = \{N, S, U\}$  ένα μη συνεργατικό, στρατηγικό παίγνιο όπου

- $N$  είναι το σύνολο των παιχτών-χρηστών άμεσης επικοινωνίας
- $S$  είναι το σύνολο των στρατηγικών των παραπάνω παιχτών. Πιο συγκεκριμένα  $S = [S_1, S_2, \dots, S_{|N|}]$ ,  $S_i = C$ ,  $\forall i \in N$  και  $C$  αποτελεί το σύνολο των διαθέσιμων καναλιών της κυψέλης.
- $U = [U_1, U_2, \dots, U_N]$  είναι το σύνολο των συναρτήσεων χρησιμότητας όπου η κάθε συνάρτηση χρησιμότητας δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$U_i(s_i, s_{-i}) = T_i^1(s_i, s_{-i}) + T_i^2(s_i, s_{-i}) \quad (6.7)$$

$$T_i^1(s_i, s_{-i}) = - \sum_{j \neq i, j=1}^N p_j G_{ji}^{c_j} f(c_j, c_i) \quad (6.8)$$

$$T_i^2(s_i, s_{-i}) = - \sum_{j \neq i, j=1}^N p_j G_{ij}^{c_i} f(c_i, c_j) \quad (6.9)$$

όπου η σχέση (6.8) δείχνει το σύνολο των παρεμβολών που δέχεται ο χρήστης  $i$  και η σχέση (6.9) το σύνολο των παρεμβολών που αυτός προκαλεί σε όλους τους χρήστες του δικτύου που εκπέμπουν στο ίδιο κανάλι.

Αποδεικνύεται ότι το παίγνιο  $G$  είναι ένα ακριβές δυναμικό παίγνιο. Σύμφωνα με τον ορισμό ενός ακριβούς δυναμικού παίγνιου υπάρχει μια συνάρτηση δυναμικού  $Pot(s_i, s_{-i})$  για την οποία ισχύει η παρακάτω ιδιότητα

$$Pot(s_i, s_{-i}) - Pot(s'_i, s_{-i}) = U_i(s_i, s_{-i}) - U_i(s'_i, s_{-i}), \quad \forall i \in N, \quad \forall s_i, s'_i \in S_i \quad (6.10)$$

Η σχέση (6.10) δηλώνει ότι η μεταβολή στη συνάρτηση χρησιμότητας του χρήστη  $i$  λόγω μιας αλλαγής στρατηγικής του, μπορεί να απεικονιστεί μέσω μιας κοινής συνάρτησης δυναμικού του παίγνιου  $G$  με τον ίδιο τρόπο για όλους τους χρήστες του παίγνιού  $G$ . Στο παίγνιο αυτό η συνάρτηση δυναμικού αποδεικνύεται ότι έχει την παρακάτω μορφή:

$$Pot(s_i, s_{-i}) = \sum_{i=1}^N [a T_i^1(s_i, s_{-i}) + (1-a) T_i^2(s_i, s_{-i})], \quad a \in (0,1) \quad (6.11)$$

Η απόδειξη της σχέσης (6.11) παρατίθεται στο παράρτημα της διατριβής.

Τα δυναμικά παίγνια έχουν ορισμένες αρκετά επιθυμητές ιδιότητες όπως έχουμε προαναφέρει:

- Ύπαρξη τουλάχιστον ενός ΣΙ Nash
- Ύπαρξη ενός μονοπατιού πεπερασμένης βελτίωσης
- Σύγκλιση των αλγορίθμων βέλτιστης και καλύτερης απόκρισης σε ένα από τα ΣΙ Nash

Η ιδιότητα του μονοπατιού πεπερασμένης βελτίωσης δείχνει ότι οι αλγόριθμοι βέλτιστης ή καλύτερης απόκρισης σε κάθε βήμα εκτέλεσης τους βελτιώνουν όχι μόνο τη συνάρτηση χρησιμότητας ενός χρήστη αλλά και τη συνάρτηση δυναμικού του παιγνίου  $G$ . Στη συνέχεια θα σχεδιάσουμε έναν αλγόριθμο βέλτιστης απόκρισης ο οποίος υπολογίζει ένα από τα ΣΙ Nash του παιγνίου  $G$ .

## **6.5. Αλγόριθμος υπολογισμού ΣΙ Nash**

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ένας κατανεμημένος αλγόριθμος υπολογισμού του ΣΙ Nash του παραπάνω παιγνίου  $G$ . Όπως, έχει αποδειχθεί [Nee06] η παράλληλη εκδοχή του αλγορίθμου βέλτιστης απόκρισης δεν είναι εγγυημένο ότι συγκλίνει. Για αυτό το λόγο προτείνεται μια σειριακή εκδοχή του αλγορίθμου βέλτιστης απόκρισης η οποία εξασφαλίζει τη σύγκλιση του εντός πεπερασμένου αριθμού βημάτων [MoS96].

Ο αλγόριθμος αυτός φαίνεται παρακάτω. Αρχικά όλοι χρήστες κυψελωτής επικοινωνίας επιλέγουν ένα κανάλι μετάδοσης. Τα κανάλια μετάδοσης αυτά θα πρέπει να είναι διαφορετικά καθώς υπάρχει αυτή η απαίτηση για τους χρήστες κυψελωτής επικοινωνίας μέσα σε μια κυψέλη από τη 3GPP. Στη συνέχεια, σειριακά, κάθε χρήστης άμεσης επικοινωνίας επιλέγει το κανάλι μετάδοσης που βελτιστοποιεί τη συνάρτηση χρησιμότητάς του. Μετά από κάθε βήμα του αλγορίθμου ελέγχεται εάν έχει επιτευχθεί σύγκλιση για όλους τους χρήστες άμεσης επικοινωνίας. Στην περίπτωση που επιτευχθεί, ο αλγόριθμος σταματά. Σύμφωνα με τις ιδιότητες των δυναμικών παιγνίων αποδεικνύεται θεωρητικά ότι ο αλγόριθμος 1 συγκλίνει μετά από ένα πεπερασμένο αριθμό από βήματα.

Ο αλγόριθμός αυτός μπορεί να εκτελεστεί με δύο τρόπους: Πρώτον σε κάθε κινητό τερματικό το οποίο θα υπολογίζει το τρέχον βέλτιστο κανάλι μετάδοσης για εκείνο. Με αυτό τον τρόπο, προάγεται μια κατανεμημένη υλοποίησή του. Σε αυτή την περίπτωση χρειάζεται ένας μηχανισμός συντονισμού κι ελέγχου της σύγκλισης του ο οποίος θα λαμβάνει πληροφορία από όλους τους χρήστες που συμμετέχουν στο παίγνιο  $G$ . Μια εναλλακτική προσέγγιση θα περιελάμβανε την εκτέλεση του αλγορίθμου στο ΣΒ αφού έχει συγκεντρώσει από όλους τους χρήστες του δικτύου την αναγκαία πληροφορία για την υλοποίησή του. Έτσι όλος ο

υπολογισμός εκτελείται στο ΣΒ όπου είναι πιο εύκολος και ο συντονισμός μεταξύ των παιχτών αλλά κι ο έλεγχος της σύγκλισης του αλγορίθμου.

---

**Algorithm 1**

---

Initialize the RB assignment vector for all cellular links,  
variable  $r = 0$  and  $ite_i = 0$  .

For all D2D links do

$ite_i = ite_i + 1;$

$c_i^*(ite_i) = \arg \max_c U_i(s_i, s_i)$

if  $c_i^*(ite_i) \neq c_i^*(ite_i - 1)$  then

$r = r + 1;$

else

$r = 0;$

end if.

if  $r = D$  then stop,

else go to step 2

end if.

end for.

Για την πρώτη δηλ. την πλήρως καταναεμημένη λειτουργία του αλγορίθμου 1 προτείνεται να ακολουθηθεί η παρακάτω διαδικασία προκειμένου να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο εφικτή μια καταναεμημένη λειτουργία του αλγορίθμου. Κεντρικό ρόλο στη λειτουργία του αλγορίθμου παίζει ο υπολογισμός της συνάρτησης χρησιμότητας των χρηστών. Αυτή η οποία υπολογίζεται με βάση τη σχέση (6.7) αποτελείται από δύο μέρη, αυτά που φαίνονται στις σχέσεις (6.8) και (6.9). Η σχέση (6.8) αφορά τις παρεμβολές που δέχεται ο δέκτης του χρήστη  $i$  ποσότητα η οποία θεωρείται ότι μπορεί να υπολογιστεί από κάθε χρήστη με καταναεμημένο τρόπο. Το μέρος που έχει να κάνει με τη σχέση (6.9) αφορά τις συνολικές παρεμβολές που προκαλεί ο χρήστης  $i$ . Η ποσότητα αυτή δεν μπορεί να υπολογιστεί άμεσα από κάθε χρήστη γιατί προϋποθέτει τη γνώση των θέσεων των χρηστών που εκπέμπουν σε κοινό κανάλι.

Θεωρούμε ότι ο ΣΒ είναι σε θέση να εκτιμήσει τη θέση των χρηστών κυψελωτής επικοινωνίας. Επίσης γνωρίζει την επιλογή ομάδας πόρων για τους χρήστες κυψελωτής επικοινωνίας. Οπότε είναι σε θέση να στείλει μέσω ενός μηνύματος ευρυεκπομπής (broadcast) τη θέση αλλά και την επιλογή ομάδας πόρων για όλους τους χρήστες κυψελωτής επικοινωνίας στους χρήστες άμεσης επικοινωνίας. Στη συνέχεια οι χρήστες άμεσης επικοινωνίας, γνωρίζοντας τις παρεμβολές που δέχονται μπορούν να υπολογίσουν τις παρεμβολές που δέχονται από τους χρήστες άμεσης επικοινωνίας. Λόγω της εγγύτητας του πομπού με το δέκτη ενός ζευγαριού χρηστών άμεσης επικοινωνίας, μπορούμε να εκτιμήσουμε προσεγγιστικά ότι οι παρεμβολές που δέχεται ένας χρήστης άμεσης επικοινωνίας από άλλους χρήστες άμεσης επικοινωνίας είναι περίπου ίδιες με αυτές που εκείνος προκαλεί στους ίδιους χρήστες. Τέλος οι παρεμβολές που προκαλεί ένας χρήστης άμεσης επικοινωνίας στους χρήστες κυψελωτής επικοινωνίας είναι ίδια για όλους τους χρήστες κυψελωτής επικοινωνίας καθώς όλοι τους έχουν ως δέκτη το ΣΒ.

## 6.6. Κατανομή Ισχύος Εκπομπής

Παίρνοντας ως δεδομένο ότι έχει συγκλίνει ο αλγόριθμος 1, κάθε χρήστης κυψελωτής και άμεσης επικοινωνίας έχει επιλέξει μια ομάδα πόρων. Οπότε είναι γνωστό ποιοι χρήστες χρησιμοποιούν κοινό κανάλι μετάδοσης. Σε κάθε κοινό κανάλι μετάδοσης δημιουργούνται παρεμβολές μεταξύ των χρηστών που εκπέμπουν. Κάθε χρήστης έχει ως δέκτη είτε το ΣΒ είτε κάποιον άλλο χρήστη-δέκτη αν πρόκειται για χρήστη άμεσης επικοινωνίας. Επίσης κάθε χρήστης μπορεί να έχει διαφορετικές απαιτήσεις για το ελάχιστο επιθυμητό σε αυτόν επίπεδο σηματοθορυβικό λόγο. Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι έχει διαφορετικές απαιτήσεις ως προς τον ελάχιστο επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης στο δέκτη όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο και συγκεκριμένα στο κεφάλαιο 2.

Για κάθε χρησιμοποιούμενη ομάδα πόρων μπορεί να μοντελοποιηθεί ένα μη συνεργατικό παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής. Πιο συγκεκριμένα, έστω  $G^c = [N^c, A, U]$  είναι το εν λόγω παίγνιο για κάθε ομάδα πόρων  $c$ .

- $N^c$  είναι το σύνολο των παιχτών-χρηστών άμεσης επικοινωνίας που έχουν επιλέξει την ομάδα πόρων  $c$
- $S$  είναι το σύνολο των στρατηγικών των παραπάνω παιχτών. Πιο συγκεκριμένα  $S = [S_1, S_2, \dots, S_{|N^c|}]$ ,  $A_i = [0, p_i^{\max}]$ ,  $\forall i \in N^c$  και  $p_i^{\max}$  αποτελεί τη μέγιστη δυνατή τιμή ισχύος εκπομπής για το χρήστη  $i$ .
- $U = [U_1, U_2, \dots, U_{|N^c|}]$  είναι το σύνολο των συναρτήσεων χρησιμότητας όπου η κάθε συνάρτηση χρησιμότητας δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$U_i(p_i, p_{-i}) = -c_i (\gamma_i - \gamma_i^{tar})^2 \quad (6.12)$$

Όπου  $\gamma_i^{tar}$  είναι η απαίτηση του χρήστη  $i$  για το ελάχιστο επιθυμητό επίπεδο σηματοθορυβικού λόγου στο δέκτη του.

### Πόρισμα 1

Για καθένα από τα παραπάνω παίγνια  $G^c$  αποδεικνύεται η ύπαρξη και η μοναδικότητα ενός ΣΙ Nash. Τέλος, προτείνεται για καθένα από αυτά ένας πλήρως καταναμημένος αλγόριθμος βέλτιστης απόκρισης ο οποίος αποδεικνύεται ότι συγκλίνει στο σχετικό ΣΙ Nash. Για την απόδειξη της ύπαρξης τουλάχιστον ενός ΣΙ Nash χρησιμοποιούμε το θεώρημα Debreu, Glicksberg, Fan περί ύπαρξης ΣΙ Nash σε μη συνεργατικά παίγνια.

### Απόδειξη

Καθένα από τα παίγνια  $G^c$  είναι ορισμένο σε ένα κυρτό διάστημα του συνόλου των στρατηγικών τους. Τα διαστήματα αυτά  $A_i = [0, p_i^{\max}]$ ,  $\forall i \in N^c$  είναι κλειστά διαστήματα,

υποσύνολα του συνόλου των πραγματικών αριθμών. Για αυτό είναι και κλειστά, συμπαγή διαστήματα. Η συνάρτηση χρησιμότητας κάθε χρήστη  $i$ , όπως είναι ορισμένη στη σχέση (6.12) είναι συνεχής και κοίλη συνάρτηση στο πεδίο των στρατηγικών των χρηστών. Επομένως, σύμφωνα με το θεώρημα ύπαρξης ΣΙ Nash το παίγνιο  $G^c$  έχει τουλάχιστον ένα ΣΙ Nash.▪

## Πόρισμα 2

Στη συνέχεια υπολογίζεται η συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης του παίγνιου  $G^c$ . Αποδεικνύεται ότι η συνάρτηση αυτή έχει την παρακάτω μορφή  $p_i^* = \min\{p_i^{\max}, \gamma_i^{tar} \frac{I_i}{G_{ii}}\}$  όπου

$$I_i = \sum_{j \neq i} G_{ji} \cdot p_j + \sigma^2 \text{ είναι οι λαμβανόμενες παρεμβολές στο δέκτη του χρήστη } i.$$

## Απόδειξη

$$BR(\underline{s}_{-i}) = \arg \max_{s_i \in S_i} U_i(s_i, \underline{s}_{-i})$$

Για αυτό το λόγο αναζητούμε τα κρίσιμα σημεία της συνάρτησης βέλτιστης απόκρισης.

$$\frac{\partial U_i(p_i)}{\partial p_i} = 0 \Rightarrow \gamma_i^{tar} - \gamma_i = 0 \Rightarrow \gamma_i = \gamma_i^{tar} \quad (6.13)$$

Έστω  $p_i^{req.} = \arg \max U_i(p_i, p_{-i})$ . Εάν υπάρχει μια τιμή ισχύος εκπομπής εντός του διαστήματος ορισμού της για την οποία ισχύει η σχέση (6.13)

$$\frac{G_{ii} P_i}{\sum_{j \neq i} G_{ji} \cdot p_j + \sigma^2} = \gamma_i^{tar} \Rightarrow P_i = \gamma_i^{tar} \cdot \frac{\sum_{j \neq i} G_{ji} \cdot p_j + \sigma^2}{G_{ii}}$$

Εάν το  $p_i^{\max} \geq P_i$  τότε μπορούμε να συμπεράνουμε ότι

$$p_i^{req.} = P_i = \gamma_i^{tar} \frac{\sum_{j \neq i} G_{ji} \cdot p_j + \sigma^2}{G_{ii}} = \gamma_i^{tar} \frac{I_i}{G_{ii}}$$

Εάν όχι, τότε  $p_i^{req.} = \arg \max U_i(p_i, p_{-i}) = p_i^{\max}$  από τη στιγμή που  $\frac{\partial U_i(p_i)}{\partial p_i} > 0$  για

$p_i \leq p_i^{\max} \Rightarrow \gamma_i \leq \gamma_i^{tar}$ . Οπότε σε κάθε περίπτωση η συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης ισούται

$$\text{με } BR(p_{-i}) = \arg \max_{s_i \in S_i} U_i(p_i, p_{-i}) = p_i^{req.} = \min\{p_i^{\max}, \gamma_i^{tar} \frac{I_i}{G_{ii}}\} \quad (6.14) \text{▪}$$

Δηλ. κάθε χρήστης θα επιλέξει είτε να εκπέμψει σε ένα επίπεδο ισχύος που ικανοποιεί την ελάχιστη απαίτησή του ως προς το σηματοθορυβικό λόγο είτε θα εκπέμψει με τη μέγιστη ισχύ του.



Χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες των «κανονικών συναρτήσεων» [Yat95] αποδεικνύεται ότι και η συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης του παιγνίου  $G^c$  είναι μια κανονική συνάρτηση. Έτσι έπεται ότι υπάρχει ένας αλγόριθμος βέλτιστης απόκρισης ο οποίος συγκλίνει στο μοναδικό ΣΙ Nash του παιγνίου  $G^c$ . Παρακάτω παρατίθεται ο σχετικός αλγόριθμος:

---

**Algorithm 2 (SINR Aware Power Control)**

---

- 1: Let  $ite = 1$  and  $P(1)$  is an initial power vector for all links.
- 2: For every link which occupies one of the available RBs  
 find  $p_i^*(ite+1) = \arg \max_{p_i} U_i(p_i, p_{-i})$ .
- 3: Check for every link if  

$$\frac{p_i^*(ite+1) - p_i^*(ite)}{p_i^*(ite)} < eps$$
 where  $eps$  is small positive constant (e.g.  $eps = 10^{-3}$ ).
- 4: If the above is true for all links, then the algorithm terminates, else  $ite = ite + 1$  and the control goes to step 2.

Ο παραπάνω αλγόριθμος εφαρμόζεται για κάθε διαθέσιμη ομάδα πόρων. Είναι πλήρως καταναμημένος και συγκλίνει μετά από ένα πεπερασμένο αριθμό επαναλήψεων. Στη συνέχεια θα αξιολογηθεί μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων η προτεινόμενη προσέγγιση δύο σταδίων.

## 6.7. Αριθμητικά Αποτελέσματα

Το υποκεφάλαιο των αριθμητικών αποτελεσμάτων μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη: 1<sup>ον</sup> σε αυτό που αφορά την αξιολόγηση της προτεινόμενης προσέγγισης δύο σταδίων και 2<sup>ον</sup> τη σύγκριση αυτής με άλλες σχετικές προσεγγίσεις της σύγχρονης βιβλιογραφίας.

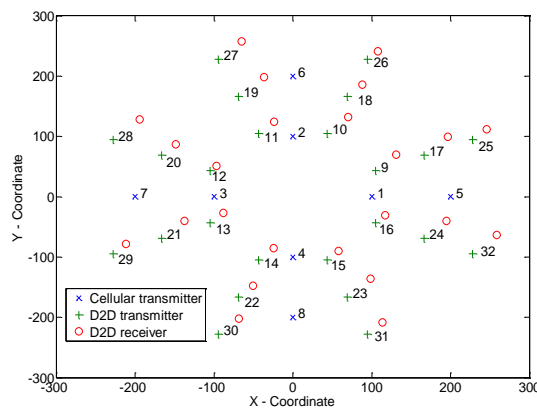
### 6.7.1. Αξιολόγηση προσέγγισης δύο σταδίων

Αρχικά περιγράφεται η τοπολογία της προσομοίωσης. Πρόκειται για μια κυψέλη ακτίνας 300m. Οι χρήστες της κυψελωτής επικοινωνίας βρίσκονται ομοιόμορφα τοποθετημένοι στο χώρο σε δύο ομόκεντρους κύκλους ακτίνας 100 και 200m αντίστοιχα. Οι αποστάσεις μεταξύ του πομπού και του δέκτη ενός ζεύγους χρηστών άμεσης επικοινωνίας κυμαίνεται από 10 έως 50m.

**Πίνακας 6.1 Παράμετροι κι οι αντίστοιχες τιμές για το 1<sup>ο</sup> σετ προσομοιώσεων**

Παράμετροι	Τιμές
Ακτίνα κυψέλης	300m
Αριθμός χρηστών κυψελωτής επικ.	8
Κατανομή χρηστών	Ομόκεντρα
Αριθμός ομάδων πόρων	8
Αριθμός χρηστών άμεσης επικ.	24
Μέγιστη ισχύς εκπομπής (chr. κυψ. επικ.)	2 Watts
Μέγιστη ισχύς εκπομπής (chr. άμεσης επικ.)	10 mW
Εύρος καναλιού	180 kHz

Η περιγραφόμενη τοπολογία μαζί με μια αρχική τυχαία ανάθεση ομάδων πόρων στους χρήστες φαίνεται στην Εικόνα 6.2.



**Εικόνα 6.2 Τοπολογία μιας κυψέλης με 8 χρήστες κυψελωτής και 24 χρήστες άμεσης επικοινωνίας**

Τα κέρδη των καναλιών, λαμβάνοντας υπόψιν τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας, μεταξύ του πομπού του χρήστη  $i$  και του δέκτη του χρήστη  $j$  μοντελοποιούνται από τον παρακάτω τύπο:

$$g_{ij} = \frac{l}{d_{ij}^n}$$

όπου  $d$  είναι η απόσταση μεταξύ πομπού του χρήστη  $i$  και δέκτη του χρήστη  $j$ ,  $n$

εκθέτης απωλειών και  $l$  είναι μια σταθερά κλιμάκωσης.

Αν δεν αναφέρεται διαφορετικά ο αριθμός των χρηστών κυψελωτής επικοινωνίας είναι 8, όσος κι ο αριθμός των διαφορετικών διαθέσιμων καναλιών μετάδοσης, οι χρήστες άμεσης επικοινωνίας είναι 24 και η μέγιστη τιμή ισχύος εκπομπής για τους χρήστες κυψελωτής επικοινωνίας είναι 2 Watts ενώ για τους χρήστες άμεσης επικοινωνίας είναι 0,01 Watts.

Στη συνέχεια αξιολογείται ένα ένα από τα δύο στάδια της προτεινόμενης προσέγγισης και τέλος αξιολογείται μια βελτιωμένη-επαναληπτική προσέγγιση κατά την οποία εκτελούνται τα βήματα της παραπάνω προσέγγισης επαναληπτικά. Αρχικά θεωρείται ότι κάθε χρήστης κυψελωτής επικοινωνίας έχει επιλέξει μια από τις διαθέσιμες ομάδες πόρων όπως φαίνεται

στον Πίνακα 6.1. Στον Πίνακα 6.3 φαίνεται η κατανομή των ομάδων πόρων σε χρήστες άμεσης επικοινωνίας μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου 1.

**Πίνακας 6.2 Αρχική ανάθεση χρηστών σε ομάδες πόρων**

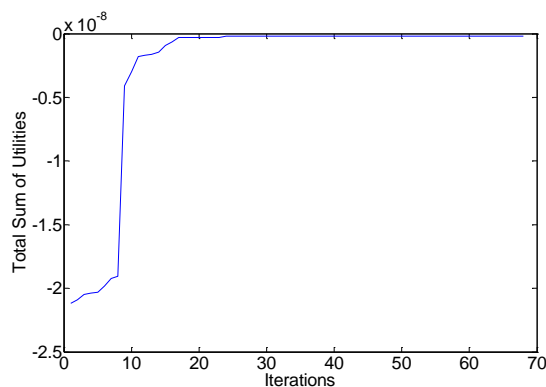
RBs	1	2	3	4	5	6	7	8
Χρήστες	1	2	3	4	5	6	7	8
	-	9	10	11	12	13	14	15
	16	17	18	19	20	21	22	23
	24							

**Πίνακας 6.3 Ανάθεση χρηστών σε ομάδες πόρων μετά την εκτέλεση του Αλγορίθμου 1**

RBs	1	2	3	4	5	6	7	8
Χρήστες	1	2	3	4	5	6	7	8
	21	15	16	17	13	14	9	10
	27	30	26	18	19	24	11	12
		32	31	20	22	29	23	25
					28			

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.3, είναι σαφές ότι οι χρήστες άμεσης επικοινωνίας επιλέγουν ομάδες πόρων που είναι κατειλημμένες από χρήστες κυψελωτής επικοινωνίας που βρίσκονται αρκετά μακριά από αυτούς. Έτσι επιτυγχάνεται μείωση των συνολικών παρεμβολών λόγω της χωρικής αποστασιοποίησης μεταξύ χρηστών που επιλέγουν κοινές ομάδες πόρων.

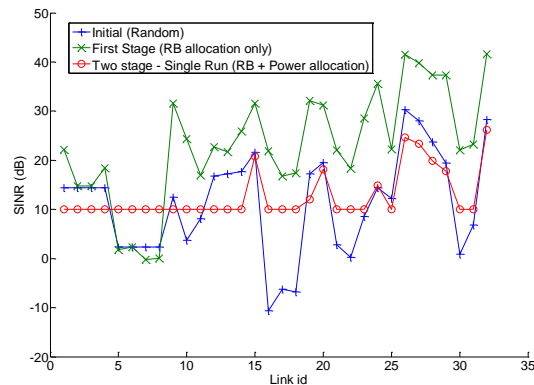
Στη συνέχεια, στην Εικόνα 6.3 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη του συνολικού αθροίσματος των συναρτήσεων χρησιμότητας στο δίκτυο.



**Εικόνα 6.3 Χρονική εξέλιξη του συνολικού αθροίσματος των συναρτήσεων χρησιμότητας**

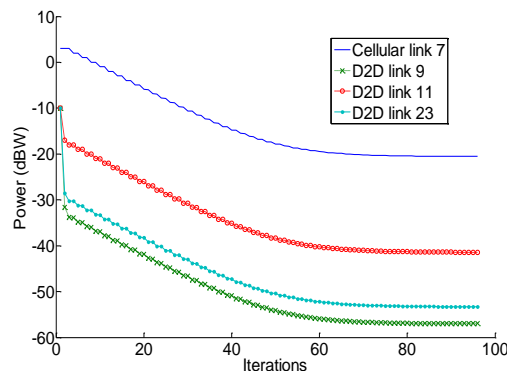
Παρατηρούμε ότι σε κάθε βήμα εκτέλεσης του αλγορίθμου 1 οι συνολικές παρεμβολές που ισούνται με το αντίθετο του συνολικού αθροίσματος των συναρτήσεων χρησιμότητας, διαρκώς μειώνονται γεγονός το οποίο επιβεβαιώνει την αντίστοιχη επιθυμητή ιδιότητα των δυναμικών παιγνίων. Επίσης, παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος 1 συγκλίνει μετά από ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων.

Στην Εικόνα 6.4 φαίνεται η βελτίωση του σηματοθορυβικού λόγου στο δέκτη κάθε χρήστη μετά από την εφαρμογή του αλγορίθμου 1.



**Εικόνα 6.4** Σηματοθορυβικός λόγος μετά από την εφαρμογή του αλγορίθμου 1

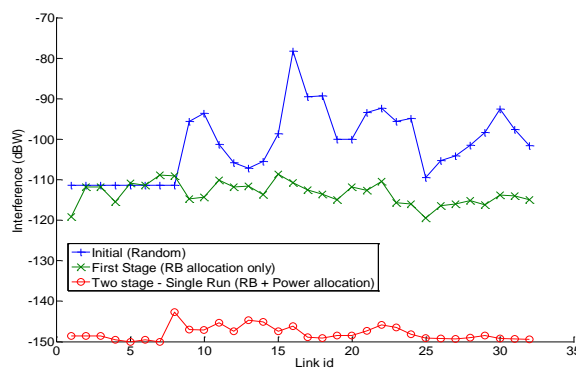
Μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου 1 και με δεδομένο το διάνυσμα επιλογών ομάδων πόρων όλων των χρηστών όπως φαίνεται στον Πίνακα 2, εκτελείται ο αλγόριθμος 2. Αυτός ο αλγόριθμος είναι πλήρως καταναμημένος κι εκτελείται από κάθε χρήστη. Στην Εικόνα 6.5, φαίνεται η σύγκλιση του αλγορίθμου 2 για την ομάδα πόρων 7.



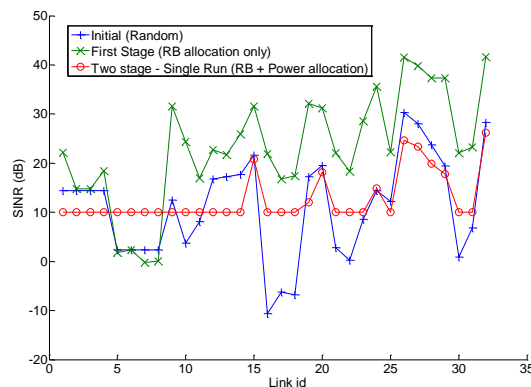
**Εικόνα 6.5** Ισχύς εκπομπής σε σχέση με τον αριθμό των επαναλήψεων για τους χρήστες της ομάδας πόρων 7.

Η περίπτωση της ομάδας πόρων 7 ήταν η πιο απαιτητική από πλευράς αριθμού επαναλήψεων για σύγκλιση. Παρατηρείται ότι ακόμη και στην περίπτωση αυτή ο αριθμός των απαιτούμενων επαναλήψεων για ουσιαστική σύγκλιση του αλγορίθμου 7 είναι περίπου 50. Όλοι οι χρήστες που συμμετέχουν στο παίγνιο για την ομάδα πόρων 7 ξεκινούν με αρχική τιμή ισχύος εκπομπής τη μέγιστη δυνατή τιμή τους.

Στη συνέχεια αξιολογούμε τη μείωση που επιτυγχάνεται σε κάθε δέκτη μετά από την εφαρμογή του αλγορίθμου 1, την εφαρμογή του αλγορίθμου 2 σε σχέση με τις αρχικά καταγραφόμενες παρεμβολές. Παρατηρείται ότι γίνεται σημαντική μείωση των παρεμβολών μετά την εφαρμογή της προτεινόμενης προσέγγισης δύο σταδίων. Σημειώνεται ότι για το δεύτερο στάδιο της προσέγγισης κάθε χρήστη θεωρείται ότι έχει ως ελάχιστη απαίτηση για σηματοθορυβικό λόγο τα 10dB. Από την Εικόνα 6.6 παρατηρείται σημαντική βελτίωση των αισθανόμενων παρεμβολών σε κάθε δέκτη του δικτύου. Επίσης από την Εικόνα 6.7 παρατηρείται ότι αυτό είναι εθικό με παράλληλη επίτευξη των απαιτούμενων επιπέδων σηματοθορυβικού λόγου στους δέκτες των συσκευών.



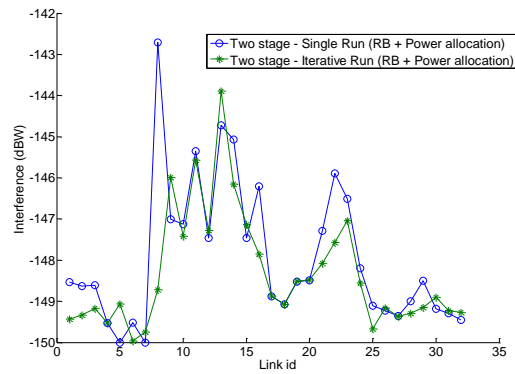
**Εικόνα 6.6 Παρεμβολές κάθε χρήστη αρχικά, μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου 1 και μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου 2**



**Εικόνα 6.7 Σηματοθορυβικός λόγος στο δέκτη κάθε χρήστη πριν και μετά τη συνδυαστική εκτέλεση των αλγορίθμων 1 και 2**

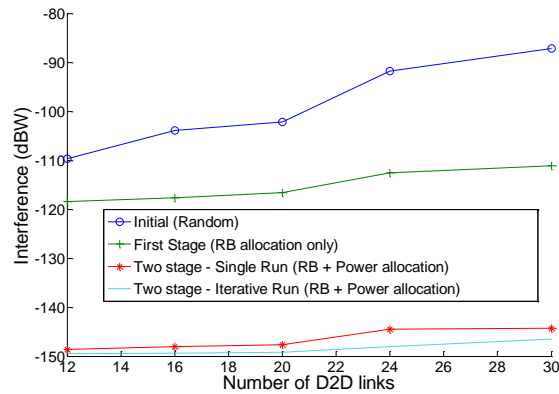
Στη συνέχεια παρατίθεται ένα γράφημα με τις παρεμβολές στην περίπτωση της συνδυαστικής εκτέλεσης των αλγορίθμων 1 και 2 από μια φορά και στην περίπτωση της επαναληπτικής συνδυαστικής εκτέλεσης των αλγορίθμων 1 και 2. Κατά την επαναληπτική εκτέλεση το διάνυσμα ομάδων πόρων κι ισχύος εκπομπής που προκύπτει από την πρώτη συνδυαστική εκτέλεση των αλγορίθμων 1 και 2 λειτουργεί ως είσοδος στον αλγόριθμο 1. Η

συνδυαστική εκτέλεση των αλγορίθμων συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση ως προς τα διανύσματα ομάδων πόρων και ισχύος εκπομπής.

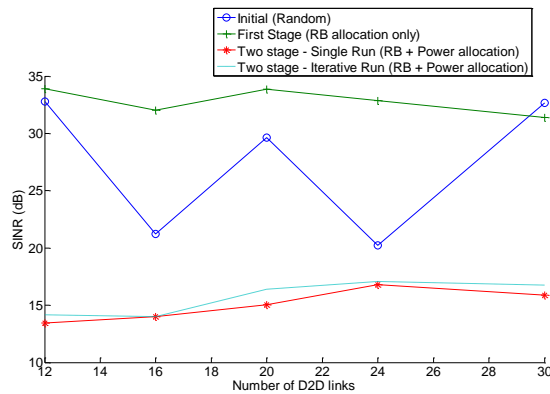


**Εικόνα 6.8** Παρεμβολές στους δέκτες των χρηστών στην περίπτωση της μοναδικής συνδυαστικής εκτέλεσης και στην περίπτωση της επαναληπτικής συνδυαστικής εκτέλεσης

Στη συνέχεια αξιολογείται η προτεινόμενη προσέγγιση δύο σταδίων καθώς αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών άμεσης επικοινωνίας.



**Εικόνα 6.9** Παρεμβολές σε σχέση με τον αριθμό των χρηστών άμεσης επικοινωνίας



**Εικόνα 6.10** Σηματοθορυβικός λόγος σε σχέση με τον αριθμό των χρηστών άμεσης επικοινωνίας

Παρατηρείται ότι η παραπάνω προσέγγιση είναι εξίσου αποτελεσματική και καθώς αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών άμεσης επικοινωνίας.

### **6.7.2. Αξιολόγηση ΣΙ Nash**

Τέλος, αξιολογείται η ποιότητα του υπολογιζόμενου ΣΙ Nash ως προς τη μετρική του συνολικού αθροίσματος των συναρτήσεων χρησιμότητας των χρηστών. Για την προσέγγιση του 1<sup>ου</sup> σταδίου καθένα από τα υπολογιζόμενα ΣΙ Nash είναι και τουλάχιστον τοπικό βέλτιστο της συνάρτησης δυναμικού. Η συνάρτηση δυναμικού τυχαίνει σε αυτή την περίπτωση να ταυτίζεται με το αντίθετο του συνολικού επιπέδου παρεμβολών στο δίκτυο. Οπότε επιθυμούμε τη διαρκή βελτίωσή της, γεγονός το οποίο επιτυγχάνεται μέσω του αλγορίθμου 1 της βέλτιστης απόκρισης. Παρόλα αυτά δεν υπάρχει κάποια θεωρητική εγγύηση για την ποιότητα του υπολογιζόμενου ΣΙ Nash από τη στιγμή που δεν μπορούμε να υπολογίσουμε ούτε θεωρητικά αλλά ούτε και πρακτικά το ολικό βέλτιστο (ο αριθμός των διαφορετικών αναθέσεων ομάδων πόρων σε χρήστες αυξάνει εκθετικά σε σχέση με τον αριθμό των χρηστών άμεσης επικοινωνίας).

Για αυτό το λόγο, έγινε μόνο μια πειραματική αξιολόγηση των υπολογιζόμενων ΣΙ Nash. Εκτελέστηκε ο αλγόριθμος 1 ξεκινώντας από διαφορετικές αναθέσεις ομάδων πόρων σε χρήστες άμεσης επικοινωνίας και για την ίδια τοπολογία υπολογίστηκαν τα ΣΙ Nash στα οποία συνέκλινε ο αλγόριθμος. Διαπιστώθηκε ότι οι τιμές του συνολικού αθροίσματος των συναρτήσεων χρησιμότητας κυμαίνονταν από  $-2,2 \cdot 10^{-10}$  σε  $-1,67 \cdot 10^{-10}$ . Επομένως πάντα το υπολογιζόμενο ΣΙ Nash απέκλινε το πολύ 5% από τη μέγιστη παρατηρηθείσα τιμή.

Σχετικά με το 2<sup>ο</sup> στάδιο της προτεινόμενης προσέγγισης έχει αποδειχθεί με βάση και την εργασία [Yat95] ότι τα σχετικά παίγνια για κάθε ομάδα πόρων έχουν μοναδικά ΣΙ Nash. Δυστυχώς, δεν μπορεί να υπολογιστεί θεωρητικά (δεν είναι γνωστό) πόσο μακριά είναι το ΣΙ Nash αυτό από το σημείο βελτίστου του συνολικού αθροίσματος των συναρτήσεων χρησιμότητας του παιγνίου (κοινωνικό βέλτιστο). Αυτό μπορεί να αξιολογηθεί πειραματικά μόνο μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων.

### **6.7.3. Συγκριτική Αξιολόγηση Προτεινόμενης Προσέγγισης δύο σταδίων**

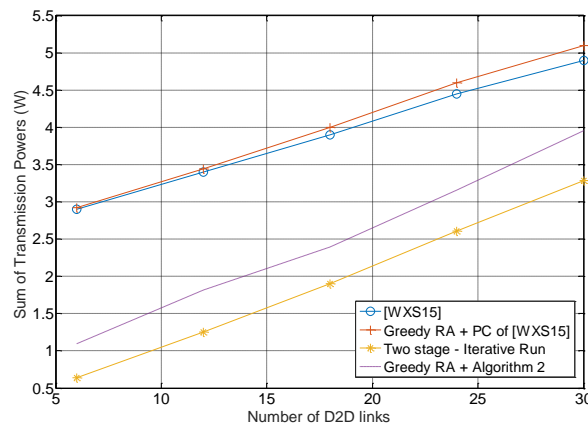
Στο υποκεφάλαιο αυτό αξιολογείται η προτεινόμενη προσέγγιση σε σχέση με δύο άλλες της σύγχρονης σχετικής βιβλιογραφίας [WXS15], [ZHS10]. Η προσέγγιση στην εργασία [WXS15] αποτελείται από δύο στάδια με στόχο τη βελτιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης σε σχέση με την καταναλισκόμενη ισχύ. Το πρώτο στάδιο αφορά την κατανομή καναλιών μετάδοσης και

το δεύτερο την κατανομή ισχύος εκπομπής. Η προσέγγιση στην εργασία [ZHS10] είναι μια άπληστη προσέγγιση η οποία έχει ως στόχο τη βελτιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης. Πιο συγκεκριμένα αναθέτει την ομάδα πόρων που έχει καταλάβει ο χρήστης κυψελωτής επικοινωνίας με το καλύτερο κέρδος καναλιού στο χρήστη άμεσης επικοινωνίας με το χαμηλότερο κέρδος καναλιού μεταξύ του κυψελωτού χρήστη και του δέκτη του εν λόγω χρήστη άμεσης επικοινωνίας. Η προσέγγιση [ZHS10] εμπλουτίζεται με την προσέγγιση για την κατανομή ισχύος εκπομπής που προτείνεται από τον αλγόριθμο 2 αλλά και από την εργασία [WXS15].

Οι παράμετροι της προσομοίωσης φαίνονται παρακάτω και τα αποτελέσματα της σύγκρισης στις επόμενες δύο εικόνες, Εικόνα 6.11 και Εικόνα 6.12.

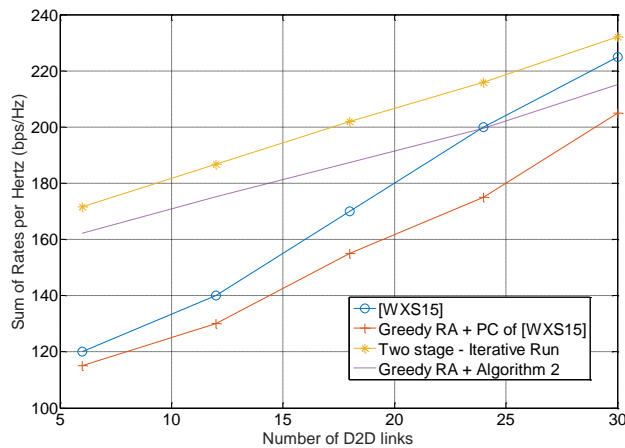
**Πίνακας 6.4 - Τιμές παραμέτρων προσομοίωσης**

Παράμετροι	Τιμές
Ακτίνα κυψέλης	350m
Κατανομή χρηστών	Τυχαία τοποθετημένοι
Αριθμός χρηστών κυψελωτής επικ.	30
Αριθμός ομάδων πόρων	30
Αριθμός χρηστών άμεσης επικ.	6-30
Μέγιστη ισχύς εκπομπής	200mW
Εύρος καναλιού	180kHz



**Εικόνα 6.11 Σύγκριση του αθροίσματος της ισχύος εκπομπής σε σχέση με τη βιβλιογραφία**





Εικόνα 6.12 Σύγκριση του αθροίσματος των ρυθμών μετάδοσης ανά μονάδα εύρους ζώνης σε σχέση με τη βιβλιογραφία

## 6.8. Ανακεφαλαιωτικά Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό διατυπώθηκε το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης των συνολικών παρεμβολών στην άνω ζεύξη ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας των χρηστών. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος αυτού είναι οι αναθέσεις ομάδων πόρων στους χρήστες του δικτύου καθώς και η ισχύς εκπομπής των χρηστών αυτών. Το πρόβλημα αφορά την κατανομή ομάδων πόρων κι ισχύος εκπομπής παρουσία μιας μόνο κυψέλης. Εντός της κυψέλης, βρίσκονται χρήστες κυψελωτής κι άμεσης επικοινωνίας. Θεωρείται ότι υπάρχει ικανός αριθμός από ομάδες πόρων για την κάλυψη των αναγκών εξυπηρέτησης των χρηστών κυψελωτής επικοινωνίας. Καθένας από αυτούς καταλαμβάνει διαφορετική ομάδα πόρων όπως οι προδιαγραφές από την ομάδα εργασίας της 3GPP ορίζουν. Οι χρήστες άμεσης επικοινωνίας επαναχρησιμοποιούν τις ομάδες πόρων των χρηστών κυψελωτής επικοινωνίας χωρίς περιορισμό αλλά με στόχο τη μείωση των συνολικών παρεμβολών του δικτύου. Επίσης οι χρήστες διαθέτουν διαφορετικές απαιτήσεις ως προς το σηματοθορυβικό λόγο γεγονός το οποίο λαμβάνεται υπόψιν κατά τη διαδικασία της κατανομής της ισχύος εκπομπής.

Το πρόβλημα αυτό της συνδυαστικής κατανομής ομάδων πόρων κι ισχύος εκπομπής στην άνω ζεύξη ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας αποτελεί ένα πρόβλημα μικτού ακέραιου προγραμματισμού. Για τα προβλήματα της κατηγορίας αυτής σύμφωνα με τη βιβλιογραφία υπάρχουν μόνο αλγόριθμοι NP-hard πολυπλοκότητας που τα επιλύουν με ακριβή τρόπο. Οι αλγόριθμοι αυτοί αρκούνται σε εξαντλητική αναζήτηση όλων των πιθανών περιπτώσεων – λύσεων αλλά καθώς ο αριθμός των χρηστών του δικτύου αυξάνει,

η πρακτική υλοποίηση τέτοιων προσεγγίσεων καθίσταται ανέφικτη από υπολογιστική άποψη. Για αυτό το λόγο προτάθηκε η παραπάνω προσέγγιση δύο σταδίων για την επίλυση του συνδυαστικού προβλήματος.

Η προτεινόμενη στο κεφάλαιο αυτό προσέγγιση δύο σταδίων λύνει το πρόβλημα με προσεγγιστικό αλλά καταναμημένο τρόπο και παράλληλα με σχετικά χαμηλή πολυπλοκότητα. Η προσέγγιση αυτή διαχωρίζει το πρόβλημα σε δύο φάσεις: Πρώτα επιλύεται το πρόβλημα κατανομής ομάδων πόρων με σταθερή ισχύ εκπομπής. Στη συνέχεια με δεδομένη τη λύση του πρώτου σταδίου δηλ. τις αναθέσεις ομάδων πόρων σε χρήστες επιλύεται το πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής για τις διαφορετικές διαθέσιμες ομάδες πόρων του συστήματος.

Στο πρώτο στάδιο το πρόβλημα μοντελοποιείται ως ένα ακριβές δυναμικό παίγνιο του οποίου η συνάρτηση δυναμικού ταυτίζεται με το αντίθετο των συνολικών παρεμβολών του δικτύου. Λόγω των επιθυμητών ιδιοτήτων των ακριβών δυναμικών παιγνίων η ύπαρξη τουλάχιστον ενός ΣΙ Nash είναι εξασφαλισμένη καθώς κι ένας αλγόριθμος βέλτιστης απόκρισης ο οποίος συγκλίνει σε αυτό μετά από ένα πεπερασμένο αριθμό επαναλήψεων. Στην πράξη εκτελέστηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις και στη μεγάλη πλειονότητα αυτών διαπιστώθηκε ότι ο αλγόριθμος αυτός συγκλίνει μετά από ένα αρκετά μικρό αριθμό επαναλήψεων. Στην πράξη χρειάστηκαν περίπου 2-3 γύροι λήψης απόφασης από κάθε παίχτη του παιγνίου προκειμένου να εξασφαλιστεί η σύγκλιση του αλγορίθμου στο επιθυμητό ΣΙ Nash. Σε κάθε βήμα εκτέλεσης του αλγορίθμου αυτού εκτός από τη συνάρτηση χρησιμότητας κάθε χρήστη του παιγνίου βελτιώνεται κι η συνολική συνάρτηση χρησιμότητας του δικτύου η οποία ισούται με το συνολικό επίπεδο παρεμβολών στο δίκτυο. Αυτό οφείλεται στην ιδιότητα των δυναμικών παιγνίων περί ύπαρξης πεπερασμένου μονοπατιού βελτίωσης. Η ιδιότητα αυτή επιβεβαιώθηκε και μέσω των αριθμητικών προσομοιώσεων.

Όπως περιγράφεται παραπάνω, μόλις ολοκληρωθεί η εκτέλεση του αλγορίθμου 1 προκύπτει ένα σύνολο από αναθέσεις ομάδων πόρων στους χρήστες άμεσης επικοινωνίας του δικτύου. Για κάθε διαθέσιμη ομάδα πόρων διατυπώνεται ένα παίγνιο κατανομής ισχύος εκπομπής για το οποίο αποδεικνύεται η ύπαρξη τουλάχιστον ενός ΣΙ Nash. Λόγω της ιδιότητας της κανονικής συνάρτησης για τη συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης του παιγνίου αποδεικνύεται ότι υπάρχει κι ένας αλγόριθμος βέλτιστης απόκρισης που συγκλίνει σε αυτό. Ο εν λόγω αλγόριθμος δηλ. ο αλγόριθμος 2 εκτελείται για κάθε διαθέσιμη ομάδα πόρων προκειμένου να βρεθεί η απαιτούμενη ισχύ εκπομπής για κάθε χρήστη του δικτύου. Ο αλγόριθμος 2 είναι πλήρως καταναμημένος, κι όπως προκύπτει από το πόρισμα 2, κάθε χρήστης επιλέγει την ελάχιστη απαιτούμενη ισχύ εκπομπής για να ικανοποιήσει την απαίτησή του για το σηματοθορυβικό λόγο κι αν αυτή ξεπερνά τη μέγιστη δυνατή τιμή ισχύος εκπομπής του, εκπέμπει με τη μέγιστη τιμή. Για τον αλγόριθμο αυτό, έχει αποδειχθεί ότι συγκλίνει εντός πεπερασμένου αριθμού

βημάτων. Στην πράξη, στις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν στη χειρότερη περίπτωση αυτός ο αριθμός δεν ξεπερνούσε τις 50 σε μια ομάδα πόρων που μοιράζονται 4 χρήστες.

Μέσω της εκτέλεσης των αριθμητικών προσομοιώσεων επιβεβαιώθηκαν τα παραπάνω θεωρητικά συμπεράσματα. Πιο συγκεκριμένα μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου 1 για το πρώτο στάδιο της προσέγγισης επιβεβαιώθηκε ότι όχι μόνο οι συνολικές παρεμβολές του δικτύου μειώνονται αισθητά αλλά και οι παρεμβολές σε κάθε δέκτη του δικτύου. Κατά συνέπεια αυξάνεται ο σηματοθορυβικός λόγος αφού η ισχύς εκπομπής σε αυτό το στάδιο παραμένει σταθερή. Με την επακόλουθη εφαρμογή του αλγορίθμου 2 το επίπεδο των παρεμβολών μειώνεται ακόμη περισσότερο κι ο αριθμός των χρηστών που ικανοποιούν την απαίτησή τους για σηματοθορυβικό λόγο αυξάνεται σημαντικά. Τέλος δοκιμάστηκε μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων η επαναληπτική εκτέλεση του συνδυασμού των αλγορίθμων 1 και 2. Διαπιστώθηκε η περαιτέρω βελτίωση των καταγραφόμενων μεγεθών δηλ. παρεμβολών, σηματοθορυβικού λόγου όχι όμως σε ιδιαίτερα σημαντικό βαθμό.

Τέλος, η προτεινόμενη προσέγγιση αξιολογήθηκε σε σύγκριση με δύο άλλες πρόσφατες προσεγγίσεις [WXS15], [ZHS10] της βιβλιογραφίας που στόχο έχουν την ενεργειακά αποδοτική κατανομή πόρων σε ίδια δικτυακή αρχιτεκτονική. Βρέθηκε μετά από εκτεταμένο αριθμό προσομοιώσεων ότι η προτεινόμενη προσέγγιση υπερτερεί τόσο ως προς τη συνολικά καταναλισκόμενη ισχύ εκπομπής όσο κι ως προς το συνολικό ρυθμό μετάδοσης ανά μονάδα χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης.



## 7. Διαχείριση Παρεμβολών σε περιβάλλον πολλαπλών κυψελών

Το πρόβλημα της διαχείρισης παρεμβολών σε ένα ασύρματο κυψελωτό δίκτυο αποτελεί ένα πρόβλημα κεφαλαιώδους σημασίας για την αποδοτική λειτουργία του δικτύου. Στο κεφάλαιο αυτό επεκτείνουμε το προηγούμενο πρόβλημα ελαχιστοποίησης παρεμβολών σε μια κυψέλη για την περίπτωση πολλαπλών γειτονικών κυψελών [KTP17a], [KTP17b]. Στην περίπτωση αυτή εμφανίζονται παρεμβολές τόσο μεταξύ χρηστών κυψελωτής όσο και μεταξύ χρηστών άμεσης επικοινωνίας. Αυτό συμβαίνει επειδή γίνεται επαναχρησιμοποίηση ομάδων πόρων όχι μόνο μεταξύ χρηστών άμεσης επικοινωνίας εντός μιας κυψέλης αλλά και μεταξύ των χρηστών κυψελωτής κι άμεσης επικοινωνίας διαφορετικών γειτονικών κυψελών. Για αυτό το λόγο είναι αναγκαίο να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της μείωσης των συνολικών παρεμβολών στο δίκτυο λαμβάνοντας υπόψιν και τις παρεμβολές μεταξύ χρηστών κυψελωτής κι άμεσης επικοινωνίας γειτονικών κυψελών [BPG09], [FKR09], [SUM16].

### 7.1. Σχετικές Εργασίες

Οι πιο πρόσφατες σχετικές εργασίες στην περιοχή αυτή είναι οι παρακάτω: [JWS16], [HYS15], [HSC15], [DAM16], [EAH09], [EHB08]. Το πρόβλημα της διαχείρισης παρεμβολών σε ένα ασύρματο κυψελωτό δίκτυο πολλαπλών κυψελών έχει από το παρελθόν απασχολήσει τη βιβλιογραφία [EAH09], [EHB08]. Στις εργασίες αυτές οι συγγραφείς προσπαθούν να μειώσουν τις συνολικές παρεμβολές του δικτύου κάνοντας χρήση παιγνιοθεωρητικών μεθόδων. Στις εργασίες αυτές γίνεται η υπόθεση ότι υπάρχει, μεταξύ διαφορετικών κυψελών, χωρική συμμετρία της παραγόμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης εντός κάθε κυψέλης. Με αυτό τον τρόπο σχεδιάζονται αλγόριθμοι υπολογισμού του ΣΙ που λαμβάνουν υπόψιν μόνο τις αισθητές παρεμβολές σε κάθε κυψέλη. Για τα προτεινόμενα σχήματα αυτά αποδεικνύεται η θεωρητική τους σύγκλιση αλλά και δείχνεται η σύγκλιση τους υπό διαφορετικά πρακτικά σενάρια.

Στην εργασία [HYS15] μελετάται το πρόβλημα κατανομής ομάδων πόρων μεταξύ ενός χρήστη άμεσης επικοινωνίας και πολλαπλών χρηστών κυψελωτής επικοινωνίας γειτονικών κυψελών. Δε μελετώνται οι πιθανές αλληλεπιδράσεις μεταξύ χρηστών άμεσης επικοινωνίας είτε της ίδιας είτε γειτονικών κυψελών. Στην εργασία [HSC15] γίνεται επέκταση της εργασίας [HYS15] έτσι ώστε να αντιμετωπιστεί και η περίπτωση που ένας χρήσης άμεσης επικοινωνίας ο οποίος βρίσκεται σε μια αλληλεπικαλυπτόμενη περιοχή γειτονικών κυψελών μοιράζεται

κοινές ομάδες πόρων με παραπάνω από ένα ΣΒ. Κι εδώ δεν αντιμετωπίζεται η περίπτωση ταυτόχρονης συνύπαρξης πολλαπλών χρηστών κυψελωτής επικοινωνίας σε κάθε κυψέλη. Στην εργασία [DAM16] οι συγγραφείς έχουν στόχο τη μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης των χρηστών σε ένα δίκτυο πολλαπλών κυψελών με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας. Διατυπώνουν το πρόβλημα της κατανομής ομάδων πόρων ως ένα ακριβές δυναμικό παίγνιο και προτείνουν την επίλυση του μέσω ενός προσεγγιστικού αλγορίθμου καλύτερης απόκρισης. Στην εργασία [JWS16] επιλύεται το πρόβλημα κατανομής ομάδων πόρων κι ισχύος εκπομπής σε ένα ασύρματο δίκτυο πολλαπλών κυψελών με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας. Στόχος των συγγραφέων είναι η μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης των χρηστών. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού γίνεται η υπόθεση της τμηματικής ανάθεσης πόρων σε μια εσωτερική και μια εξωτερική γεωγραφική περιοχή εντός της κάθε κυψέλης.

## **7.2. Συμβολή & Καινοτομία**

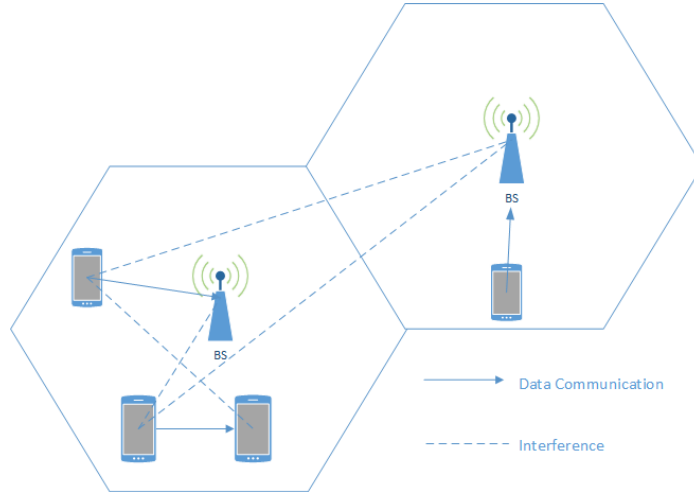
Στην προτεινόμενη σε αυτή τη διδακτορική διατριβή προσέγγιση μοντελοποιείται το πρόβλημα της συνδυαστικής κατανομής ομάδων πόρων κι ισχύος εκπομπής σε ένα δίκτυο πολλαπλών κυψελών με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας. Το πρόβλημα επιλύεται σε δύο στάδια: Πρώτον διατυπώνεται το πρόβλημα κατανομής ομάδων πόρων υπό σταθερή ισχύ εκπομπής και δεύτερον με δεδομένο το διάνυσμα επιλογής ομάδων πόρων από τους χρήστες, επιλύεται το πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής στην άνω ζεύξη.

Τα καινοτομικά στοιχεία της προτεινόμενης προσέγγισης σε σχέση με την υπάρχουσα βιβλιογραφία συνίστανται

- στην επίλυση του προβλήματος αυτού στο συνδυαστικό πεδίο ομάδων πόρων κι ισχύος εκπομπής χωρίς τον περιορισμό της τμηματικής ανάθεσης πόρων σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές εντός κάθε κυψέλης
- στη δυνατότητα των χρηστών άμεσης επικοινωνίας να επαναχρησιμοποιήσουν ομάδες πόρων που έχουν ανατεθεί τόσο σε χρήστες κυψελωτής όσο και σε άλλους χρήστες άμεσης επικοινωνίας. Δεν υφίσταται περιορισμός ως προς τον αριθμό των χρηστών άμεσης επικοινωνίας που μπορούν να μοιράζονται μια κοινή ομάδα πόρων.
- στη σχεδίαση αλγορίθμων κατανομής πόρων που συνδυάζουν κατανεμημένα χαρακτηριστικά τόσο για την επιλογή ομάδας πόρων όσο και για την επιλογή ισχύος εκπομπής
- στη δυνατότητα υποστήριξης χρηστών με διαφορετικές απαιτήσεις ως προς το σηματοθορυβικό λόγο στο δέκτη τους.

### 7.3. Μοντέλο Συστήματος

Θεωρείται μια αρχιτεκτονική ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου πολλαπλών κυψελών όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.1.



**Εικόνα 7.1 Μοντέλο Συστήματος ενός ασύρματου δικτύου πολλαπλών κυψελών με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας**

Υπάρχουν  $E$  γειτονικές κυψέλες. Στο κέντρο κάθε κυψέλης βρίσκεται ο ΣΒ και μελετάται η προς τα άνω ζεύξη. Κάθε ΣΒ και κάθε κινητή συσκευή διαθέτει μια ομοιοκατευθυντική κεραία. Σε κάθε κυψέλη  $i$  βρίσκεται ένας συγκεκριμένος αριθμός  $L_i$  χρηστών κυψελωτής επικοινωνίας κι ένας αριθμός  $D_i$  χρηστών άμεσης επικοινωνίας. Θεωρείται ότι κάθε κυψέλη διαθέτει ένα συγκεκριμένο αριθμό ομάδων πόρων  $R_i$ . Οι ομάδες πόρων αυτές χρησιμοποιούνται από τους χρήστες κυψελωτής επικοινωνίας, καθένας από τους οποίους χρησιμοποιεί διαφορετική (ορθογωνιότητα των ομάδων πόρων μεταξύ χρηστών κυψελωτής επικοινωνίας της ίδιας κυψέλης). Οι χρήστες άμεσης επικοινωνίας επαναχρησιμοποιούν τις διαθέσιμες ομάδες πόρων κάθε κυψέλης. Επεκτείνεται η έννοια της κυψέλης για να καλύψει και τους χρήστες άμεσης επικοινωνίας. Πιο συγκεκριμένα ως κυψέλη θεωρείται κάθε δέκτης του δικτύου είτε αυτός αφορά το ΣΒ είτε ένα χρήστη άμεσης επικοινωνίας.

Αρχικά, ορίζεται ο σηματοθορυβικός λόγος ενός χρήστη  $u$  της κυψέλης  $i$  που χρησιμοποιεί την ομάδα πόρων  $c$  ως εξής:

$$\gamma_u^c = \frac{G_u^{i,c} \cdot p_u^c}{\sum_{j \neq i} \sum_{v \in V_j} \delta_j(v,c) G_v^{i,c} \cdot p_j^c + \sigma^2} \quad (7.1)$$

Επεξηγηματικά, στον προηγούμενο ορισμό,  $P_u^c$  είναι η ισχύς εκπομπής του χρήστη  $u$  της κυψέλης  $i$  στην ομάδα πόρων  $c$ ,  $G_u^{i,c}$  είναι το απευθείας κέρδος του καναλιού  $c$  του χρήστη

$u$  της κυψέλης  $i$ ,  $G_v^{i,c}$  είναι το κέρδος του καναλιού μεταξύ του χρήστη  $u$  της κυψέλης  $i$  και της κυψέλης  $j$  και  $V_j$  είναι το σύνολο των χρηστών που ανήκουν στην κυψέλη  $j$  και

$$\delta_i(u,c) = \begin{cases} 1, & \text{εάν ο χρήστης } u \text{ της κυψέλης } i \text{ χρησιμοποιεί την ομάδα πόρων } c \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7.2)$$

Επεκτείνονται οι ορισμοί για τις παρεμβολές που έχουν δοθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο για να καλύψουν και την περίπτωση των πολλαπλών κυψελών καθώς και για την περίπτωση που τα κέρδη των καναλιών εξαρτώνται από την επιλογή των ίδιων των καναλιών μετάδοσης. Στη συνέχεια, ορίζονται οι παρεμβολές που δέχεται μια κυψέλη με τη γενικότερη έννοια, όπως ορίστηκε παραπάνω, και δίνονται από τον παρακάτω τύπο:

$$I_i = \sum_{c=1}^{R_i} \sum_{u \in V_i} \delta_i(u,c) \sum_{j \neq i} \sum_{v \in V_j} \delta_j(v,c) \cdot G_v^{i,c} \cdot p_v^c + \sigma^2 \quad (7.3)$$

Όπως εξηγήθηκε παραπάνω, επεκτείνεται η έννοια της κυψέλης και για τους χρήστες άμεσης επικοινωνίας. Κάθε ζευγάρι χρηστών άμεσης επικοινωνίας θεωρείται ότι συγκροτεί μια κυψέλη όπου το ρόλο του ΣΒ παίζει ο δέκτης του ζεύγους και το ρόλο του χρήστη ο πομπός του ζεύγους. Επομένως, ένα ζεύγος χρηστών άμεσης επικοινωνίας μπορεί να θεωρηθεί ως μια κυψέλη που εξυπηρετεί ένα χρήστη. Συνεπώς στο σύνολο  $E$  παραπάνω συμπεριλαμβάνουμε εκτός από τις «κλασσικές» κυψέλες με τους ΣΒ, τους δέκτες των ζευγαριών χρηστών άμεσης επικοινωνίας.

Αντίστοιχα οι παρεμβολές που προκαλεί η κυψέλη  $i$  σε όλο το υπόλοιπο δίκτυο που χρησιμοποιεί κοινές ομάδες πόρων με την κυψέλη  $i$  δίνονται από τον παρακάτω τύπο:

$$I_i^{caused} = \sum_{c=1}^{R_i} \sum_{u \in V_i} \delta_i(u,c) p_u^c \sum_{j \neq i, j=1}^E \sum_{v \in V_j} G_u^{j,c} \delta_j(v,c) \quad (7.4)$$

Εναλλακτικά σε μια πιο συμπυκνωμένη μορφή οι σχέσεις (7.3) και (7.4) μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$I_i = \sum_{u \in V_i} \sum_{j \neq i, j=1}^E \sum_{v \in V_j} p_v^c G_u^{j,c} f(c_{v,j}, c_{u,i}) \quad (7.5)$$

$$I_i^c = \sum_{u \in V_i} p_u^c \sum_{j \neq i, j=1}^E \sum_{v \in V_j} G_v^{i,c} f(c_{v,j}, c_{u,i}) \quad (7.6)$$

$$f(c_{v,j}, c_{u,i}) = \sum_{c=1}^{R_i} \delta_i(u,c) \delta_j(v,c) \quad (7.7)$$

όπου



$$f(c_{u_i}, c_{v_j}) = \begin{cases} 1, & \text{εάν ο χρήστης } u \text{ της κυψέλης } i \text{ χρησιμοποιεί κοινή ομάδα πόρων} \\ & \text{με το χρήστη } v \text{ της κυψέλης } j \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7.8)$$

#### 7.4. Διατύπωση Προβλήματος

Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση των συνολικών παρεμβολών στο δίκτυο το οποίο περιλαμβάνει πολλαπλές κυψέλες στη γενική περίπτωση. Παρακάτω διατυπώνεται το σχετικό πρόβλημα στο συνδυαστικό πεδίο των ομάδων πόρων και της ισχύος εκπομπής.

$$\min_{\delta, P} \sum_{i=1}^E I_i \quad (7.9)$$

υπό

$$0 \leq p_u \leq p_u^{\max}, \forall u \in V_i, i \in E \quad (7.10)$$

$$\gamma_u \geq \gamma_u^{\text{tar}}, \forall u \in V_i, \forall i \in E \quad (7.11)$$

$$\sum_c \delta(u, c) = 1, \forall u \in V_i, \forall i \in E \quad (7.12)$$

$$\sum_{u_i \in V_i} \delta(u, c) = 1, \forall c \in C, \forall i \in E \quad (7.13)$$

Ο περιορισμός (7.10) αφορά το πεδίο τιμών ισχύος εκπομπής για όλους τους χρήστες του δικτύου. Ο περιορισμός (7.11) αφορά την απαίτηση για την επίτευξη ενός ελάχιστου επιπέδου σηματοθορυβικού λόγου στο δέκτη. Ο περιορισμός (7.12) σχετίζεται με τη χρήση μιας μόνο ομάδας πόρων από κάθε χρήστη του δικτύου. Ο περιορισμός (7.13) αφορά την ορθογωνιότητα των χρησιμοποιούμενων ομάδων πόρων μεταξύ χρηστών κυψελωτής επικοινωνίας σε όλες τις κυψέλες του δικτύου.

Το παραπάνω πρόβλημα είναι κι αυτό ένα μικτό ακέραιο πρόγραμμα, οπότε αποτελεί ένα πρόβλημα εξαιρετικά υψηλής πολυπλοκότητας. Για αυτό το λόγο προτείνεται μια παρόμοια προσέγγιση δύο σταδίων με αυτή του προηγούμενου κεφαλαίου για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος. Το συνδυαστικό πρόβλημα δηλαδή αναλύεται σε δύο υποπροβλήματα. Στο πρώτο θεωρώντας ότι η ισχύς εκπομπής είναι σταθερή αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της κατανομής ομάδων πόρων. Με δεδομένη τη λύση του πρώτου προβλήματος δηλ. την ανάθεση ομάδων πόρων σε χρήστες επιλύεται το δεύτερο υποπρόβλημα της κατανομής ισχύος εκπομπής για το σύνολο των διαθέσιμων ομάδων πόρων του συστήματος.

#### 7.5. Κατανομή Ομάδων Πόρων

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το πρώτο στάδιο της προτεινόμενης προσέγγισης. Θεωρείται ότι όλοι οι χρήστες εκπέμπουν με σταθερή ισχύ, ίση με τη μέγιστη δυνατή τιμή της ισχύος εκπομπής τους. Οπότε το παραπάνω πρόβλημα βελτιστοποίησης (7.9) παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\min_{\delta} \sum_{i=1}^E I_i \quad (7.14)$$

υπό

$$\sum_c \delta(u, c) = 1, \forall u \in V_i, \forall i \in E \quad (7.15)$$

$$\sum_{u \in V_i} \delta(u, c) = 1, \forall c \in C, \forall i \in E \quad (7.16)$$

$$\gamma_u \geq \gamma_u^{tar}, \forall u \in V_i, \forall i \in E \quad (7.17)$$

$$\text{όπου } I_i = \sum_{u \in V_i} \sum_{j \neq i, j=1}^E \sum_{v \in V_j} p_v^{\max} G_v^{i,c} \sum_{c=1}^{R_i} \delta_i(u, c) \delta_j(v, c) \quad (7.18)$$

Όπως έχει προαναφερθεί οι παραπάνω περιορισμοί (7.15) και (7.16) αφορούν τη χρήση μιας αποκλειστικά ομάδα πόρων από κάθε χρήστη είτε κυψελωτής είτε άμεσης επικοινωνίας και ο (7.16) αφορά την ορθογωνιότητα μεταξύ χρηστών κυψελωτής επικοινωνίας της ίδιας κυψέλης. Το παραπάνω πρόβλημα (7.14) ανήκει σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [PaS98] στην κλάση NP-hard προβλημάτων από άποψη υπολογιστικής πολυπλοκότητας. Για αυτό το λόγο αναζητούμε εναλλακτικούς τρόπους για την προσεγγιστική του επίλυση.

Η ιδέα βασίζεται όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο στη μοντελοποίηση του προβλήματος ως ένα δυναμικό παίγνιο. Σε αυτό το παίγνιο οι κυψέλες (είτε οι ΣΒ είτε οι δέκτες των χρηστών άμεσης επικοινωνίας) αποτελούν τους παίχτες του παιγνίου, οι στρατηγικές των παιχτών είναι οι επιλογές των διαθέσιμων ομάδων πόρων από τους παίχτες. Οι συναρτήσεις χρησιμότητας των παιχτών δίνονται από τον παρακάτω τύπο:

$$U_i(s_i, s_{-i}) = -I_i(s_i, s_{-i}) - I_i^{caused}(s_i, s_{-i}) \quad (7.19)$$

όπου  $s_i$  είναι το σύνολο των ομάδων πόρων που χρησιμοποιεί η κυψέλη  $i$ . (είτε αυτή είναι ΣΒ ο οποίος εξυπηρετεί  $C_i$  χρήστες είτε είναι δέκτης ζεύγους χρηστών άμεσης επικοινωνίας κι εξυπηρετεί ένα χρήστη). Οι ορισμοί των  $I_i(s_i, s_{-i})$  και  $I_i^{caused}(s_i, s_{-i})$  προκύπτουν από τις σχέσεις (7.3) και (7.4) οι οποίοι συγκεντρωτικά δίνονται παρακάτω:

$$I_i(s_i, s_{-i}) = \sum_{u \in V_i} \sum_{j \neq i, j=1}^E \sum_{v \in V_j} p_v^{\max} G_v^{i,c} \sum_{c=1}^{R_i} \delta_i(u, c) \delta_j(v, c) \quad (7.20)$$

$$I_i^{caused}(s_i, s_{-i}) = \sum_{u \in V_i} p_u^{\max} \sum_{j \neq i, j=1}^E \sum_{v \in V_j} G_u^{j,c} \sum_{c=1}^{R_i} \delta_i(u, c) \delta_j(v, c) \quad (7.21)$$

Το μη συνεργατικό παίγνιο  $G = \{N, S, U\}$  (7.22) ορίζεται ως εξής:

- $N$  το σύνολο των κυψελών,
- $S = (s_i, s_{-i}) \forall i \in N, s_i = c_u, \forall u \in V_i$  και
- $U$  το σύνολο των συναρτήσεων χρησιμότητας οι οποίες δίνονται από τον τύπο (7.19). Το παίγνιο  $G$  είναι ένα διμερές συμμετρικό παίγνιο [Ui00]. Στο σημείο αυτό παρατίθεται ο ορισμός ενός διμερούς συμμετρικού παιγνίου.

**Ορισμός: Διμερές Συμμετρικό Παίγνιο**  $G$  ορίζεται ένα παίγνιο  $G = \{N, S, U\}$  όπου  $U_i(s_i, s_{-i}) = \sum_{j \neq i} w_{i,j}(s_i, s_j), \forall i \in N$  και ισχύει ότι  $w_{i,j}(s_i, s_j) = w_{j,i}(s_j, s_i), \forall i \neq j$

Από τον παραπάνω ορισμό συμπεραίνουμε ότι η συνάρτηση χρησιμότητας κάθε παίχτη μπορεί να γραφεί ως ένα άθροισμα συναρτήσεων  $w_{i,j}(s_i, s_j)$  οι οποίες περιγράφουν την αλληλεπίδραση μεταξύ δύο διαφορετικών παιχτών  $i$  και  $j$ . Μάλιστα η αλληλεπίδραση αυτή είναι συμμετρική. Στη συγκεκριμένη περίπτωση του προβλήματος (7.14) μπορεί να δειχθεί ότι το παίγνιο (7.22) είναι ένα διμερές συμμετρικό παίγνιο αν θέσουμε ως

$$w_{i,j}(s_i, s_j) = - \sum_{c=1}^{R_i} \sum_{u \in V_i} \sum_{v \in V_j} \delta_i(u, c) \delta_j(v, c) \left( p_v^{\max} G_v^{i,c} + p_u^{\max} G_u^{j,c} \right) \quad (7.23)$$

Τότε παρατηρούμε ότι  $U_i(s_i, s_{-i}) = \sum_{j \neq i} w_{i,j}(s_i, s_j), \forall i \in N$  και  $w_{i,j}(s_i, s_j) = w_{j,i}(s_j, s_i), \forall i \neq j$ .

Επομένως το παίγνιο  $G$  είναι ένα διμερές συμμετρικό παίγνιο  $G$ . Τα διμερή συμμετρικά παίγνια είναι δυναμικά παίγνια [Ui00] με συνάρτηση δυναμικού

$$Pot(s_i, s_{-i}) = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N, j < i} w_{i,j}(s_i, s_j) = - \sum_{i \in N} \sum_{j \in N, j < i} \sum_{c=1}^{R_i} \sum_{u \in V_i} \sum_{v \in V_j} \delta_i(u, c) \delta_j(v, c) \left( p_v^{\max} G_v^{i,c} + p_u^{\max} G_u^{j,c} \right) \quad (7.24)$$

Αν παρατηρήσουμε το δεύτερο όρο στην εξίσωση (7.24), προχωρώντας σε αλλαγή μεταβλητής μεταξύ  $i$  και  $j$  και εναλλαγή στη σειρά της άθροισης αποδεικνύεται ότι ο παραπάνω όρος ισούται με το ήμισυ των συνολικών παρεμβολών στο δίκτυο. Κατά συνέπεια, η συνάρτηση δυναμικού όπως ορίστηκε στη σχέση (7.24) ταυτίζεται με τις συνολικές παρεμβολές στο δίκτυο. Το ΣΙ Nash του παιγνίου θα αποτελεί και τοπικό βέλτιστο της συνάρτησης δυναμικού δηλ. των συνολικών παρεμβολών στο δίκτυο.

## 7.6. Αλγόριθμος Υπολογισμού ΣΙ Nash

Στο υποκεφάλαιο αυτό προτείνεται ένας αλγόριθμος βέλτιστης απόκρισης ο οποίος συγκλίνει σε ένα από τα επιθυμητά ΣΙ Nash του παιγνίου. Θεωρείται αρχικά ότι όλοι οι παίχτες του παιγνίου έχουν επιλέξει ομάδες πόρων και καθώς εκτελείται ο αλγόριθμος καθένας χρήστης του δικτύου επιλέγει την ομάδα πόρων ή το συνδυασμό από ομάδες πόρων (αν πρόκειται για ΣΒ) που βελτιστοποιεί τη δική του συνάρτηση χρησιμότητας. Λόγω της ιδιότητας των δυναμικών παιγνίων περί ύπαρξης πεπερασμένου μονοπατιού βελτίωσης, η επιλογή αυτή, της κάθε κυψέλης δε βελτιώνει μόνο τη δική της συνάρτηση χρησιμότητας αλλά και τη συνολική συνάρτηση χρησιμότητας του δικτύου.

### 7.6.1. Σειριακή Κατανομή Ομάδων Πόρων

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζουμε έναν αλγόριθμο υπολογισμού του ΣΙ Nash στον οποίο όλοι οι χρήστες-παίκτες του παιγνίου  $G$  λαμβάνουν απόφαση για την τρέχουσα βέλτιστη ομάδα πόρων τους με σειριακό τρόπο. Χρειάζεται δηλ. ένας μηχανισμός ελέγχου της σειράς συμμετοχής των παιχτών στο παίγνιο  $G$  ο οποίος θα διασφαλίζει ότι σε κάθε χρονοσχιμή εκτέλεσης του αλγορίθμου μόνο ένας παίχτης θα λαμβάνει απόφαση. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται ότι σε κάθε χρονική στιγμή βελτιώνεται όχι μόνο η συνάρτηση χρησιμότητας του συμμετέχοντα παίχτη αλλά και η συνάρτηση δυναμικού του παιγνίου  $G$ . Έτσι όπως θα επιβεβαιώσουμε και στο υποκεφάλαιο των αριθμητικών αποτελεσμάτων οι συνολικές παρεμβολές του δικτύου συνεχώς μειώνονται.

#### Αλγόριθμος 1 (Σειριακή Κατανομή Ομάδων Πόρων)

- 1: Counter  $r = 0$ , Converged = false,  $ite(i) = 0$  για κάθε παίχτη  $i$
- 2: For all cells do
- 3: if Converged == false
- 4: then
- $s_i^*(ite_i + 1) = \arg \max_{s_i(ite_i)} U_i(s_i(ite_i), s_{-i}(ite_{-i}))$
- 5: if  $s_i^*(ite_i) \neq s_i^*(ite_i - 1)$
- then  $r = r + 1$ ;
- else
- $r = 0$ ;
- 6: end if.
- 7:  $ite_i = ite_i + 1$ ;
- 8: if  $r = E - 1$  then Converged == true
- end if.
- 9: end if
- 10: end for.

Το κεντρικό μέρος του υπολογισμού του παραπάνω αλγορίθμου αποτελεί η απόφαση για τη βέλτιστη ανάθεση ομάδων πόρων σε χρήστες που γίνεται στη γραμμή 4. Για τον υπολογισμό αυτό κάθε κυψέλη πρέπει να λύσει το παρακάτω πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\underset{s}{\text{maximize}} U_i(s_i, s_{-i}) = - \sum_{c=1}^{R_i} \sum_{u \in V_i} \delta_i(u, c) b_i(u, c) \quad (7.25)$$

υπό

$$\sum_c \delta_i(u, c) = 1, \quad \forall u \in V_i \quad (7.26)$$

$$\sum_{u_i \in V_i} \delta_i(u, c) = 1, \quad \forall c \in C \quad (7.27)$$

όπου

$$b_i(u, c) = \sum_{j \neq i} \sum_{v \in V_j} \delta_j(v, c) \left( p_v^{\max} G_v^{i,c} + p_u^{\max} G_u^{j,c} \right) \quad (7.28)$$

Στο βήμα αυτό θεωρείται ότι όλες οι κυψέλες εκτός από την τρέχουσα, δηλ. την  $i$ , έχουν επιλέξει ομάδα πόρων, επομένως οι όροι  $b_i(u, c)$ , όπως υπολογίζονται από τη σχέση (7.28), είναι γνωστοί στην κυψέλη  $i$ . Το πρόβλημα (7.25) είναι ένα ακέραιο γραμμικό πρόγραμμα. Από τη στιγμή που ο πίνακας των περιορισμών του παραπάνω προβλήματος (7.25) είναι totally unimodular, έπεται ότι κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης για κάθε κυψέλη  $i \in E$  έχει μια ακέραια βέλτιστη λύση. Το παραπάνω πρόβλημα επιλύεται σε πολυωνυμικό χρόνο από τον Hungarian αλγόριθμο [Kuh05]. Επομένως ο παραπάνω αλγόριθμος θα συγκλίνει μετά από ένα πεπερασμένο αριθμό βημάτων σύμφωνα με τις επιθυμητές ιδιότητες των δυναμικών παιγνίων.

Για την εφαρμογή του παραπάνω αλγορίθμου απαιτείται ένας μηχανισμός ο οποίος θα διατηρεί τη σειρά συμμετοχής των παιχτών στο παίγνιο, θα ανταλλάσσει την απαραίτητη πληροφορία για τους απαιτούμενους υπολογισμούς σε κάθε βήμα και τέλος θα ελέγχει τη σύγκλισή του. Πρακτικά αυτό θα μπορούσε να γίνει εάν χρησιμοποιείτο η X2 διεπαφή [TS 36.420] για την ανταλλαγή σηματοδοσίας μεταξύ των συνδεδεμένων κυψελών στο δίκτυο.

Η υπολογιστική πολυπλοκότητα του παραπάνω προβλήματος είναι αντίστοιχη με αυτή των προβλημάτων πολυωνυμικής τοπικής αναζήτησης [Yan09]. Για αυτά τα προβλήματα δεν είναι εγγυημένη η σύγκλιση τους στη λύση τους σε πολυωνυμικό χρόνο όπως έχει προαναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Παρόλα αυτά κατά μέσο όρο η χρονική πολυπλοκότητα των αλγορίθμων αυτών είναι πολυωνυμική με βάση την εργασία [DuG16]. Επίσης, ο προτεινόμενος αλγόριθμος λόγω των επιθυμητών ιδιοτήτων των δυναμικών παιγνίων συγκλίνει μετά από ένα πεπερασμένο αριθμό βημάτων σε ένα τοπικό βέλτιστο της συνολικής συνάρτησης χρησιμότητας. Ταυτόχρονα σε κάθε βήμα εκτέλεσης βελτιώνεται όχι μόνο η συνάρτηση χρησιμότητας κάθε κυψέλης αλλά και η συνολική συνάρτηση χρησιμότητας του δικτύου. Τα παραπάνω διαπιστώθηκαν και πρακτικά μέσω της εκτέλεσης πολλαπλών αριθμητικών προσομοιώσεων.

## 7.6.2. Κατανεμημένος Πιθανοτικός Αλγόριθμος Υπολογισμού του ΣΙ Nash

Στο υποκεφάλαιο αυτό προτείνεται ένας πλήρως κατανεμημένος πιθανοτικός αλγόριθμος υπολογισμού του ΣΙ Nash του παιγνίου  $G$  ο οποίος εκτελείται παράλληλα και κατανεμημένα σε κάθε χρήστη-παίχτη του παιγνίου  $G$ .

### Αλγόριθμος 1.π (Παράλληλη Κατανομή Ομάδων Πόρων)

```
1: Converged = false, ite = 1
2: if Converged==false
3:   for all players do
4:     then (flip a coin) r: random variable in [0,1]
5:     if  $r \leq \frac{1}{N}$ 
6:       then  $s_i^*(ite+1) = \arg \max_{s_i(ite)} U_i(s_i(ite), s_{-i}(ite))$ 
7:       else
8:          $s_i^*(ite+1) = s_i(ite)$ 
9:     end if.
10:   end for
11: if  $s_i^*(ite+1) == s_i^*(ite), \forall i \in N$ 
12:   then Converged == true
13: end if.
14: ite = ite + 1
15: end for.
```

Προκειμένου να λειτουργήσει σωστά ο αλγόριθμος υπολογισμού του ΣΙ θα πρέπει να διασφαλίζεται ότι σε κάθε βήμα εκτέλεσής του μόνο ένας χρήστης του παιγνίου αλλάζει ομάδα πόρων. Η ιδέα για να υλοποιηθεί το παραπάνω χωρίς την επιβάρυνση υπολογιστικά χρονοβόρων μηχανισμών διατήρησης της σειράς συμμετοχής των παιχτών συνίσταται στη λήψη της τρέχουσας βέλτιστης απόφασης από κάθε παίχτη του παιγνίου με μια συγκεκριμένη τιμή πιθανότητας η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη του πλήθους των παιχτών του παιγνίου. Έτσι διασφαλίζεται ότι «κατά μέσο όρο» μόνο ένας χρήστης από τους συμμετέχοντες θα λαμβάνει κάποια απόφαση αλλαγής ομάδας πόρων. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται η αποτελεσματική σύγκλιση του αλγορίθμου στο ζητούμενο ΣΙ Nash.

Τα παραπάνω αξιολογήθηκαν και επιβεβαιώθηκαν με την εκτέλεση αριθμητικών προσομοιώσεων.

## 7.7. Κατανομή Ισχύος Εκπομπής

Λαμβάνοντας ως δεδομένο το διάνυσμα επιλογής ομάδων πόρων από όλες τις κυψέλες του δικτύου, στο υποκεφάλαιο αυτό διατυπώνεται το πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής με στόχο την ελαχιστοποίηση των συνολικών παρεμβολών σε όλες τις κυψέλες του δικτύου.

$$\underset{p}{\text{minimize}} \sum_{i=1}^E I_i \quad (7.29)$$

υπό

$$\left. \begin{array}{l} 0 \leq p_u \leq p_u^{\max} \\ \gamma_u \geq \gamma_u^{\text{tar}} \end{array} \right\} \forall u \in V_i, \forall i \in E \quad (7.30)$$

Το πρόβλημα (7.29) αφορά όλες τις ομάδες πόρων που χρησιμοποιούνται από τους χρήστες του δικτύου. Οι περιορισμοί (7.30) αφορούν τις δυνατές τιμές ισχύος εκπομπής όλων των χρηστών του δικτύου καθώς και τις απαιτήσεις τους ως προς το σηματοθορυβικό λόγο. Με δεδομένο ότι δεν υφίστανται παρεμβολές μεταξύ διαφορετικών ομάδων πόρων, το πρόβλημα (7.29) μπορεί να γραφεί ως πολλαπλά προβλήματα ελαχιστοποίησης παρεμβολών για κάθε διαθέσιμη ομάδα πόρων  $c$  του δικτύου.

$$\underset{p}{\text{minimize}} \sum_{i \in RB_c} \sum_{\substack{j \in RB_c \\ j \neq i}} G_v^{i,c} p_v^c + \sigma^2 \quad (7.31)$$

υπό

$$\left. \begin{array}{l} 0 \leq p_v \leq p_v^{\max} \\ \gamma_v \geq \gamma_v^{\text{tar}} \end{array} \right\} \forall j \in RB_c, \forall v \in V_j \quad (7.32)$$

όπου  $RB_c$  είναι το σύνολο των χρηστών που έχουν επιλέξει την ομάδα πόρων  $c$  και  $v$  είναι ο χρήστης της κυψέλης  $j$  που έχει επιλέξει την ομάδα πόρων  $c$ . Το πρόβλημα (7.31) είναι ένα γραμμικό πρόγραμμα. Επομένως εφόσον υπάρχει βέλτιστη λύση, αυτή θα βρίσκεται στο σημείο τομής των περιορισμών (7.32). Θεωρώντας το αντίστοιχο πρόβλημα ελαχιστοποίησης της συνολικά εκπεμπόμενης ισχύος υπό τους ίδιους περιορισμούς (7.32), η λύση του προβλήματος αυτού είναι η ίδια με του (7.31). Αυτό συμβαίνει επειδή τα δύο προβλήματα έχουν τον ίδιο χώρο εθικτών λύσεων και το gradient των αντικειμενικών τους συναρτήσεων έχει το ίδιο πρόσημο. Επομένως, η λύση ή όχι του προβλήματος ελαχιστοποίησης των ισχύων εκπομπής ταυτίζεται με τη λύση ή όχι του προβλήματος (7.31) το οποίο είναι πρόβλημα ελαχιστοποίησης παρεμβολών σε κάθε μοιραζόμενη ομάδα πόρων  $RB_c$ . Συνεπώς, ακολουθώντας τον γνωστό αλγόριθμο των Foschini-Miljanic [FoM93] που βρίσκει τη λύση για το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της συνολικά εκπεμπόμενης ισχύος, εφόσον αυτή υπάρχει, για το πρόβλημα (7.31) της ελαχιστοποίησης παρεμβολών, βρίσκουμε τη ζητούμενη λύση.

---

**Αλγόριθμος 2 (Κατανεμημένος Αλγόριθμος  
Επιλογής Ισχύος Εκπομπής για κάθε ομάδα πόρων)**

---

$t = 0$ , Converged = false,  $P(0) = P_{init}$

if Converged == false then

for all  $i \in RB_c$  do

$$P_i(t+1) = \min \left\{ \frac{\gamma_i^{tar}}{SINR_i(t)} P_i(t), P_i^{max} \right\}$$

end for

if  $\frac{P_i(t+1) - P_i(t)}{P_i(t)} < eps, \forall i \in RB_c$

where  $eps$  is small positive constant  
(e.g.  $eps = 10^{-3}$ )

then Converged = true

end

t = t + 1

end if



## 7.8. Αριθμητικά Αποτελέσματα

Στο υποκεφάλαιο αυτό αξιολογείται αριθμητικά η επίδοση της προτεινόμενης προσέγγισης δύο σταδίων για την περίπτωση ενός ασύρματου δικτύου πολλαπλών κυψελών. Παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα για την περίπτωση μιας συγκεκριμένης τοπολογίας. Η τοπολογία αυτή καθώς και οι παράμετροι της προσομοίωσης περιγράφονται στον Πίνακα 7.1.

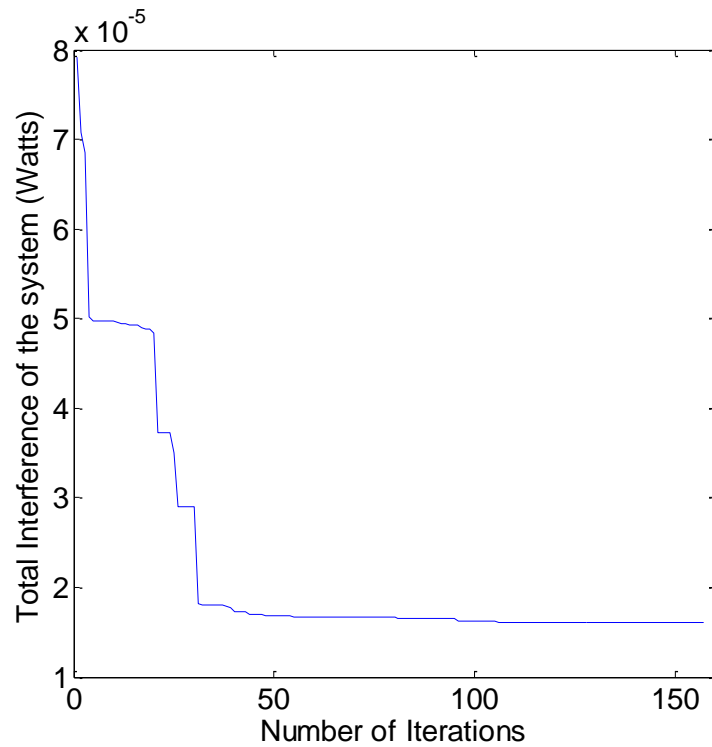
### 7.8.1. Αξιολόγηση της Προσέγγισης

Οι παράμετροι του επόμενου συνόλου αριθμητικών προσομοιώσεων εμφανίζονται στον Πίνακα 7.1

**Πίνακας 7.1 Τιμές παραμέτρων σεναρίου προσομοιώσεων**

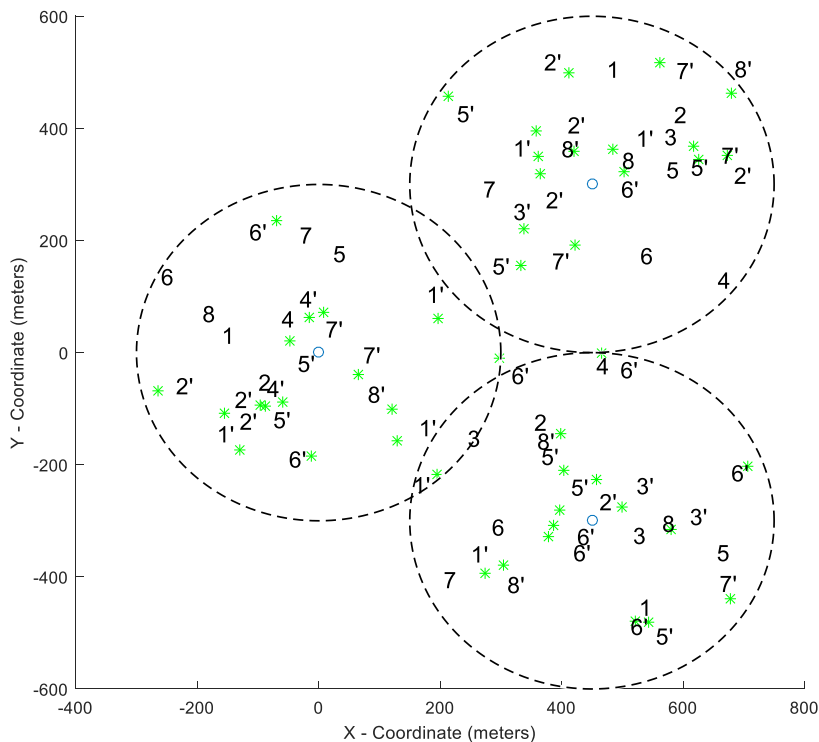
Παράμετροι	Τιμές
Πλήθος κυψελών	3
Ακτίνα κυψέλης	300m
Αριθμός χρηστών κυψελωτής επικ. ανά κυψέλη	8
Κατανομή χρηστών	Τυχαία τοποθετημένοι
Αριθμός ομάδων πόρων ανά κυψέλη	8
Αριθμός χρηστών άμεσης επικ. ανά κυψέλη	16
Μέγιστη ισχύς εκπομπής (chr. κυψ. επικ.)	2 Watts
Μέγιστη ισχύς εκπομπής (chr. άμεσης επικ.)	10 mW
Εύρος καναλιού	180 kHz

Στην Εικόνα 7.2 φαίνεται η χρονική εξέλιξη του συνολικού επιπέδου παρεμβολών στο δίκτυο κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου 1.α. Παρατηρείται η επιβεβαίωση του θεωρητικού συμπεράσματος της συνεχούς μείωσης των συνολικών παρεμβολών κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου 1. Επίσης παρατηρείται μια αρκετά σημαντική μείωση των συνολικών παρεμβολών η οποία προσεγγίζει το 80% περίπου. Τέλος, παρατηρείται ότι μετά από ένα σχετικά μικρό αριθμό επαναλήψεων περίπου 150 ο αλγόριθμος συγκλίνει. Με δεδομένο ότι ο συνολικός αριθμός των κυψελών στο παραπάνω παράδειγμα είναι 52, αυτό σημαίνει ότι με μόνο 2-3 φορές να λαμβάνεται υπόψιν ο κάθε χρήστης, επιτυγχάνεται σύγκλιση του παραπάνω αλγορίθμου.



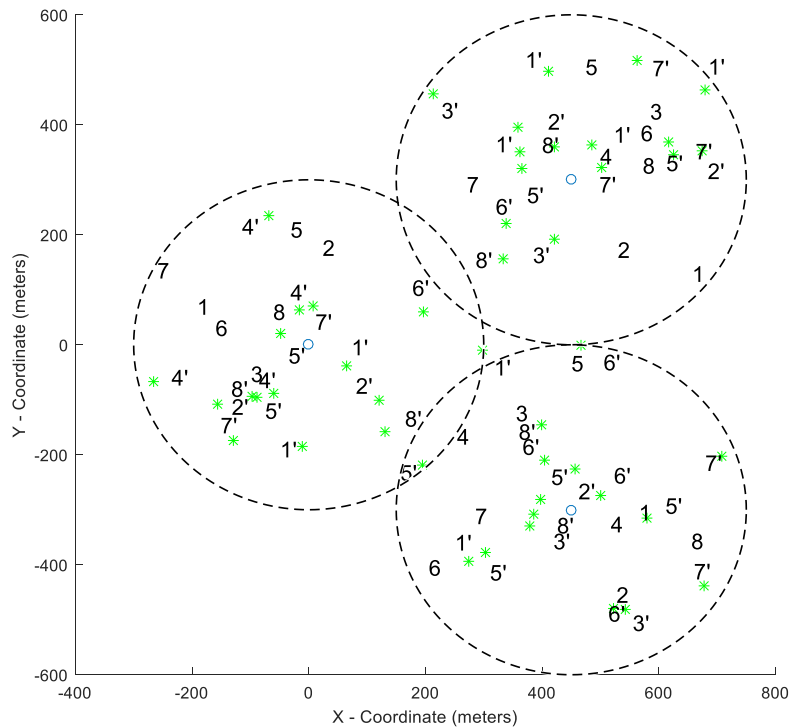
**Εικόνα 7.2 Εξέλιξη του συνολικού επιπέδου παρεμβολών στο δίκτυο**

Στη συνέχεια, στην Εικόνα 7.3, εμφανίζεται ο χάρτης μιας τυχαίας αρχικής ανάθεσης ομάδων πόρων στους χρήστες. Η τυχαία αυτή αρχική ανάθεση ομάδων πόρων χρησιμοποιείται ως αρχικό διάνυσμα επιλογής ομάδων πόρων για τους χρήστες προκειμένου να ξεκινήσει να εκτελείται ο αλγόριθμος 1. Στην Εικόνα 7.3 εμφανίζονται 3 κυψέλες, στο κέντρο των οποίων βρίσκεται ο ΣΒ, με πράσινο σύμβολο «αστεράκι» σημειώνονται οι δέκτες των χρηστών άμεσης επικοινωνίας και οι υπόλοιποι αριθμοί αφορούν την επιλογή ομάδων πόρων κάθε χρήστη. Οι αριθμοί οι οποίοι είναι τονούμενοι αφορούν χρήστες άμεσης επικοινωνίας.



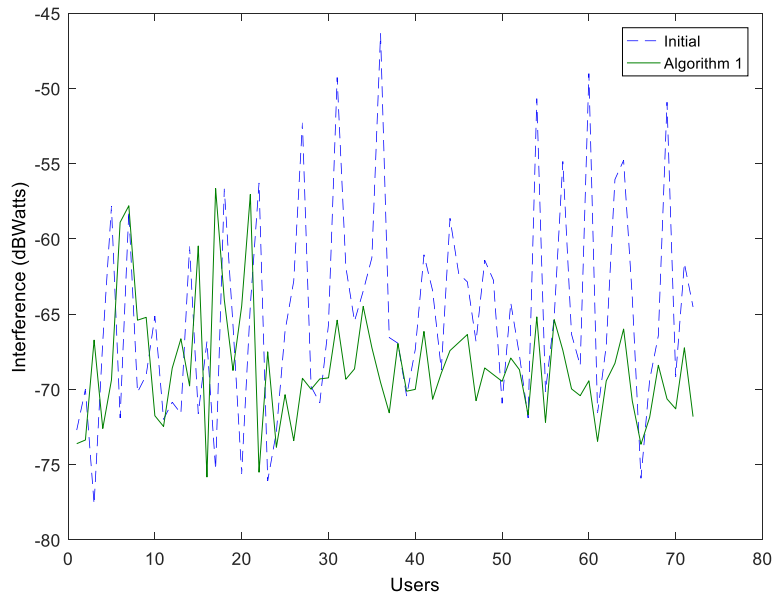
**Εικόνα 7.3 Χάρτης τυχαίας αρχικής ανάθεσης ομάδων πόρων στους χρήστες**

Μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου 1 η επιλογή ομάδων πόρων στην οποία καταλήγει ο αλγόριθμος είναι αυτή η οποία εμφανίζεται στην Εικόνα 7.4. Παρατηρείται μια σχετική απομάκρυνση μεταξύ πομπών του συστήματος και δεκτών του συστήματος οι οποίοι χρησιμοποιούν κοινές ομάδες πόρων. Πιο συγκεκριμένα η ελάχιστη απόσταση επαναχρησιμοποίησης κοινής ομάδας πόρων στην αρχική Εικόνα 7.3 είναι περίπου 24 μέτρα ενώ με την εφαρμογή του αλγορίθμου 1 η απόσταση αυτή αυξάνεται στα 96 μέτρα. Το γεγονός αυτό δείχνει επίσης ότι οι συνολικές παρεμβολές στο δίκτυο μειώνονται αισθητά.

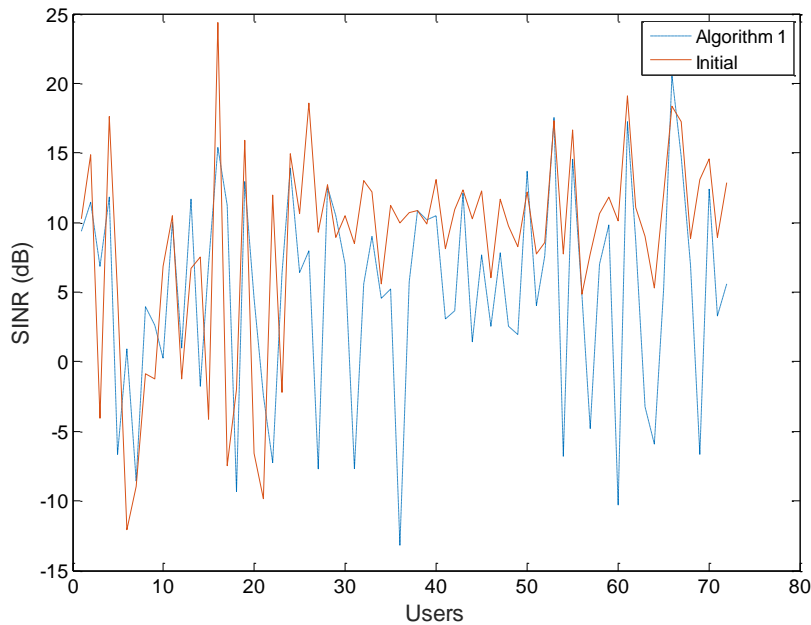


**Εικόνα 7.4 Χάρτης τελικής ανάθεσης ομάδων πόρων στους χρήστες μετά από την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1**

Στη συνέχεια στις Εικόνα 7.5 και Εικόνα 7.6 εμφανίζονται οι παρεμβολές και ο σηματοθορυβικός λόγος αντίστοιχα στο δέκτη κάθε χρήστη του δικτύου πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου 1. Παρατηρείται μια σημαντική μείωση του επιπέδου των παρεμβολών στην πλειοψηφία των δεκτών του δικτύου και μια συνεπακόλουθη αύξηση του επιπέδου του σηματοθορυβικού λόγου. Η συνολική αύξηση του σηματοθορυβικού λόγου πλησιάζει το 50%.



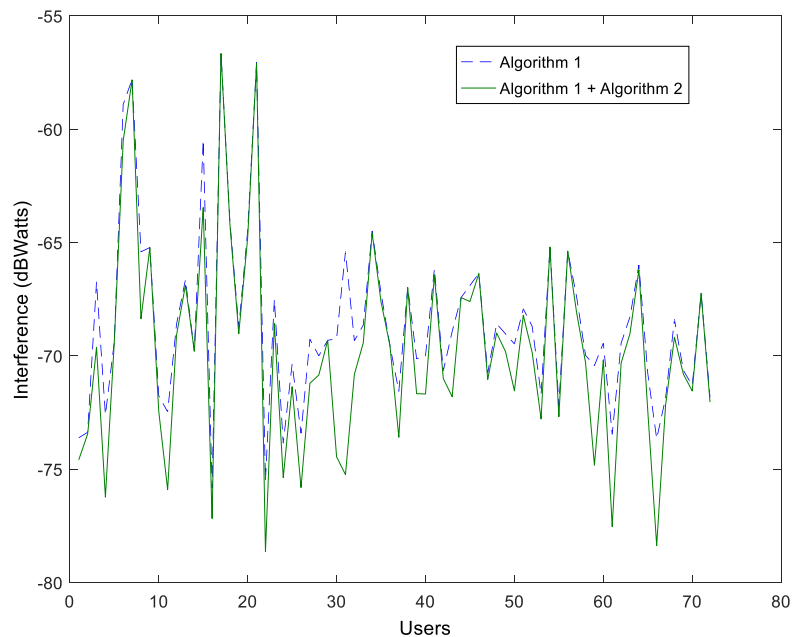
**Εικόνα 7.5** Παρεμβολές στο δέκτη κάθε χρήστη του δικτύου πριν και μετά την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1



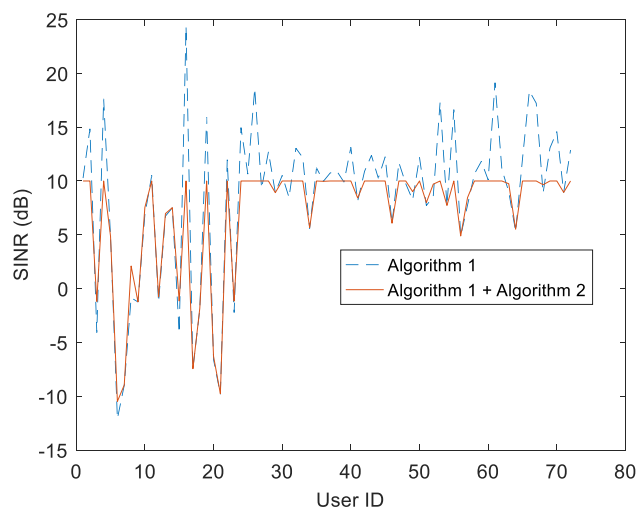
**Εικόνα 7.6** Σηματοθορυβικός λόγος στους δέκτες των χρηστών πριν και μετά την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας ως είσοδο το διάλυσμα επιλογής ομάδων πόρων για όλους τους χρήστες του δικτύου που προέκυψε από την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1 και φαίνεται στην Εικόνα 7.4 εκτελείται ο Αλγόριθμος 2 ακολουθώντας τις παραμέτρους προσομοίωσης του Πίνακα 7.1. και θεωρώντας πως όλοι οι χρήστες έχουν μια απαίτηση για ελάχιστο σηματοθορυβικό λόγο ίσο με 10. Στα παρακάτω γραφήματα, Εικόνα 7.7, Εικόνα 7.8 και Εικόνα

7.9 με τη λεζάντα «Algorithm 1 + Algorithm 2» συμβολίζουμε τη διαδικασία της συνδυαστικής εκτέλεσης των αλγορίθμων 1 και 2.



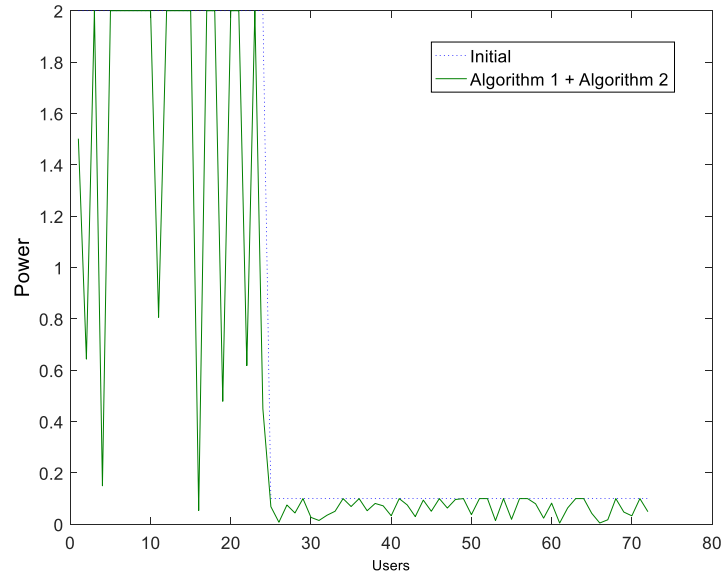
**Εικόνα 7.7** Παρεμβολές σε κάθε δέκτη πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου 2



**Εικόνα 7.8** Σηματοθορυβικός λόγος πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου 2

Παρατηρείται στην Εικόνα 7.7 και στην Εικόνα 7.8 ότι οι παρεμβολές μειώνονται λίγο ακόμη, περίπου 15% και ο σηματοθορυβικός λόγος στους δέκτες των χρηστών είτε φτάνει την τιμή 10 είτε προσπαθεί να πλησιάσει όσο γίνεται κοντύτερα σε αυτή την τιμή. Ο αριθμός των χρηστών που ικανοποιούν την απαίτηση αυτή αυξάνεται από 21 σε 38 και 42 μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου 1 και 2 αντίστοιχα. Στην Εικόνα 7.9 παρατηρείται ότι επιτυγχάνεται

μείωση στην απαιτούμενη κατανάλωση ισχύος εκπομπής για τους περισσότερους χρήστες η οποία ανέρχεται περίπου στο 55% κατά μέσο όρο.



Εικόνα 7.9 Ισχύς εκπομπής μετά την εφαρμογή του Αλγορίθμου 2

### 7.8.2. Αξιολόγηση Κατανεμημένης Πιθανοτικής Προσέγγισης

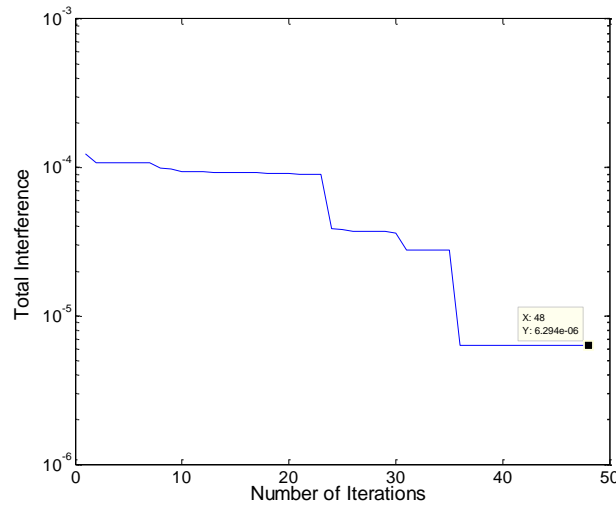
Στο υποκεφάλαιο αυτό αξιολογείται ο αλγόριθμος 1.π σε σύγκριση με τον αλγόριθμο 1. Οι παράμετροι της προσομοίωσης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 7.2 Τιμές παραμέτρων σεναρίου προσομοιώσεων

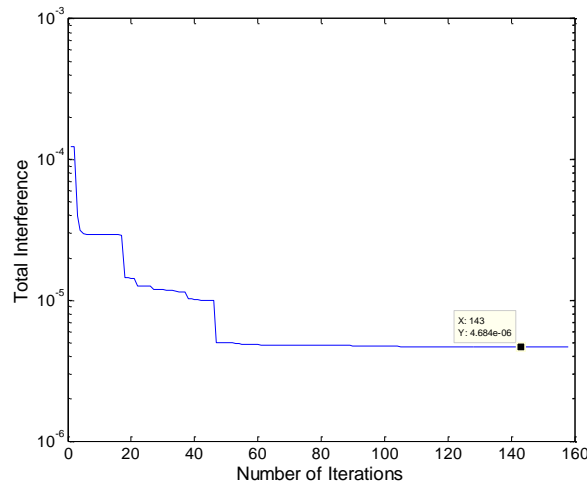
Παράμετροι	Τιμές
Πλήθος κυψελών	3
Ακτίνα κυψέλης	300m
Αριθμός χρηστών κυψελωτής επικ. ανά κυψέλη	8
Κατανομή χρηστών	Τυχαία τοποθετημένοι
Αριθμός ομάδων πόρων ανά κυψέλη	10
Αριθμός χρηστών άμεσης επικ. ανά κυψέλη	16
Μέγιστη ισχύς εκπομπής (chr. κυψ. επικ.)	2 Watts
Μέγιστη ισχύς εκπομπής (chr. άμεσης επικ.)	10 mW
Εύρος καναλιού	180 kHz
Ελάχιστο Επίπεδο Σηματοθορυβικού λόγου	10

Και οι δύο αλγόριθμοι λύνουν το ίδιο πρόβλημα, δηλ. της εύρεσης του ΣΙ Nash στο πεδίο των ομάδων πόρων. Παρόλα αυτά όπως βλέπουμε στις Εικόνα 7.10 και Εικόνα 7.11, ο αλγόριθμος 1.π καταφέρνει να επιτύχει συγκρίσιμη βελτίωση με τον αλγόριθμο 1 στο επίπεδο

των συνολικών παρεμβολών αλλά με σαφώς μικρότερο αριθμό απαιτούμενων επαναλήψεων για σύγκλιση.



Εικόνα 7.10 Εξέλιξη των συνολικών παρεμβολών ακολουθώντας τον αλγόριθμο 1π



Εικόνα 7.11 Εξέλιξη των συνολικών παρεμβολών ακολουθώντας τον αλγόριθμο 1

### 7.8.3. Συγκριτική Αξιολόγηση

Στο υποκεφάλαιο αυτό αξιολογείται η προτεινόμενη προσέγγιση με μια σύγχρονη της βιβλιογραφίας [DAM16] στην οποία οι συγγραφείς επιθυμούν τη βελτιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης των χρηστών. Η προσέγγιση [DAM16] αφορά την κατανομή ομάδων πόρων σε ένα ασύρματο δίκτυο πολλαπλών κυψελών με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας. Κατά συνέπεια μπορεί να συγκριθεί άμεσα με τον αλγόριθμο 1 ο οποίος κι αυτός αφορά κατανομή ομάδων πόρων. Στη συνέχεια επιλέχθηκε να αξιολογηθούν και οι συνδυαστικές προσεγγίσεις κατανομής ομάδων πόρων κι ισχύος εκπομπής όπου στην 1<sup>η</sup> περίπτωση για την κατανομή ομάδων πόρων χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος 1 και στη 2<sup>η</sup>



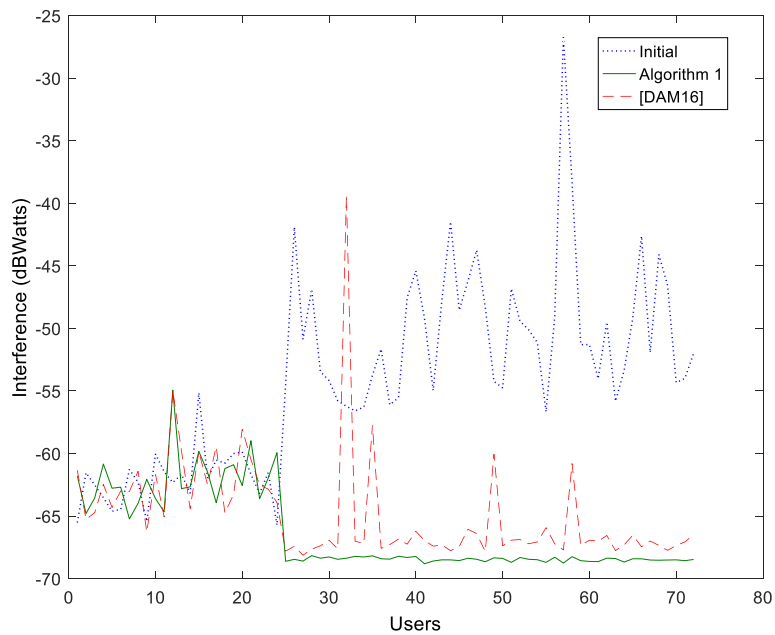
περίπτωση χρησιμοποιείται η προσέγγιση [DAM16]. Κατά τη διάρκεια της συνδυαστικής εκτέλεσης μιας προσέγγισης κατανομής ομάδων πόρων και μιας κατανομής ισχύος εκπομπής, το διάνυσμα επιλογής ομάδων πόρων που προκύπτει από την 1<sup>η</sup> προσέγγιση χρησιμοποιείται ως είσοδος στην προσέγγιση κατανομής ισχύος εκπομπής. Να σημειωθεί ότι οι προσομοιώσεις οι οποίες ακολουθούν εκτελούνται επαναληπτικά για διαφορετικές τυχαίες θέσεις των χρηστών κυψελωτής κι άμεσης επικοινωνίας εντός της κυψέλης εξυπηρέτησης τους. Κατά συνέπεια οι τιμές οι οποίες εμφανίζονται στα επόμενα γραφήματα αποτελούν μέσες τιμές των αντίστοιχων μεγεθών που αφορούν.

Τέλος, οι προσεγγίσεις οι οποίες αξιολογούνται και συγκρίνονται είναι ο Αλγόριθμος 1, η προσέγγιση [DAM16], η συνδυαστική εκτέλεση του αλγορίθμου 1 με τον αλγόριθμο 2 και η συνδυαστική εκτέλεση της προσέγγισης [DAM16] με τον αλγόριθμο 2. Οι προσομοιώσεις που ακολουθούν αφορούν δύο περιπτώσεις:

α) Η πρώτη βασίζεται στον Πίνακα 7.1 όπου ο αριθμός των χρηστών κυψελωτής επικοινωνίας είναι ίσος με τον αριθμό των διαθέσιμων ομάδων πόρων σε κάθε κυψέλη εξυπηρέτησης. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.1 ο αριθμός αυτός είναι ίσος με 8.

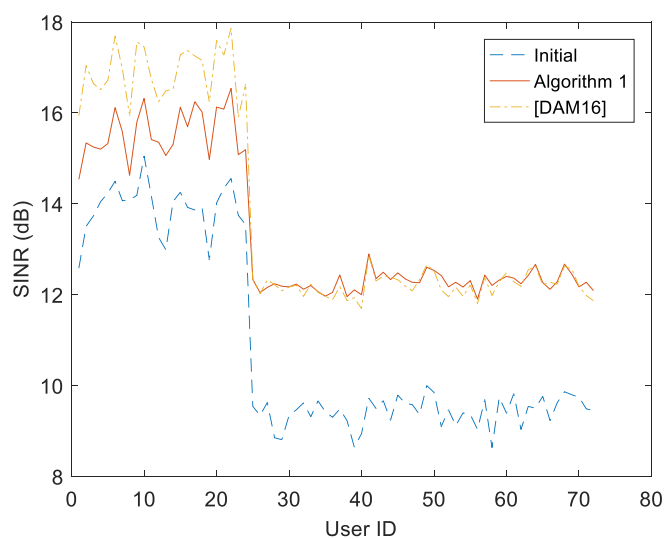
β) Η δεύτερη σειρά αποτελεσμάτων αφορά την περίπτωση όπου κάθε κυψέλη εξυπηρέτησης διαθέτει μεγαλύτερο αριθμό ομάδων πόρων σε σχέση με τον αριθμό των χρηστών κυψελωτής επικοινωνίας. Αυτό παρέχει τη δυνατότητα σε κάθε γειτονική κυψέλη εξυπηρέτησης να επιλέξει διαφορετικό σύνολο από ομάδες πόρων για την εξυπηρέτηση των χρηστών της. Με αυτόν τον τρόπο αναδεικνύονται πιο έντονα το οφέλη που παρέχει η προτεινόμενη προσέγγιση.

Στην Εικόνα 7.12 εμφανίζονται οι παρεμβολές σε κάθε χρήση του δικτύου ακολουθώντας τον αλγόριθμο 1, την προσέγγιση [DAM16] και οι αρχικές.



**Εικόνα 7.12** Παρεμβολές στους δέκτες των χρηστών του δικτύου, αρχικές και τελικές μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου 1 και της προσέγγισης [DAM16]

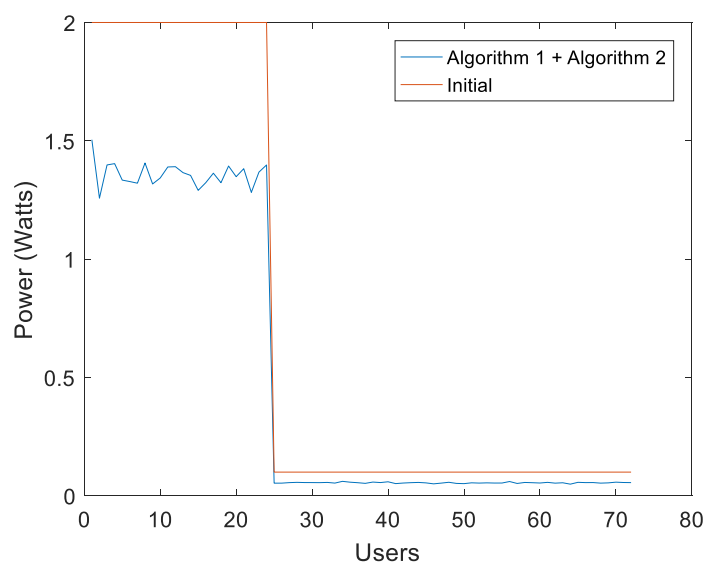
Παρατηρείται ότι η προσέγγιση του Αλγορίθμου 1 συστηματικά βελτιώνει το επίπεδο παρεμβολών στην πλειοψηφία των δεκτών του δικτύου αλλά και πετυχαίνει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα από την προσέγγιση [DAM16]. Συγκεκριμένα η βελτίωση που προκύπτει σε κάθε χρήστη του δικτύου κατά μέσο όρο είναι 55% σε σχέση με αρχικό επίπεδο παρεμβολών που δέχεται και 15% σε σχέση με την προσέγγιση [DAM16]. Παρατηρείται σημαντικά μεγαλύτερη βελτίωση στους χρήστες άμεσης επικοινωνίας (Χρήστες 25-72 στην Εικόνα 7.12).



**Εικόνα 7.13** Σηματοθορυβικός λόγος στους δέκτες των χρηστών αρχικά, μετά τον Αλγόριθμο 1 και μετά την προσέγγιση [DAM16]

Παρατηρείται ότι ο σηματοθορυβικός λόγος των χρηστών βελτιώνεται σημαντικά είτε με την μια προσέγγιση είτε με την άλλη. Συγκεκριμένα η προτεινόμενη προσέγγιση βελτιώνει κατά 78% κατά μέσο όρο το επίπεδο του σηματοθορυβικού λόγου στους δέκτες των χρηστών και η προσέγγιση [DAM16] κατά 93%.

Στη συνέχεια με το διάλυμα επιλογής ομάδων πόρων από τους χρήστες που έχει προκύψει από την εκτέλεση του αλγορίθμου 1 και της προσέγγισης [DAM16] εκτελούμε τον αλγόριθμο 2 και προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα. Παρατηρείται ότι η μέση μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος ανά χρήστη είναι περίπου 40%. Επίσης, σε μέσο όρο ο αριθμός των χρηστών που ικανοποιεί την απαίτηση του για σηματοθορυβικό λόγο στο δέκτη του αυξάνεται από 39,69 σε 46,86.



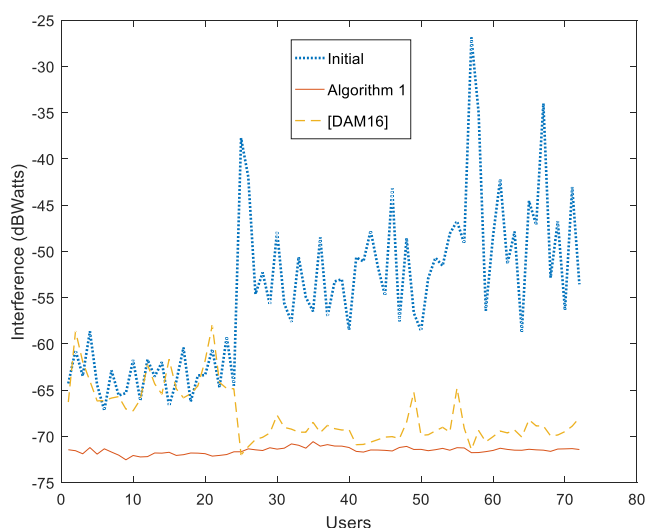
**Εικόνα 7.14** Ισχύς Εκπομπής πριν και μετά την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1

Στη συνέχεια εκτελούνται αριθμητικές προσομοιώσεις για την περίπτωση στην οποία ο αριθμός των διαθέσιμων ομάδων πόρων σε κάθε κυψέλη εξυπηρέτησης υπερβαίνει τον αριθμό των υπάρχοντων χρηστών κυψελωτής επικοινωνίας εντός κάθε κυψέλης. Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται οι παράμετροι κι οι αντίστοιχες τιμές τους για την περίπτωση αυτή.

**Πίνακας 7.3 Τιμές παραμέτρων σεναρίου προσομοιώσεων**

Παράμετροι	Τιμές
Πλήθος κυψελών	3
Ακτίνα κυψέλης	300m
Αριθμός χρηστών κυψελωτής επικ. ανά κυψέλη	8
Κατανομή χρηστών	Τυχαία τοποθετημένοι
Αριθμός ομάδων πόρων ανά κυψέλη	10
Αριθμός χρηστών άμεσης επικ. ανά κυψέλη	16
Μέγιστη ισχύς εκπομπής (χρ. κυψ. επικ.)	2 Watts
Μέγιστη ισχύς εκπομπής (χρ. άμεσης επικ.)	10 mW
Εύρος καναλιού	180 kHz
Ελάχιστο Επίπεδο Σηματοθορυβικού λόγου	10

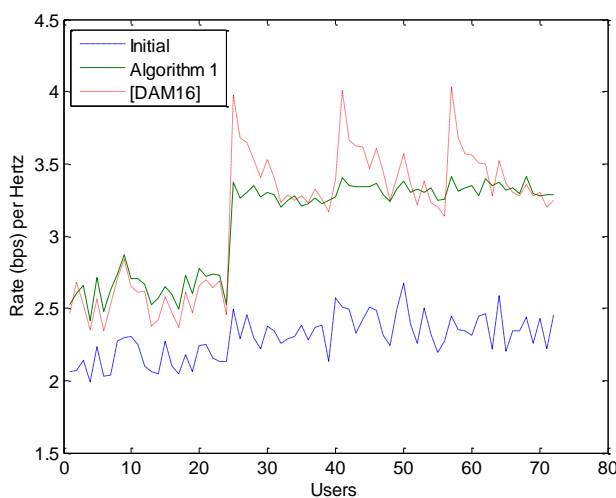
Να σημειωθεί ότι εκτελέστηκε ένας εκτεταμένος αριθμός προσομοιώσεων για διαφορετικές θέσεις των χρηστών του δικτύου και στη συνέχεια παρατίθενται οι μέσες τιμές των αντίστοιχων μεγεθών.



**Εικόνα 7.15 Παρεμβολές όλων των χρηστών του δικτύου**

Στην Εικόνα 7.15 εμφανίζονται οι παρεμβολές σε όλους τους χρήστες του δικτύου μετά την εκτέλεση του Αλγορίθμου 1 και της προσέγγισης [DAM16]. Παρατηρείται ότι η μέση βελτίωση του επιπέδου των παρεμβολών πλησιάζει το 93% σε σχέση με το αρχικό επίπεδο των παρεμβολών και σε σχέση με τη [DAM16] η μέση μείωση αγγίζει το 50%. Τέλος, παρατηρείται ότι οι παραπάνω βελτιώσεις είναι ακόμη μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές της Εικόνα 7.12 δηλ. συγκριτικά με την περίπτωση που ο αριθμός των διαθέσιμων ομάδων πόρων σε κάθε κυψέλη εξυπηρέτησης ταυτίζεται με τον αριθμό των χρηστών κυψελωτής επικοινωνίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι κυψέλες στην περίπτωση αυτή έχουν τη δυνατότητα επιλογής του

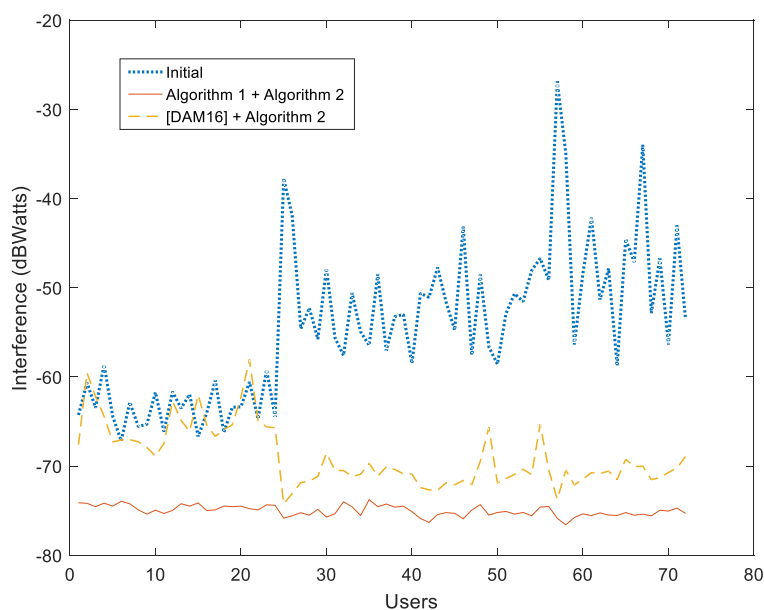
υποσυνόλου των διαθέσιμων ομάδων πόρων που θα χρησιμοποιήσουν. Αυτό τους παρέχει τη δυνατότητα για περαιτέρω βελτίωση του επιπέδου των αρχικών παρεμβολών που υφίστανται.



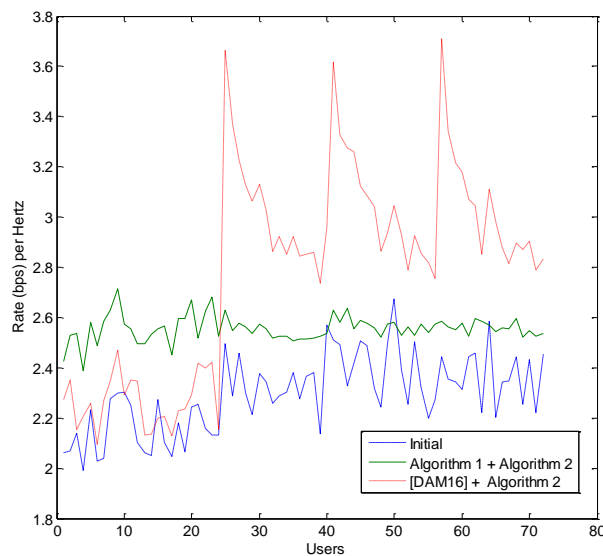
**Εικόνα 7.16 Φασματική Απόδοση πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου 1 και της προσέγγισης [DAM16]**

Στην Εικόνα 7.16 εμφανίζεται η φασματική απόδοση (ρυθμός μετάδοσης ανά μονάδα χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης) για κάθε χρήστη του δικτύου. Παρατηρείται ότι με την προτεινόμενη προσέγγιση βελτιώνεται ο ρυθμός μετάδοσης σε κάθε χρήστη του δικτύου. Η βελτίωση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης σε σχέση με την αρχική ανάθεση ομάδων πόρων πλησιάζει το 35%. Εδώ αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι επιτυγχάνεται η ίδια περίπου βελτίωση με την προτεινόμενη στην εργασία [DAM16] προσέγγιση η οποία όμως έχει ως αμιγή στόχο τη βελτιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης του συστήματος.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αντίστοιχα γραφήματα για την συνδυαστική εκτέλεση των αλγορίθμων 1 και 2 σε αντιδιαστολή με τη συνδυαστική εκτέλεση της προσέγγισης [DAM16] με τον αλγόριθμο 2. Παρατηρείται περαιτέρω μείωση του συνολικού επιπέδου των παρεμβολών στους δέκτες των χρηστών. Συγκεκριμένα καταγράφεται μείωση κατά μέσο όρο 96% σε σχέση με τα αρχικά επίπεδα των παρεμβολών και περίπου 70% σε σχέση με τη συνδυαστική προσέγγιση [DAM16] και του αλγορίθμου 2.

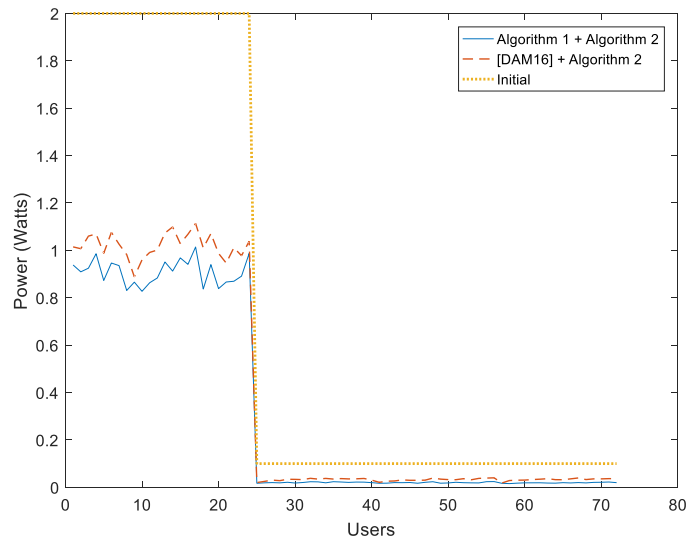


**Εικόνα 7.17** Παρεμβολές στους δέκτες των χρηστών με διάνυσμα εισόδου την έξοδο του αλγορίθμου 1 και την έξοδο της [DAM16]



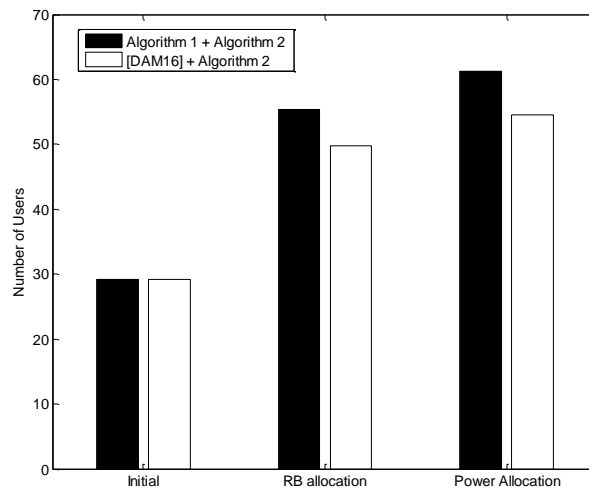
**Εικόνα 7.18** Φασματική Απόδοση των χρηστών με διάνυσμα εισόδου την έξοδο του αλγορίθμου 1 και την έξοδο της [DAM16]

Από την Εικόνα 7.18 γίνεται αντιληπτό ότι ακολουθώντας την προτεινόμενη προσέγγιση δύο βημάτων για την κατανομή ομάδων πόρων κι ισχύος εκπομπής η φασματική απόδοση βελτιώνεται σημαντικά και προσαρμόζεται στις απαιτήσεις των χρηστών για ένα συγκεκριμένο επίπεδο σηματοθορυβικού λόγου στους δέκτες τους.



**Εικόνα 7.19** Ισχύς εκπομπής μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου 2 με διάνυσμα εισόδου την έξοδο του αλγορίθμου 1 και την έξοδο της [DAM16]

Από την Εικόνα 7.19 προκύπτει ότι η συνολική κατανάλωση ισχύος εκπομπής μειώνεται σε σχέση με τα αρχικά επίπεδα περίπου 57% και σε σχέση με την προσέγγιση [DAM16] περίπου 14%. Τέλος ο αριθμός των χρηστών που επιτυγχάνουν την απαίτησή τους για το σηματοθορυβικό λόγο αυξάνεται όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.20.



**Εικόνα 7.20** Πλήθος χρηστών που ικανοποιούν την ελάχιστη απαίτησή τους για σηματοθορυβικό λόγο

## 7.9. Ανακεφαλαιωτικά Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό επεκτάθηκε η προσέγγιση δύο σταδίων για την κατανομή ομάδων πόρων κι ισχύος εκπομπής του προηγούμενου κεφαλαίου 6 σε περιβάλλον πολλαπλών γειτονικών

κυψελών. Σε κάθε μια κυψέλη  $i$  θεωρείται ότι υπάρχει ένας αριθμός  $L_i$  χρηστών κυψελωτής επικοινωνίας κι ένας αριθμός  $R_i$  ( $L_i \leq R_i$ ) από ομάδες πόρων. Μαζί με αυτούς συνυπάρχουν και χρήστες άμεσης επικοινωνίας οι οποίοι διεκδικούν κάποια από τις κοινές ομάδες πόρων  $R_i$ . Στόχος και σε αυτή την περίπτωση αποτελεί η ελαχιστοποίηση των συνολικών παρεμβολών του δικτύου πολλαπλών κυψελών στο συνδυαστικό πεδίο των ομάδων πόρων κι ισχύος εκπομπής στην άνω ζεύξη. Για τους λόγους που έχουν εξηγηθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο αναζητούμε εναλλακτικές κατανομημένες προσεγγίσεις που επιλύουν το πρόβλημα με χρονικά αποδοτικό αλλά υποβέλτιστο τρόπο.

Σε αυτή τη λογική επεκτείνεται η προσέγγιση δύο σταδίων που χρησιμοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο για να καλύψει και την περίπτωση πολλαπλών γειτονικών κυψελών σε ένα ασύρματο κυψελωτό δίκτυο με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας. Όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο το πρόβλημα αναλύεται σε δύο στάδια: πρώτα για σταθερή ισχύ εκπομπής αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της κατανομής ομάδων πόρων και στη συνέχεια με βάση το αποτέλεσμα του πρώτου σταδίου διατυπώνεται το πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής για όλες τις διαθέσιμες ομάδες πόρων.

Στο πρώτο στάδιο το πρόβλημα κατανομής ομάδων πόρων σε περιβάλλον πολλαπλών κυψελών διατυπώνεται ως ένα στρατηγικό παίγνιο στο οποίο παίχτες είναι όλοι οι δέκτες του δικτύου είτε αυτοί είναι οι ΣΒ των κυψελών είτε είναι οι δέκτες των χρηστών άμεσης επικοινωνίας. Στην περίπτωση αυτή γίνεται επέκταση της έννοιας της κυψέλης για να καλύψει και τα ζευγάρια χρηστών άμεσης επικοινωνίας. Θεωρείται λοιπόν ως ειδική περίπτωση κυψέλης με ένα χρήστη προς εξυπηρέτηση ο δέκτης ενός ζευγαριού χρηστών άμεσης επικοινωνίας. Υπό αυτή τη θεώρηση ζητείται η ελαχιστοποίηση των συνολικών παρεμβολών σε όλες τις κυψέλες του δικτύου. Να σημειωθεί ότι στην περίπτωση αυτή παίχτες του παιγνίου είναι όλες οι κυψέλες του δικτύου κι όχι μόνο οι χρήστες άμεσης επικοινωνίας. Με αυτό τον τρόπο μελετώνται κι οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των γειτονικών κυψελών τόσο των μακροκυψελών όσο και των δεκτών των χρηστών άμεσης επικοινωνίας.

Αποδείχθηκε ότι το στρατηγικό παίγνιο αυτό είναι ένα διμερές συμμετρικό παίγνιο. Οι συνολικές παρεμβολές που δέχεται και προκαλεί ένας παίχτης του παιγνίου σε έναν άλλο είναι ίσες με αυτές του δεύτερου προς τον πρώτο. Λόγω αυτής της επιθυμητής ιδιότητας του προβλήματος αποδεικνύεται και το γεγονός ότι το παίγνιο αυτό είναι διμερές συμμετρικό παίγνιο. Τα διμερή συμμετρικά παίγνια είναι ακριβή δυναμικά παίγνια, γεγονός σημαντικό λόγω των επιθυμητών τους ιδιοτήτων σχετικά με την ύπαρξη ΣΙ Nash αλλά κι αλγορίθμων που συγκλίνουν σε αυτό μετά από πεπερασμένο αριθμό βημάτων.

Έτσι προτείνεται ένας αλγόριθμος βέλτιστης απόκρισης ο οποίος συγκλίνει μετά από σχετικά μικρό αριθμό επαναλήψεων σε ένα ΣΙ Nash. Εκτός από τον σειριακό αλγόριθμο



βέλτιστης απόκρισης ο οποίος διασφαλίζει με αυστηρό τρόπο τη σειρά συμμετοχής των παιχτών στο παίγνιο προτάθηκε και μια κατανομημένη πιθανοτική του εκδοχή δηλ. ο αλγόριθμος 1.π. Αυτός ο αλγόριθμος όπως αποδείχθηκε από τις αριθμητικές προσομοιώσεις πετυχαίνει συγκρίσιμη με τον αλγόριθμο 1 βελτίωση αλλά με σημαντικά μικρότερο αριθμό επαναλήψεων. Το ΣΙ Nash αυτό είναι τοπικό ακρότατο της συνάρτησης δυναμικού του παιγνίου και κατά συνέπεια τοπικό ελάχιστο των συνολικών παρεμβολών στο δίκτυο. Έγινε αξιολόγηση του ΣΙ Nash αυτού εκτελώντας τον αλγόριθμο 1 πολλές φορές αλλά με διαφορετική αρχική τυχαία ανάθεση ομάδων πόρων στους χρήστες κάθε φορά. Σε όλες τις εκτελέσεις διαπιστώθηκε ότι τα ΣΙ Nash που υπολογίστηκαν δεν απείχαν περισσότερο από 3% ως προς το ύψος των συνολικών παρεμβολών στο δίκτυο.

Στη συνέχεια, λαμβάνοντας ως είσοδο το αποτέλεσμα του αλγορίθμου 1, το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης των παρεμβολών σε όλες τις διαθέσιμες ομάδες πόρων αναλύεται σε πολλαπλά προβλήματα ελαχιστοποίησης παρεμβολών σε καθεμία ομάδα πόρων η οποία μοιράζεται από χρήστες. Το πρόβλημα αυτό είναι ένα γραμμικό πρόγραμμα για το οποίο αποδεικνύεται η ισοδυναμία του με το αντίστοιχο πρόβλημα ελαχιστοποίησης της συνολικής ισχύος εκπομπής υπό τους ίδιους περιορισμούς ως προς το σηματοθορυβικό λόγο. Λόγω του κοινού πρόσημου των «gradient» των αντίστοιχων αντικειμενικών συναρτήσεων αποδεικνύεται ότι εάν υπάρχει λύση για το ένα πρόβλημα τότε η ίδια θα υπάρχει και για το άλλο. Για αυτό το λόγο αξιοποιείται ο γνωστός κατανομημένος αλγόριθμος των Foschini-Miljanic για τον υπολογισμό της ισχύος εκπομπής σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης της συνολικής ισχύος. Ο αλγόριθμος αυτός είναι πλήρως κατανομημένος κι ωθεί τους χρήστες είτε να εκπέμπουν με την ελάχιστη απαιτούμενη ισχύ για την ικανοποίηση του σηματοθορυβικού λόγου στους δέκτες τους είτε να εκπέμπουν με τη μέγιστη ισχύ τους. Ο αλγόριθμος αυτός έχει αποδειχθεί ότι συγκλίνει μετά από ένα πεπερασμένο αριθμό βημάτων κι ελαχιστοποιεί τόσο τη συνολική ισχύ εκπομπής όσο και τις συνολικές παρεμβολές.

Τέλος, η αποτελεσματικότητα της προσέγγισης αυτής αξιολογείται μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων σε σύγκριση με μια πρόσφατη εργασία [DAM16] της βιβλιογραφίας που στόχο έχει τη μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης του συστήματος. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις εκτελέστηκαν για διαφορετικές τυχαίες θέσεις των χρηστών κυψελωτής κι άμεσης επικοινωνίας εντός της κυψέλης εξυπηρέτησης τους. Έτσι τα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάστηκαν αφορούν μέσες τιμές των αντίστοιχων μεγεθών και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν αφορούν τη «μέση» περίπτωση. Αρχικά διαπιστώθηκε ότι ο αλγόριθμος 1 μειώνει σημαντικά τις συνολικές παρεμβολές. Κατά μέσο όρο οι συνολικές παρεμβολές μειώθηκαν κατά 80% σε σχέση με τα αρχικά επίπεδα. Επίσης παρατηρήθηκε γεωγραφική απομάκρυνση των χρηστών που μοιράζονται κοινές ομάδες πόρων γεγονός το οποίο αναμενόταν αφού στόχος ήταν η μείωση των συνολικών παρεμβολών. Μετά την

εκτέλεση του αλγορίθμου 1 μειώθηκε το επίπεδο των παρεμβολών σε κάθε δέκτη του δικτύου κατά μέσο όρο περίπου 80% σε σχέση με τα αρχικά επίπεδα και περίπου κατά 50% σε σύγκριση με την προσέγγιση [DAM16]. Παρόλα αυτά ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου 1 είναι παραπλήσιος με αυτόν της προσέγγισης [DAM16] που στόχο έχει τη μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης.

Στη συνέχεια με δεδομένο το αποτέλεσμα του αλγορίθμου 1 και αυτό της προσέγγισης [DAM16] εφαρμόζεται ο αλγόριθμος 2 τόσο για την προτεινόμενη σε αυτή τη διδακτορική διατριβή μέθοδο όσο και για την [DAM16]. Συγκρίθηκαν δηλ. οι συνδυαστικές μέθοδοι και βρέθηκε μετά από εκτεταμένο πλήθος αριθμητικών προσομοιώσεων ότι μέσω της προτεινόμενης στη διατριβή μέθοδο εξοικονομείται η συνολικά καταναλισκόμενη ισχύς κατά 30% κι ο αριθμός των χρηστών που επιτυγχάνουν την απαίτησή τους για σηματοθορυβικό λόγο είναι κατά μέσο όρο, κατά 12% περισσότεροι σε σχέση με τη συνδυαστική μέθοδο [DAM16] και του αλγορίθμου 2. Τέλος, η ίδια συγκριτική ανάλυση πραγματοποιήθηκε και για μεταβλητό αριθμό από χρήστες άμεσης επικοινωνίας. Διαπιστώθηκε ότι η προτεινόμενη προσέγγιση λειτουργεί το ίδιο αποτελεσματικά και για την περίπτωση μεταβλητού αριθμού χρηστών άμεσης επικοινωνίας.

## 8. Συμπεράσματα & Μελλοντική Έρευνα

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται το πρόβλημα της κατανομής πόρων (π.χ. επιλογής κυψέλης εξυπηρέτησης, ομάδας πόρων καναλιών μετάδοσης, ισχύος εκπομπής) σε ασύρματα κυψελωτά δίκτυα 3<sup>ης</sup>, 4<sup>ης</sup> και 5<sup>ης</sup> γενιάς με έμφαση στα ασύρματα κυψελωτά δίκτυα με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας των χρηστών.

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της 3GPP για την κατανομή ομάδων πόρων σε ασύρματα κυψελωτά δίκτυα με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας οι χρήστες έχουν τη δυνατότητα να επιλέξουν ως τρόπο επικοινωνίας είτε το συμβατικό, μέσω του ΣΒ είτε την άμεση επικοινωνία με το δέκτη τους, εάν αναγκαίες συνθήκες (όπως π.χ. ποιότητα καναλιού μετάδοσης, παρεμβολές στο δέκτη) το επιτρέπουν. Με δεδομένο ότι οι χρήστες έχουν επιλέξει τρόπο επικοινωνίας τίθεται το πρόβλημα του τρόπου κατανομής ομάδων πόρων από το ΣΒ στους χρήστες. Οι ομάδες πόρων όπως έχει προδιαγραφεί για ένα LTE σύστημα αποτελούν συνδυασμούς από υποφέρουσες και χρονικά σύμβολα. Με αυτό τον τρόπο γίνεται διαμέριση τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας για την εξυπηρέτηση των χρηστών. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του LTE η ελάχιστη χρονική διάρκεια της διαμέρισης στο πεδίο του χρόνου αποτελεί μια χρονοσχισμή της τάξεως του 0.5msec. Εντός αυτού του στενού χρονικού πλαισίου ή εντός ενός μικρού πολλαπλασίου αυτού καλείται ο ΣΒ να αναθέσει ομάδες πόρων στους χρήστες. Για αυτό το λόγο η αποδοτικότητα των προτεινόμενων προσεγγίσεων είναι κρίσιμη παράμετρος για την επιτυχή αντιμετώπιση των εν λόγω προβλημάτων.

### 8.1. Συμπεράσματα

Σε ένα δίκτυο στο οποίο συνυπάρχουν χρήστες συμβατικής αλλά κι άμεσης επικοινωνίας η ερευνητική κοινότητα έχει προτείνει δύο σχήματα μοιρασμού των ομάδων πόρων μεταξύ των χρηστών. Στο πρώτο (overlay) οι χρήστες άμεσης επικοινωνίας χρησιμοποιούν διαφορετικές ομάδες πόρων από τους χρήστες της κυψελωτής επικοινωνίας ενώ στο δεύτερο (underlay) οι χρήστες άμεσης επικοινωνίας μοιράζονται κοινές ομάδες πόρων με τους χρήστες κυψελωτής επικοινωνίας.

Στα overlay σχήματα κατανομής ομάδων πόρων αποτελεί κρίσιμη παράμετρο σχεδίασης του συστήματος η διαστασιολόγηση των απαιτούμενων πόρων τόσο για την άμεση αλλά και για τη συμβατική κυψελωτή επικοινωνία. Στο πλαίσιο αυτό διατυπώθηκε ένα σχετικό πρόβλημα το οποίο αντιμετωπίστηκε μέσω ενός μοντέλου ουρών αναμονής. Θέτοντας ως κριτήριο τη δίκαιη

αντιμετώπιση των χρηστών άμεσης και κυψελωτής επικοινωνίας αξιολογήθηκε η χωρητικότητα του συστήματος σε όρους ικανοποίησης των χρηστών ως προς την πιθανότητα εξυπηρέτησής τους από το σύστημα. Με στόχο λοιπόν την εξισορρόπηση αλλά και την ελαχιστοποίηση των πιθανοτήτων μη εξυπηρέτησης των χρηστών από το σύστημα προτάθηκε κι αξιοποιήθηκε ένα μοντέλο ουρών αναμονής. Το μοντέλο αυτό είναι σε θέση να προσδιορίζει τη βέλτιστη πολιτική ανάθεσης ομάδων πόρων από το ΣΒ στους χρήστες του δικτύου. Επίσης προτείνεται κι ένας εμπειρικός αλγόριθμος υπολογισμού των απαιτούμενων παραμέτρων της βέλτιστης πολιτικής ανάθεσης ομάδων πόρων. Έτσι οι απαιτούμενοι πόροι τόσο για την κυψελωτή όσο και για την άμεση επικοινωνία υπολογίζονται με τρόπο δυναμικό. Με βάση την εισερχόμενη κίνηση αλλά και με βάση εκτιμήσεις για τη μελλοντική της εξέλιξη είναι η δυνατή η εκτίμηση του απαιτούμενου ποσοστού από ομάδες πόρων για την εξυπηρέτηση των χρηστών άμεσης επικοινωνίας και κατά συνέπεια του αντίστοιχου ποσοστού για τους χρήστες της κυψελωτής επικοινωνίας.

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρατίθενται κι αναλύονται τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από τη μελέτη και την έρευνα κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής. Πιο συγκεκριμένα, τα συμπεράσματα αυτά φαίνονται παρακάτω:

### **Overlay Κατανομή Πόρων**

#### **Συμπέρασμα 1**

*Είναι δυνατή η εκτίμηση του απαιτούμενου ποσοστού από ομάδες πόρων για την εξυπηρέτηση τους σε ένα δίκτυο με overlay κατανομή ομάδων πόρων με στόχο την ελαχιστοποίηση κι εξισορρόπηση της πιθανότητας απόρριψης των χρηστών κυψελωτής κι άμεσης επικοινωνίας.*

Αυτό επιτεύχθηκε μέσω της χρήσης ενός καινοτομικού μοντέλου ουρών αναμονής το οποίο είναι σε θέση να εκτιμά με δυναμικό τρόπο το απαιτούμενο ποσοστό ομάδων πόρων βασιζόμενο στην τρέχουσα εισερχόμενη κίνηση στο δίκτυο αλλά και σε εκτιμήσεις για τη μελλοντική εξέλιξή της. Με χρήση μεθόδων της μαθηματικής ανάλυσης και τεχνικών δυναμικού προγραμματισμού προσδιορίστηκε η βέλτιστη πολιτική ανάθεσης ομάδων πόρων σε ένα τέτοιο δίκτυο. Τέλος, προτάθηκε ένας αλγόριθμος εμπειρικού υπολογισμού των απαραίτητων παραμέτρων για τον ακριβή προσδιορισμό της βέλτιστης πολιτικής ανάθεσης ομάδων πόρων. Ο αλγόριθμος αυτός αξιολογήθηκε μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων και φάνηκε ότι είναι σε θέση να υπολογίζει το απαιτούμενο ποσοστό από πόρους για τους χρήστες άμεσης αλλά και της συμβατικής κυψελωτής επικοινωνίας.

#### **Συμπέρασμα 2**

*Είναι δυνατή η διαστασιολόγηση ενός κυψελωτού συστήματος με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας από πλευράς απαιτούμενων πόρων με τη χρήση του προτεινόμενου μοντέλου ουρών αναμονής και του εμπειρικού αλγορίθμου μεταβάλλοντας το φορτίο κίνησης και θέτοντας ένα συγκεκριμένο επίπεδο ελάχιστων ανεκτών επιπέδων για την πιθανότητα μη εξυπηρέτησης ενός αιτήματος για επικοινωνία από το δίκτυο.*

Με τη χρήση του προτεινόμενου μοντέλου ουρών αναμονής και του προτεινόμενου εμπειρικού αλγορίθμου φάνηκε μέσω εκτεταμένων αριθμητικών προσομοιώσεων ότι είναι δυνατός ο προσδιορισμός των απαιτούμενων πόρων για την λειτουργία του δικτύου εντός συγκεκριμένων προδιαγραφών για την πιθανότητα μη εξυπηρέτησης των χρηστών και με δεδομένο το μέγεθος του φορτίου κίνησης. Τέλος μεταβάλλοντας το προσφερόμενο φορτίο κίνησης είναι δυνατός ο υπολογισμός των απαιτούμενων πόρων με δυναμικό τρόπο κάνοντας χρήση του εμπειρικού αλγορίθμου.

Συνεχίζοντας τη μελέτη-έρευνα στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής μελετήθηκαν κατά κόρον προβλήματα κατανομής πόρων με underlay ανάθεση ομάδων πόρων στους χρήστες άμεσης επικοινωνίας. Αυτό σημαίνει ότι οι χρήστες άμεσης επικοινωνίας επαναχρησιμοποιούν τους διαθέσιμους πόρους για την επικοινωνία των συμβατικών κυψελωτών χρηστών. Αυτό προάγει την εξοικονόμηση του διαθέσιμου φάσματος επικοινωνιών. Στο πλαίσιο αυτό μελετήθηκε το πρόβλημα κατανομής ισχύος εκπομπής σε ένα ασύρματο κυψελωτό δίκτυο με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας με underlay διαχείριση ομάδων πόρων. Μελετήθηκε η περίπτωση μιας ομάδας πόρων η οποία έχει ανατεθεί σε ένα συμβατικό κυψελωτό χρήστη κι η οποία μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί από πολλούς χρήστες άμεσης επικοινωνίας. Βέβαια η επαναχρησιμοποίηση αυτή δεν μπορεί να γίνεται ανεξέλεγκτα λόγω των αυξανόμενων παρεμβολών που εισάγονται στους χρήστες του δικτύου.

### **Underlay Κατανομή Πόρων**

#### **Συμπέρασμα 3**

*Είναι δυνατή η κατανομή ισχύος εκπομπής μέσω μιας παιγνιοθεωρητικής προσέγγισης. Στόχος της προσέγγισης αυτής είναι η εύρεση του βέλτιστου συμβιβασμού μεταξύ της κατανάλωσης ισχύος εκπομπής και της επίτευξης σηματοθορυβικού λόγου στο δέκτη κάθε χρήστη.*

Η επιθυμία του κάθε χρήστη για την κατανάλωση ισχύος εκπομπής μοντελοποιείται μέσω μιας ατομικής, προσωποποιημένης συνάρτησης χρησιμότητας. Η συνάρτηση χρησιμότητας αυτή ικανοποιεί συγκεκριμένες επιθυμητές ιδιότητες (π.χ. κοίλη καμπυλότητα) οι οποίες σε συνδυασμό με το κατάλληλα επιλεγμένο πεδίο στρατηγικών για τους χρήστες εξασφαλίζει την ύπαρξη ενός ΣΙ Nash για το εν λόγω παίγνιο.

#### **Συμπέρασμα 4**

*Με τον κατάλληλο σχεδιασμό της συνάρτησης χρησιμότητας κάθε χρήστη είναι εθικτή η ρύθμιση του επιθυμητού ΣΙ Nash.*

Όπως αναφέρθηκε κάθε χρήστης διαθέτει μια συνάρτηση χρησιμότητας η οποία είναι προσωποποιημένη. Πιο συγκεκριμένα εξαρτάται από δύο όρους: ένα θετικό (γνησίως αύξοντα) ως προς την ισχύ εκπομπής κι ένα αρνητικό (γνησίως φθίνοντα) ως προς την ισχύ εκπομπής. Ο πρώτος όρος εξαρτάται αναλογικά με το σηματοθορυβικό λόγο στο δέκτη κάθε χρήστη. Ο δεύτερος όρος τιμολογεί την ισχύ εκπομπής με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι ιδιαίτερες απαιτήσεις του χρήστη για την επίτευξη του σηματοθορυβικού λόγου χωρίς την κατασπατάληση ισχύος εκπομπής και την ταχεία εξάντληση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας κάθε κινητού τερματικού. Τα παραπάνω επαληθεύτηκαν μέσω της εκτέλεσης αριθμητικών προσομοιώσεων στο υπολογιστικό περιβάλλον Matlab.

#### **Συμπέρασμα 5**

*Η προτεινόμενη παιγνιοθεωρητική προσέγγιση για την κατανομή ισχύος εκπομπής υπερτερεί σε σχέση με μια σχετική εργασία της βιβλιογραφίας [YTD09b] ως προς το μέσο ρυθμό μετάδοσης ενός κυψελωτού χρήστη που μοιράζεται την κοινή ομάδα πόρων για διαφορετικές αποστάσεις του ζεύγους χρηστών άμεσης επικοινωνίας από το ΣΒ.*

Το συμπέρασμα αυτό διαπιστώθηκε μετά από εκτεταμένο πλήθος αριθμητικών προσομοιώσεων στο υπολογιστικό περιβάλλον Matlab κατά το οποίο μετρήθηκε ο μέσος ρυθμός μετάδοσης του κυψελωτού χρήστη που μοιράζεται την κοινή ομάδα πόρων για διαφορετικές αποστάσεις του ζεύγους χρηστών άμεσης επικοινωνίας από το ΣΒ.

Στη συνέχεια η μελέτη επεκτάθηκε σε προβλήματα συνδυαστικής κατανομής ομάδων πόρων κι ισχύος εκπομπής σε ασύρματα κυψελωτά δίκτυα με υποστήριξη άμεσης επικοινωνίας. Στόχος αποτέλεσε η ελαχιστοποίηση των συνολικών παρεμβολών στο δίκτυο στο συνδυαστικό πεδίο ομάδων πόρων κι ισχύος εκπομπής υπό την επίτευξη ενός ελάχιστου επιπέδου σηματοθορυβικού λόγου στους δέκτες των χρηστών του δικτύου. Το πρόβλημα αυτό μελετήθηκε σε πρώτη φάση εντός μιας μακροκυψέλης και στη συνέχεια σε περιβάλλον πολλαπλών γειτονικών μακροκυψελών. Στη συνέχεια παρατίθενται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την παραπάνω μελέτη.

#### **Διαχείριση Παρεμβολών στο Πεδίο Ομάδων Πόρων κι Ισχύος Εκπομπής**

#### **Συμπέρασμα 6**

*Είναι δυνατή η επίλυση του προβλήματος με προσεγγιστικό αλλά ικανοποιητικό τρόπο αποσυνθέτοντας το αρχικό συνδυαστικό πρόβλημα σε δύο απλούστερα.*

Στο πρώτο πρόβλημα θεωρείται ότι η ισχύς εκπομπής διατηρείται σταθερή για όλους τους χρήστες κι η μελέτη επικεντρώνεται στην κατανομή των ομάδων πόρων στους χρήστες. Στο δεύτερο πρόβλημα αναζητείται η εύρεση της κατανομής ισχύος εκπομπής με δεδομένη την επίλυση του πρώτου προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα με δεδομένο το αποτέλεσμα της επίλυσης του πρώτου προβλήματος, το αρχικό πρόβλημα ανάγεται στην επίλυση ενός προβλήματος κατανομής ισχύος εκπομπής για κάθε διαθέσιμη ομάδα πόρων.

Αποδείχθηκε μέσω της θεωρητικής ανάλυσης αλλά και επιβεβαιώθηκε μέσω των αριθμητικών προσομοιώσεων η επιτυχία της παραπάνω στρατηγικής για την επίλυση του αρχικού πολύπλοκου προβλήματος τόσο σε περιβάλλον μιας κυψέλης όσο και σε περιβάλλον πολλαπλών κυψελών.

### **Συμπέρασμα 7**

*Είναι εθικτή η μείωση σε ιδιαίτερα σημαντικό βαθμό των συνολικών παρεμβολών στο δίκτυο ακολουθώντας την προτεινόμενη προσέγγιση δύο σταδίων για το πρόβλημα κατανομής ομάδων πόρων κι ισχύος εκπομπής σε περιβάλλον μιας κυψέλης.*

Στο περιβάλλον αυτό οι χρήστες κυψελωτής επικοινωνίας έχουν επιλέξει εκ των προτέρων ομάδα πόρων, διαφορετική ο καθένας τους σύμφωνα με τις προδιαγραφές της 3GPP. Στο παίγνιο επιλογής ομάδας πόρων συμμετέχουν όλοι οι χρήστες άμεσης επικοινωνίας, καθένας από τους οποίους επιλέγει μια ομάδα πόρων έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι συνολικές παρεμβολές στο δίκτυο. Κάθε χρήστης διαθέτει μια συνάρτηση χρησιμότητας η οποία είναι αντίθετη ως προς το πρόσημο με τις συνολικές παρεμβολές που δέχεται και προκαλεί ο χρήστης αυτός από και προς το υπόλοιπο δίκτυο. Έτσι μοντελοποιείται ένα ακριβές δυναμικό παίγνιο κατανομής ομάδων πόρων για τους χρήστες άμεσης επικοινωνίας της εν λόγω κυψέλης. Αυτή η κατηγορία στρατηγικών παιγνίων διαθέτει εξαιρετικά επιθυμητές ιδιότητες με την αξιοποίηση των οποίων σχεδιάστηκε ένας αλγόριθμος βέλτιστης απόκρισης που συγκλίνει σε ΣΙ Nash τα οποία βελτιώνουν σημαντικά το επίπεδο των συνολικών παρεμβολών στο δίκτυο. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώθηκε πειραματικά μέσω πολλαπλών προσομοιώσεων σε περιβάλλον Matlab.

### **Συμπέρασμα 8**

*Σε κάθε βήμα εκτέλεσης του αλγορίθμου κατανομής ομάδων πόρων μειώνονται τόσο οι συνολικές παρεμβολές όσο βελτιώνεται και η συνάρτηση χρησιμότητας κάθε χρήστη.*

Αυτό αποδείχθηκε θεωρητικά αλλά και επαληθεύτηκε μέσω των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν. Η θεωρητική απόδειξη είναι απόρροια της ιδιότητας των ακριβών δυναμικών παιγνίων περί ύπαρξης ενός πεπερασμένου μονοπατιού βελτίωσης της συνάρτησης δυναμικού του παιγνίου. Η συνάρτηση δυναμικού του παιγνίου αντικατοπτρίζει σε αυτή την περίπτωση τις συνολικές παρεμβολές σε όλο το δίκτυο. Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο βέλτιστης απόκρισης οι συνολικές παρεμβολές μειώνονται προοδευτικά σε κάθε βήμα εκτέλεσης του αλγορίθμου. Το συμπέρασμα αυτό αποτελεί μια εξαιρετικά επιθυμητή ιδιότητα των ακριβών δυναμικών παιγνίων καθότι φαίνεται ότι σε κάθε βήμα εκτέλεσης του αλγορίθμου εναρμονίζεται η ατομική συνάρτηση χρησιμότητας του κάθε χρήστη με τη συνολική συνάρτηση χρησιμότητας του δικτύου. Το γεγονός αυτό διευκολύνει τον υπολογισμό του ΣΙ Nash με κατανομημένο τρόπο.

### **Συμπέρασμα 9**

*Ο απαιτούμενος αριθμός επαναλήψεων για τη σύγκλιση του πρώτου μέρους της προσέγγισης δύο σταδίων ήταν σχετικά χαμηλός σε σχέση με τον αριθμό των χρηστών-παιχτών του παιγνίου κατανομής ομάδων πόρων.*

Σύμφωνα με τη θεωρία πολυπλοκότητας οι αλγόριθμοι βέλτιστης απόκρισης για αυτή την κατηγορία παιγνίων μπορεί στη χειρότερη περίπτωση να χρειαστούν εκθετικό αριθμό επαναλήψεων σε σχέση με τον αριθμό των συμμετεχόντων παιχτών στο παίγνιο. Παρόλα αυτά στη μέση περίπτωση ο αριθμός αυτός είναι γραμμικός σε σχέση με τον αριθμό των παιχτών του παιγνίου [DuG16].

### **Συμπέρασμα 10**

*Το ΣΙ Nash που προκύπτει από την εφαρμογή του αλγορίθμου κατανομής ομάδων πόρων σε περιβάλλον μιας κυψέλης δεν είναι μοναδικό. Παρόλα αυτά βρέθηκε μέσω εκτεταμένου πλήθους αριθμητικών προσομοιώσεων ότι τα εν λόγω ΣΙ Nash δε διαφέρουν κατά πολύ μεταξύ τους ως προς το συνολικό επίπεδο των παρεμβολών στο δίκτυο.*

Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε μετά από εκτεταμένο πλήθος αριθμητικών προσομοιώσεων ότι τα υπολογιζόμενα ΣΙ Nash διέφεραν το πολύ κατά 5% μεταξύ τους. Αυτό διαπιστώθηκε τόσο για την περίπτωση της μιας κυψέλης όσο και για την περίπτωση πολλαπλών κυψελών. Επίσης, η μέση συνολική βελτίωση σε σχέση με τα αρχικά επίπεδα των παρεμβολών αγγίζει το 80%.

### **Συμπέρασμα 11**

*Το δεύτερο στάδιο της προτεινόμενης προσέγγισης που αφορά την κατανομή ισχύος εκπομπής σε όλες τις διαθέσιμες ομάδες πόρων του δικτύου επιτυγχάνει τόσο μείωση της συνολικά*



*εκπεμπόμενης ισχύος όσο κι αύξηση του αριθμού των χρηστών που ικανοποιούν την απαίτηση τους ως προς το σηματοθορυβικό λόγο.*

Το συμπέρασμα αυτό αποδείχθηκε θεωρητικά αλλά κι επιβεβαιώθηκε μέσω των προσομοιώσεων. Η θεωρητική του απόδειξη παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 7 όπου αντιμετωπίζεται το πρόβλημα σε περιβάλλον πολλαπλών κυψελών. Εκεί αποδεικνύεται η ισοδυναμία του προβλήματος αυτού με ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης των συνολικών ισχύων εκπομπής στο δίκτυο. Η πειραματική του επιβεβαίωση γίνεται μέσω της εκτέλεσης πολλαπλών αριθμητικών προσομοιώσεων για διαφορετικές τυχαίες θέσεις των χρηστών του δίκτυο. Δείχθηκε ότι κατά μέσο όρο επιτυγχάνεται αισθητή μείωση της συνολικά εκπεμπόμενης ισχύος καθώς κι ο αριθμός των χρηστών που ικανοποιούν την απαίτηση τους αυξάνεται σημαντικά.

### **Συμπέρασμα 12**

*Ο αλγόριθμος κατανομής ισχύος εκπομπής συγκλίνει μετά από μικρό σχετικά αριθμό επαναλήψεων. Επίσης συγκλίνει στο ίδιο διάνυσμα επιλογών τιμής ισχύος εκπομπής είτε εκτελείται παράλληλα είτε σε σειριακό τρόπο.*

Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώθηκε πειραματικά μέσω της εκτέλεσης αριθμητικών προσομοιώσεων. Πιο συγκεκριμένα για τη χειρότερη περίπτωση βρέθηκε ότι ο χρόνος σύγκλισης δεν ξεπερνούσε τις 60 επαναλήψεις σε σύνολο 4 χρηστών. Επίσης, σύμφωνα με την εργασία [DHK12] υπάρχει θεωρητική απόδειξη σχετικά με το χρόνο σύγκλισης του παραπάνω αλγορίθμου ο οποίος είναι της τάξεως του  $O(n \log n)$ .

Τέλος προτάθηκε μια πιθανοτική κατανεμημένη εκδοχή του αλγορίθμου κατανομής ομάδων πόρων έτσι ώστε να λειτουργεί πλήρως κατανεμημένα και παράλληλα.

### **Συμπέρασμα 13**

*Αποδείχθηκε μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων ότι μπορεί να επιτύχει συγκρίσιμα αποτελέσματα με τον αντίστοιχο σειριακό αλγόριθμο κατανομής ομάδων πόρων. Από την άλλη πλευρά δεν απαιτείται κάποιος ιδιαίτερος μηχανισμός διατήρησης της σειράς συμμετοχής των χρηστών στο παίγνιο με αποτέλεσμα να αποφεύγεται ιδιαίτερα σημαντικός φόρτος συντονισμού των χρηστών στο δίκτυο.*

## 8.2. *Μελλοντικές Ερευνητικές Δυνατότητες*

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις της παρούσας εργασίας είτε νέες ερευνητικές δυνατότητες που ανοίγονται στην ευρύτερη θεματική περιοχή της διδακτορικής διατριβής.

- α) ως μια πιθανή προσθήκη στην προτεινόμενη προσέγγιση για την κατανομή ομάδων πόρων κι ισχύος εκπομπής είναι η ενσωμάτωση ενός μηχανισμού αυστηρότερου ελέγχου των επιπέδων επίτευξης του σηματοθορυβικού λόγου στους δέκτες των χρηστών. Αυτός ο μηχανισμός θα μπορούσε να εγκατασταθεί στο ΣΒ ο οποίος σε συνεργασία με το κινητό τερματικό θα αποφασίζει σε εύλογο χρονικό διάστημα εάν είναι σκόπιμη η ανάθεση μιας ομάδας πόρων η οποία θα εξυπηρετεί με αυστηρό τρόπο τις ιδιαίτερες απαιτήσεις κάθε χρήστη. Σε διαφορετική περίπτωση, θα απορρίπτει το αίτημα του χρήστη για επικοινωνία.
- β) μελέτη του ίδιου προβλήματος για την περίπτωση της προς τα κάτω ζεύξης, δηλ. από το ΣΒ στο κινητό τερματικό. Σε αυτή την περίπτωση δέκτες συνιστούν τα κινητά τερματικά για τα οποία μπορεί να τεθεί ο στόχος της ελαχιστοποίησης των συνολικών παρεμβολών. Να σημειωθεί ότι στη βιβλιογραφία προτιμάται η λειτουργία της άμεσης επικοινωνίας χρησιμοποιώντας την προς τα άνω ζεύξη έτσι ώστε να μην υφίστανται οι χρήστες άμεσης επικοινωνίας ισχυρές παρεμβολές από τις ισχυρές εκπομπές ισχύος του ΣΒ.
- γ) η επέκταση της παραπάνω προτεινόμενης προσέγγισης για την περίπτωση που οι χρήστες είναι σε θέση να καταλαμβάνουν πολλαπλές και διαφορετικές ομάδες πόρων. Το προτεινόμενο μοντέλο θα μπορούσε να επεκταθεί προς αυτή την κατεύθυνση με στόχο την ικανοποίηση των ιδιαίτερων απαιτήσεων κάθε χρήστη με μεγαλύτερη ευελιξία. Οι χρήστες κυψελωτής αλλά κι άμεσης επικοινωνίας θα μπορούν να επιλέγουν πολλαπλές ομάδες πόρων έτσι ώστε να αυξάνουν το συνολικό ρυθμό μετάδοσης στους δέκτες τους. Στην περίπτωση της μη επίτευξης του ελάχιστου ρυθμού μετάδοσης ενός χρήστη από μια ομάδα πόρων, το δίκτυο θα είναι σε θέση να αναγνωρίζει αυτό το γεγονός και να αναθέτει περισσότερες από μια ομάδες πόρων σε ένα χρήστη.
- δ) η ενσωμάτωση ενός μηχανισμού αυτόματης αλλαγής του τρόπου επικοινωνίας των συσκευών. Στην περίπτωση που μεταβληθούν σημαντικά η ποιότητα του καναλιού κάθε χρήστη και δεν είναι δυνατή η συνέχιση της λειτουργίας του υπό τον ίδιο τρόπο επικοινωνίας, το δίκτυο θα πρέπει να είναι σε θέση να αναγνωρίζει το γεγονός αυτό και να προτείνει εναλλακτικούς τρόπους επικοινωνίας είτε από το ΣΒ της ίδιας κυψέλης είτε γειτονικών.

- ε) επέκταση της μελέτης στην περίπτωση συστάδων με τη χρήση αναμεταδοτών (relays). Στην περίπτωση αυτή δημιουργούνται συστάδες από χρήστες οι οποίοι μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους. Έτσι επεκτείνεται η χωρική κάλυψη για τους χρήστες άμεσης επικοινωνίας μέσω της συγκρότησης των συστάδων. Έχουν γίνει ήδη μελέτες που προτείνουν αυτό σενάριο χρήσης του δικτύου με τη συμμετοχή χρηστών άμεσης επικοινωνίας. Η περαιτέρω μελέτη μηχανισμών κατανομής πόρων και μείωσης των παρεμβολών θα έχουν καθοριστική σημασία για την επιτυχία ενός τέτοιου σεναρίου.
- στ) μελέτη της περίπτωσης όπου δέκτες των κινητών τερματικών κι ο ΣΒ χρησιμοποιούν κεραίες πολλαπλών στοιχείων (κεραίες MIMO) για την αποστολή και τη λήψη δεδομένων. Η πρακτική αυτή έχει αρχίσει ήδη να εφαρμόζεται σε σύγχρονα δίκτυα ασύρματων επικοινωνιών. Οι κεραίες MIMO προσφέρουν πολλά οφέλη στο δίκτυο και συμβάλλουν καθοριστικά στην αύξηση της χωρητικότητας του. Θα μπορούσε να μελετηθεί ένα σενάριο στο οποίο και οι χρήστες άμεσης επικοινωνίας αλλά και οι συμβατικοί χρήστες χρησιμοποιούν κεραίες πολλαπλών στοιχείων (κεραίες MIMO).

# Παράρτημα

Απόδειξη της σχέσης (6.11)

Η συνάρτηση δυναμικού του παιγνίου  $G$  μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\begin{aligned}
 Pot(s_i, s_{-i}) &= \sum_{i=1}^N [aT_i^1(s_i, s_{-i}) + (1-a)T_i^2(s_i, s_{-i})] = \quad (7.33) \\
 &= \sum_{i=1}^N \left[ -a \sum_{j \neq i, j=1}^N p_j G_{ji} f(c_j, c_i) - (1-a) \sum_{j \neq i, j=1}^N p_i G_{ij} f(c_i, c_j) \right] = \\
 &-a \sum_{j \neq i, j=1}^N p_j G_{ji} f(c_j, c_i) - (1-a) \sum_{j \neq i, j=1}^N p_i G_{ij} f(c_i, c_j) \\
 &\sum_{k \neq i, k=1}^N \left[ -a \sum_{j \neq k, j=1}^N p_j G_{jk} f(c_j, c_k) - (1-a) \sum_{j \neq k, j=1}^N p_k G_{kj} f(c_k, c_j) \right] = \\
 &= -a \sum_{j \neq i, j=1}^N p_j G_{ji} f(c_j, c_i) - (1-a) \sum_{j \neq i, j=1}^N p_i G_{ij} f(c_i, c_j) \\
 &+ \sum_{k \neq i, k=1}^N [-ap_i G_{ik} f(c_i, c_k) - a \sum_{j \neq k, j \neq i, j=1}^N p_j G_{jk} f(c_j, c_k) - \\
 &-(1-a)p_k G_{ki} f(c_k, c_i) - (1-a) \sum_{j \neq i, j \neq k, j=1}^N p_k G_{kj} f(c_k, c_j)] \\
 Pot(s_i, s_{-i}) &= -a \sum_{j \neq i, j=1}^N p_j G_{ji} f(c_j, c_i) - (1-a) \sum_{j \neq i, j=1}^N p_i G_{ij} f(c_i, c_j) \\
 &+ \sum_{k \neq i, k=1}^N [-ap_i G_{ik} f(c_i, c_k) - (1-a)p_k G_{ki} f(c_k, c_i)] + \\
 &\sum_{k \neq i, k=1}^N [-a \sum_{j \neq k, j \neq i, j=1}^N p_j G_{jk} f(c_j, c_k) - (1-a) \sum_{j \neq i, j \neq k, j=1}^N p_k G_{kj} f(c_k, c_j)]
 \end{aligned}$$

Έστω

$$Q(s_{-i}) = \sum_{k \neq i, k=1}^N [-a \sum_{j \neq k, j \neq i, j=1}^N p_j G_{jk} f(c_j, c_k) - (1-a) \sum_{j \neq i, j \neq k, j=1}^N p_k G_{kj} f(c_k, c_j)]$$

$$Pot(s_i, s_{-i}) = -a \sum_{j \neq i, j=1}^N p_j G_{ji} f(c_j, c_i) - (1-a) \sum_{j \neq i, j=1}^N p_i G_{ij} f(c_i, c_j)$$

$$\sum_{k \neq i, k=1}^N [-ap_i G_{ik} f(c_i, c_k) - (1-a)p_k G_{ki} f(c_k, c_i)] + Q(s_{-i})$$

Τότε:

$$= -(a + (1-a)) \sum_{j \neq i, j=1}^N p_j G_{ji} f(c_j, c_i) - ((1-a) + a) \sum_{j \neq i, j=1}^N p_i G_{ij} f(c_i, c_j)$$

$$+ Q(s_{-i}) = - \sum_{j \neq i, j=1}^N p_j G_{ji} f(c_j, c_i) - \sum_{j \neq i, j=1}^N p_i G_{ij} f(c_i, c_j) + Q(s_{-i})$$

Εάν ο χρήστης  $i$  αλλάξει στρατηγική από  $s_i$  σε  $s'_i$  τότε από (7.33) έχουμε ότι

$$Pot(s'_i, s_{-i}) = - \sum_{j \neq i, j=1}^N p_j G_{ji} f(c_j, c'_i) - \sum_{j \neq i, j=1}^N p_i G_{ij} f(c'_i, c_j)$$

$$+ Q(s_{-i})$$

Τότε έπεται:

$$\begin{aligned}
 & Pot(s_i, s_{-i}) - Pot(s'_i, s_{-i}) = \\
 & = - \sum_{j \neq i, j=1}^N p_j G_{ji} f(c_j, c_i) - \sum_{j \neq i, j=1}^N p_i G_{ij} f(c_i, c_j) + Q(s_{-i}) \\
 & - (- \sum_{j \neq i, j=1}^N p_j G_{ji} f(c_j, c'_i) - \sum_{j \neq i, j=1}^N p_i G_{ij} f(c'_i, c_j) + Q(s_{-i})) \\
 & = U_i(s_i, s_{-i}) - U_i(s'_i, s_{-i}) \\
 & \forall i \in N, \forall s_i, s'_i \in S_i
 \end{aligned}$$

Επομένως το παίγνιο  $G$  είναι ένα ακριβές δυναμικό παίγνιο με συνάρτηση δυναμικού  $Pot(s_i, s_{-i})$  ■.



# Δημοσιεύσεις στα Πλαίσια της Διδακτορικής Διατριβής

## A. Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Περιοδικά

1. G. Katsinis, E.E. Tsiropoulou, and S. Papavassiliou, "Multicell Interference Management in Device to Device Underlay Cellular Networks." *Future Internet*, vol. 9, issue 3, p.44, 2017.
2. G. Katsinis, E. E. Tsiropoulou, S. Papavassiliou, "Joint Resource Block and Power Allocation for Interference Management in Device to Device Underlay Cellular Networks: A Game Theoretic Approach." in *Mobile Networks and Applications*, Springer, 2016.
3. E.E. Tsiropoulou, P. Vamvakas, G. Katsinis, and S. Papavassiliou, "Combined power and rate allocation in self-optimized multi-service two-tier femtocell networks." *Computer Communications*, vol. 72, pp. 38-48, 2015.
4. E. E. Tsiropoulou, G. Katsinis and S. Papavassiliou, "Distributed Uplink Power Control in Multi-Service Wireless Networks via a Game Theoretic Approach with Convex Pricing." in *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 23, issue 1, pp. 61-68, 2012.

## B. Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Συνέδρια

1. G. Katsinis, E.E. Tsiropoulou, S. Papavassiliou, "On the Performance Evaluation of Distributed Resource Block and Power Allocation in D2D-enabled Multi-Cell Networks." *ACM International Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks*, November 2017, Miami, Fl, USA (to appear)
2. G. Katsinis, E.E. Tsiropoulou, S. Papavassiliou, "On the Problem of Resource Allocation and System Capacity Evaluation via a Blocking Queuing Model in D2D Enabled Overlay Cellular Networks." "In *Ad-hoc, Mobile, and Wireless Networks*, pp. 76-89, Springer International Publishing, 2015.
3. G. Katsinis, E. E. Tsiropoulou, S. Papavassiliou. "A game theoretic approach to the power control in D2D communications underlay cellular networks." *IEEE 19th*

- International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, 2014.
4. E.E. Tsiropoulou, G. Katsinis, A. Filios, S. Papavassiliou, "On the Problem of Optimal Cell Selection and Uplink Power Control in Open Access Multi-service Two-Tier Femtocell Networks." In *Ad-hoc, Mobile, and Wireless Networks* pp. 114-127, Springer International Publishing, 2014.
  5. E.E. Tsiropoulou, G. Katsinis, P. Vamvakas, S. Papavassiliou, "Efficient uplink power control in multi-service two-tier femtocell networks via a game theoretic approach." *IEEE 18th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, pp. 104-108, 2013.
  6. E.E. Tsiropoulou, G. Katsinis, and S. Papavassiliou, "Utility-based Power Control via Convex Pricing for the Uplink in CDMA Wireless Networks." *European Wireless Conference 2010*, April 2010.

## **C. Κεφάλαια σε Επιστημονικά Βιβλία**

1. E. Stai, V. Karyotis, G. Katsinis, E.E. Tsiropoulou, and S. Papavassiliou, "A Hyperbolic Big Data Analytics Framework within Complex and Social Networks." *Big Data in Complex and Social Networks*, p.1, 2016.



# Βιβλιογραφία

- [3GPP] 3GPP specifications <http://www.3gpp.org/specifications/specifications>, 2016.
- [AHM12] J.G. Andrews, C. Holger, M. Dohler, S. Rangan, and M. C. Reed. "Femtocells: Past, present, and future." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* vol. 30, no. 3, pp. 497-508, 2012.
- [APH12] K. Akkarajitsakul, P. Phunchongharn, E. Hossain, and V. K. Bhargava, "Mode Selection for Energy-Efficient D2D Communications in LTE-Advanced Networks: A Coalitional Game Approach." *IEEE International Conference on Communication Systems*, Nov. 2012.
- [AWM14] A. Asadi, Q. Wang, V. Mancuso, "A survey on Device-to-Device Communication in Cellular Networks." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.16, issue 4, 24 Apr. 2014.
- [Ber09] D. P. Bertsekas, Convex optimization theory, Belmont: Athena Scientific, 2009.
- [BJM4] N. Bhushan, L. Junyi, D. Malladi, R. Gilmore, D. Brenner, A. Damnjanovic, R. T. Sukhvasi, C. Patel, and S. Geirhofer. "Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G." *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 82-89, 2014.
- [BoV04] S. Boyd and L. Vandenberghe, Convex optimization, Cambridge University press, 2004.
- [BPG09] G. Boudreau, J. Panicker, N. Guo, R. Chang, N. Wang, & S. Vrzic, "Interference coordination and cancellation for 4G networks." *IEEE Communications Magazine*, 47(4), 2009.
- [CGA08] V. Chandrasekhar, A. Gatherer, J.G. Andrews, "Femtocell networks: a survey", *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, issue 9, pp. 59–67, 2008.
- [CHL08] M. Chiang, P. Hande, T. Lan and C.W. Tan, "Power control in wireless cellular networks." *Foundations and Trends® in Networking*, 2(4), pp.381-533, 2008.
- [ChS07] S. Chien, A. Sinclair, "Convergence to approximate Nash equilibria in congestion games." *18th annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms*. Society for Industrial and Applied Mathematics, pp. 169-178, 2007
- [Cis14] Cisco, "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2013-2018." White Paper, [Online] <http://goo.gl/177HAJ>, 2014.
- [CWG95] M. Colell, MD Whinston, and JR Green, Microeconomic Theory, Oxford Univ. Press, 1995.
- [DAM16] D. Della Penda, A. Abrardo, M. Moretti, & M. Johansson, "Potential games for subcarrier allocation in multi-cell networks with D2D communications." In *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, (pp. 1-6). ISO 690, 2016
- [DHK12] J. Dams, M. Hoefer, & T. Kesselheim, "Convergence time of power-control dynamics." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 30(11), 2231-2237, 2012
- [DSD13] A. De Domenico, E. C. Strinati, and A. Duda, "An energy efficient cell selection scheme for open access femtocell networks." *IEEE 23rd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2012.
- [DuG16] S. Durand, & B. Gaujal, "Complexity and Optimality of the Best Response Algorithm in Random Potential Games." In *International Symposium on Algorithmic Game Theory* (pp. 40-51). Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [DuM10] Ke-Lin Du and Madisetti NS Swamy, Wireless communication systems: from RF subsystems to 4G enabling technologies, Cambridge University Press, 2010.
- [DYR10] K. Doppler, C. Yu, C. B. Ribeiro, and P. Jänis, "Mode selection for Device-to-Device Communication underlying an LTE-Advanced Network." *IEEE Wireless Communications & Networking Conference*, April 2010.
- [EAH09] J. Ellenbeck, H. Al-Shatri, & C. Hartmann, "Performance of decentralized interference coordination in the LTE uplink." In *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall)*, 2009 *IEEE 70th* (pp. 1-5, 2009

- [EHB08] J. Ellenbeck, C. Hartmann, & L. Berlemann, "Decentralized inter-cell interference coordination by autonomous spectral reuse decisions." In *Wireless Conference, 2008. EW 2008. 14th European* (pp. 1-7). IEEE, 2008
- [FDM12] G. Fodor, E. Dahlman, G. Mildh, S. Parkvall, N. Reider, G. Miklós and Z. Turányi, Ericsson Research, "Design Aspects of Network Assisted Device-to-Device Communications." *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, issue 3, March 2012.
- [FJD12] G. Fodor, M. Johansson, P. Demia, B. Marco, & A. Abrardo, "A joint power control and resource allocation algorithm for D2D communications." (2012).
- [FKR09] G. Fodor, C. Koutsimanis, A. Rácz, N. Reider, N., A. Simonsson, & W. Müller, "Intercell interference coordination in OFDMA networks and in the 3GPP long term evolution system." *JCM*, 4(7), 445-453, 2009.
- [FLY13] D. Feng, L. Lu, Y. Yuan-Wu, GY Li, G. Feng, S. Li, "Device-to-device communications underlying cellular networks." *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, issue 8, pp. 3541-3551, 2013.
- [FLY14] D. Feng, L. Lu, Y. Yuan-Wu, GY Li, S. Li, G. Feng, "Device-to-device communications in cellular networks." *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, issue 4, pp. 49-55, 2014.
- [FoM93] G.J. Foschini and Z. Miljanic, "A simple distributed autonomous power control algorithm and its convergence." *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 42(4), pp.641-646, 1993.
- [FSH13] Z. Feng, L. Song, Z. Han, X. Zhao, "Cell selection in two-tier femtocell networks with open/closed access using evolutionary game." *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2013.
- [FuT91] D. Fudenberg and J. Tirole, *Game theory*, MIT Press, 1991.
- [GBC11] J. Gu, S. J. Bae, B. Choi, and M. Chung, "Dynamic power control mechanism for interference coordination of device-to-device communication in cellular networks." *Proc. of ICUFN 2011*.
- [GSG16] X. Ge, T. Song, M. Guoqiang, Cheng-Xiang Wang, and Tao Han, "5G ultra-dense cellular networks." *IEEE Wireless Communications* vol. 23, no. 1, pp. 72-79, 2016.
- [GTP14] A. Ghazanfari, A. Tolli, & H. Pennanen, "Sum power minimization for cellular systems with underlay d2d communications." In *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM)*, 2014 9th International Conference on (pp. 45-50). IEEE, 2014
- [Hay13] S. Haykin, *Digital Communication systems*. John Wiley & Sons, 2013.
- [HRT14] E. Hossain, M. Rasti, H. Tabassum, and A. Abdelnasser, "Evolution toward 5G multi-tier cellular wireless networks: An interference management perspective." *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, no. 3, pp. 118-127, 2014.
- [HSC15] J. Huang, Y. Sun, & Q. Chen, "GALLERY: A Game-Theoretic Resource Allocation Scheme for Multicell Device-to-Device Communications Underlying Cellular Networks." *IEEE Internet of Things Journal*, 2(6), 504-514. Chicago, 2015
- [HYS15] J. Huang, Y. Yin, Y. Sun, Y. Zhao, C. C. Xing, & Q. Duan, "Game theoretic resource allocation for multicell D2D communications with incomplete information." In *Communications (ICC), 2015 IEEE International Conference on* (pp. 3039-3044). IEEE, 2015.
- [JLZ16] Y. Jiang, Q. Liu, F. Zheng, X. Gao, & X. You, "Energy-efficient joint resource allocation and power control for D2D communications." *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(8), 6119-6127, 2016.
- [JWS16] F. Jiang, B. C. Wang, C.Y. Sun, Y. Liu, & X. Wang, "Resource allocation and dynamic power control for D2D communication underlying uplink multi-cell networks." *Wireless Networks*, 1-15. 2016.
- [KPK07] T. Kastrinogiannis, S. Papavassiliou, K. Kastrinogiannis, D. Soulios, "A Utility-Based Resource Allocation Approach for the Downlink in CDMA Wireless networks with Multimedia Services." *Proc. of the 18th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, September 2007.

- [KTP08] T. Kastrinogiannis, E. E. Tsiropoulou, and S. Papavassiliou, "Utility-Based Uplink Power Control in CDMA Wireless Networks with Real-Time Services." in *Ad-hoc, Mobile and Wireless Networks (LNCS) Springer*, vol. 5198, p.p. 307-320, September, 2008.
- [KTP14] G. Katsinis, E.E. Tsiropoulou and S. Papavassiliou, "A Game Theoretic Approach to the Power Control in D2D Communications Underlay Cellular Networks." *IEEE International Workshop on Computer-Aided Modeling Analysis and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, Athens, Greece, 2014.
- [KTP15] G. Katsinis, E.E. Tsiropoulou, and S. Papavassiliou, "On the Problem of Resource Allocation and System Capacity Evaluation via a Blocking Queuing Model in D2D enabled Overlay Cellular Networks." in *Ad-hoc, Mobile and Wireless Networks (LNCS) Springer*, June, 2015.
- [KTP16] G. Katsinis, E. E. Tsiropoulou, & S. Papavassiliou, "Joint Resource Block and Power Allocation for Interference Management in Device to Device Underlay Cellular Networks: A Game Theoretic Approach." *Mobile Networks and Applications*, 1-13, 2016
- [KTP17a] G. Katsinis, E. E. Tsiropoulou, S. Papavassiliou, "Multicell Interference Management in Device to Device Underlay Cellular Networks." *Future Internet, MDPI*, vol. 9, no. 3, pp. 1- 20, 2017.
- [KTP17b] G. Katsinis, E.E. Tsiropoulou, S. Papavassiliou, "On the Performance Evaluation of Distributed Resource Block and Power Allocation in D2D-enabled Multi-Cell Networks." *ACM International Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks*, November 2017, Miami, FL, USA (to appear)
- [Kuh05] Kuhn, H. W. The Hungarian method for the assignment problem. *Naval Research Logistics (NRL)*, 52(1), 7-21, 2005.
- [LAG14] X. Lin, J. G. Andrews and A. Ghosh, "Spectrum Sharing for Device-to-Device Communication in Cellular Networks." Sep. 2014, online: <http://arxiv.org/abs/1305.4219>.
- [LaT11] S. Lasaulce and H. Tembine, Game theory and learning for wireless networks: fundamentals and applications, *Academic Press*, 2011.
- [Lee06] William CY Lee, Wireless and cellular telecommunications, *McGraw-Hill Professional*, 2006.
- [LiF11] J.S. Lin, K.T. Feng, "Game theoretical model and existence of win-win situation for femtocell networks." *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2011.
- [LMS06] J.-W. R. Lee, R. Mazumdar, N. B. Shroff, "Joint resource allocation and base-station assignment for the downlink in CDMA networks." *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 14, no. 1, Feb. 2006.
- [LPX12] Z. Liu, T. Peng, S. Xiang, W. Wang, "Mode Selection for Device-to-Device (D2D) Communication under LTE-Advanced Networks." *International Conference on Communications*, 2012.
- [LZL12] L. Lei, Z. Zhong, C. Lin, X. Shen, "Operator controlled device-to-device communications in LTE-advanced networks." *IEEE Wireless Communications*, vol. 19, issue 3, June 2012.
- [Man08] G. Mansfield, "Femtocells in the US Market - Business Drivers and Consumer Propositions." In: *Femtocells Europe 2008*, London, UK (June 2008).
- [MoS96] D. Monderer, L.S. Shapley, "Potential games." *Games and economic behavior vol. 14*, issue 1, pp. 124-43, 1996.
- [MPH07] F. Meshkati, H. V. Poor, & S. C. Schwartz, "Energy-efficient resource allocation in wireless networks." *IEEE Signal Processing Magazine*, 24(3), 58-68, 2007.
- [MPS05] F. Meshkati, H. Poor, S.C. Schwartz, R. Balan, "Energy-Efficient Resource Allocation in Wireless Networks with Quality-of-Service Constraints." *IEEE Transactions on Communications*, Princeton University, 2005.
- [MZS16] G. Miao, J. Zander, K. W. Sung, S. B Slimane, Fundamentals of Mobile Data Networks, *Cambridge University Press*, 2016.
- [Nee06] J. O. D. Neel, "Analysis and design of cognitive radio networks and distributed radio resource management algorithms" (Doctoral dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University), 2006

- [PaS98] C. Papadimitriou, K. Steiglitz, "Combinatorial optimization: algorithms and complexity." Dover Publications, 1998
- [PHD13] P. Phunchongharn, E. Hossain, Dong KI, "Resource allocation for device-to-device communications underlying LTE-advanced networks." *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, issue 4, pp. 91-100, 2013.
- [PTT94] S. Papavassiliou, L. Tassiulas and P. Tandon, "Meeting QOS Requirements in a Cellular Network with Reuse Partitioning." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 12, no. 8, October 1994.
- [Qua14] Qualcomm, The evolution of mobile technologies 1g to 2g to 3g to 4g LTE, 2014.
- [Ros65] J. Ben Rosen, "Existence and uniqueness of equilibrium points for concave n-person games." *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, pp. 520-534, 1965.
- [RVP10] G. De La Roche, A. Valcarce, D. López-Pérez, and J. Zhang, "Access control mechanisms for femtocells." *IEEE Communications Magazine* vol. 48, no. 1, pp. 33-39. Harvard, 2010.
- [SMG02] C. U. Saraydar, N. B. Mandayam, and D. J. Goodman, "Efficient power control via pricing in wireless data networks." *IEEE Transactions on Communications.*, vol. 50, pp. 291–303, Feb. 2002.
- [SUM16] G. A.Safdar, M. Ur-Rehman, M. Muhammad, M.A. Imran, & R. Tafazolli, "Interference Mitigation in D2D Communication Underlying LTE-A Network." *IEEE Access*, 2016
- [TBP16] E.E. Tsiropoulou, J. Baras, S. Papavassiliou, G. Qu, "On the Mitigation of Interference Imposed by Intruders in Passive RFID Networks." *Conference on Decision and Game Theory for Security (GameSec)*, pp. 62-80, Nov., 2016.
- [TBP17] E.E. Tsiropoulou, J.S. Baras, S. Papavassiliou, and S. Sinha, "RFID-based smart parking management system." *Cyber-Physical Systems*, pp.1-20., 2017
- [TGV16] E.E. Tsiropoulou, I. Gialagkolidis, P. Vamvakas, and S. Papavassiliou, "Resource Allocation in Visible Light Communication Networks: NOMA vs OFDMA Transmission Techniques." in *International Conference on Ad Hoc Networks (LNCS) Springer*, pp. 32-46, July, 2016.
- [TKF14] E.E. Tsiropoulou, G. 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." in *Ad-hoc, Mobile and Wireless Networks (LNCS) Springer*, June, 2014.
- [TKP09] E.E. Tsiropoulou, T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, "A Utility-based Power Allocation Non-cooperative Game for the Uplink in Multi-Service CDMA Wireless Networks." *Proc. of IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, pp. 365-370, Leipzig, Germany, June, 2009.
- [TKP09a] E.E. Tsiropoulou, T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, "Uplink power control in qos-aware multi-service cdma wireless networks." *Journal of Communications*, vol. 4, no. 9, 654-668, 2009.
- [TKP09b] E. E. Tsiropoulou, T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, "Realization of QoS Provisioning in Autonomic CDMA Networks under Common Utility-Based Framework." in *Proc. of IEEE WoWMoM workshop on Autonomic and Opportunistic Communications (AOC)*, June, 2009.
- [TKP10a] E.E. Tsiropoulou, T. Kastrinogiannis and S. Papavassiliou, "Non-cooperative Power Control in CDMA Wireless Networks." in "Game Theory for Wireless Communications and Networking" book, Auerbach Publications, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010.
- [TKP10b] E.E. Tsiropoulou, G. Katsinis, and S. Papavassiliou, "Utility-based Power Control via Convex Pricing for the Uplink in CDMA Wireless Networks." *European Wireless Conference 2010*, April 2010.
- [TKP12] E.E. Tsiropoulou, G. Katsinis and S. Papavassiliou, "Distributed uplink power control in multiservice wireless networks via a game theoretic approach with convex pricing." *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 23, issue 1, 61-68, 2012.

- [TKP13] E. E. Tsiropoulou, A. Kapoukakis and S. Papavassiliou, "Energy-efficient Subcarrier Allocation in SC-FDMA Wireless Networks based on Multilateral Model of Bargaining." *IFIP Networking 2013*, pp. 1-9, Brooklyn, 2013.
- [TKP16] E. E. Tsiropoulou, A. Kapoukakis, and S. Papavassiliou, "Uplink resource allocation in SC-FDMA wireless networks: A survey and taxonomy." *Computer Networks*, 96, pp.1-28, 2016.
- [TKS13] P. Tarasak, A. Koichiro and S. Sun, "Cell selection for TDD two-tier cellular networks based on uplink-downlink capacity." *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2013.
- [TKV13] E. E. Tsiropoulou, G. Katsinis, P. Vamvakas, S. Papavassiliou, "Efficient uplink power control in multi-service two-tier femtocell networks via a game theoretic approach." *IEEE 18th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, pp. 104-108, 2013.
- [Top79] D. M. Topkis, "Equilibrium points in nonzero sum n-person submodular games." *SIAM J. Control and Optimization*, vol. 17, no. 6, pp. 773–787, 1979.
- [Top98] D. M Topkis, Supermodularity and complementarity, *Princeton university press*, 1998
- [TPB17] E.E. Tsiropoulou, S.T. Paruchuri, J. Baras, "Interest, Energy and Physical-Aware Coalition Formation and Resource Allocation in Smart IoT Applications." *51st Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, pp. 1-6, March, 2017.
- [TR 36.843] 3GPP "Study on LTE Device to Device Proximity Services; Radio Aspects." TR 36.843, V12.0.1, 2014.
- [TS 36.300] LTE, ETSI. "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) (3GPP TS 36.300, version 8.11. 0 Release 8), December 2009." *ETSI TS 136.300 (2011): V8*.
- [TS 36.420] 3GPP, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (EUTRAN); X2 general aspects and principles." TS 36.420, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Dec. 2007
- [TS 36.211] 3GPP "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation.", Tech. Spec. TS 36.211, Rel. 12, 2014.
- [TsV05] D. Tse, and P. Viswanath Fundamentals of wireless communication. *Cambridge university press*, 2005.
- [TsP11] E. E. Tsiropoulou and S. Papavassiliou, "Utility-based Uplink Joint Power & Subcarrier Allocation in SC-FDMA Wireless Networks." in *International Journal of Electronics, Taylor & Francis*, Vol. 98, Issue 11, pp. 1581-1587, 2011.
- [TVK15] E. E. Tsiropoulou, P. Vamvakas, G. Katsinis, S. Papavassiliou, "Combined Power and Rate Allocation in Self- Optimized Multi-Service Two-Tier Femtocell Networks." *Computer Communications*, Elsevier, vol. 72, pp. 38-48, 2015.
- [TVP12] E.E. Tsiropoulou, P. Vamvakas, and S. Papavassiliou, "Joint Utility-based Uplink Power and Rate Allocation in Wireless Networks: A Non-cooperative Game Theoretic Framework." *Elsevier Physical Communications Journal*, vol. 9, pp. 299-307, 2012.
- [TVP12] E.E. Tsiropoulou, P. Vamvakas, and S. Papavassiliou, "Energy Efficient Uplink Joint Resource Allocation Noncooperative Game with Pricing." in *Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2012)*, pp. 2352-2356, April, 2012
- [TVP16] E. E. Tsiropoulou, P. Vamvakas, S. Papavassiliou, "Resource Allocation in Multi-tier Femtocell and Visible- Light Heterogeneous Wireless Networks." Book Chapter in "Resource Allocation in Next-Generation Broadband Wireless Access Networks" Book, Editors: Chetna Singhal and Swades De, 2016.
- [TVP17a] E. E. Tsiropoulou, P. Vamvakas and S. Papavassiliou, "Supermodular Game-Based Distributed Joint Uplink Power and Rate Allocation in Two-Tier Femtocell Networks." in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 16, no. 9, pp. 2656-2667, Sept. 1, 2017.
- [TVP17b] E.E. Tsiropoulou, P. Vamvakas, and S. Papavassiliou, "Joint Customized Price and Power Control for Energy-Efficient Multi-Service Wireless Networks via S-Modular Theory." *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 1(1), pp.17-28, 2017.

- [TZP15a] E. E. Tsiropoulou, I. Ziras, S. Papavassiliou, "A Game Theoretic Model for Resource Allocation in Multi- Service SC-FDMA Wireless Networks." *EAI Endorsed Transactions on Mobile Communications and Applications*, 2015. DOI: 10.4108/eai.20-6-2016.151515
- [TZP15b] E.E. Tsiropoulou, I. Ziras and S. Papavassiliou, "Service Differentiation and Resource Allocation in SC-FDMA Wireless Networks through User-Centric Distributed Non-Cooperative Multilateral Bargaining." in *7th International Conference on Ad Hoc Networks (LNCS) Springer*, pp. 42-54, 2015.
- [Ui00] T. Ui, A Shapley value representation of potential games, *Games and Economic Behavior*, 31(1), 121-135, 2000.
- [VTP17a] P. Vamvakas, E.E. Tsiropoulou, and S. Papavassiliou, "Dynamic Provider Selection & Power Resource Management in Competitive Wireless Communication Markets." *Mobile Networks and Applications*, pp.1-14, 2017.
- [VTP17b] P. Vamvakas, E.E. Tsiropoulou, S. Papavassiliou, J. Baras, "Optimization and Resource Management in NOMA Wireless Networks Supporting Real and Non-real Time Service Bundling." *22nd IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pp. 697-703, July, 2017.
- [VTV17] P. Vamvakas, E.E. Tsiropoulou, M. Vomvas, S. Papavassiliou, "Adaptive Power Management in Wireless Powered Communication Networks: A User-Centric Approach." 38th IEEE Sarnoff Symposium 2017, Sept., 2017.
- [WXS15] F. Wang, C. Xu, L. Song and Z. Han, "Energy-Efficient Resource Allocation for Device-to-Device Underlay Communication." *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, issue 4, pp. 2082-2092, 2015.
- [WZZ13] J. Wang, D. Zhu, C. Zhao, JCF. Li and M. Lei, "Resource sharing of underlaying device-to-device and uplink cellular communications." *IEEE Communications Letters*, vol. 17, issue 6, pp. 1148-1151, 2013.
- [XSC03] M. Xiao, N.B. Shroff, E.K.P. Chong, "A utility-based power-control scheme in wireless cellular systems." *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 11, issue 2, 2003
- [XSH13] C. Xu, L. Song, Z. Han, Q. Zhao, X. Wang, X. Cheng, B. Jiao, "Efficiency resource allocation for device-to-device underlay communication systems: a reverse iterative combinatorial auction based approach." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, issue 9, pp. 348-358, 2013.
- [XYH12] Xu, Y., Yin, R., Han, T., & Yu, G., "Interference-aware channel allocation for device-to-device communication underlaying cellular networks." 1st IEEE International Conference on Communications in China (ICCC), pp. 422-427, 2012.
- [Yan09] M. Yannakakis, "Equilibria, fixed points, and complexity classes." *Computer Science Review* 3(2):71-85, 2009.
- [Yat95] R.D. Yates, "A framework for uplink power control in cellular radio systems." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 13, issue 7, pp. 1341-1347, 1995.
- [YDR11] CH Yu, K. Doppler, C. Ribeiro, O. Tirkkonen, "Resource sharing optimization for device-to-device communication underlaying cellular networks." *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, issue 8, pp. 2752-2763, 2011.
- [YTD09a] C.H. Yu, O. Tirkkonen, K. Doppler, and C. B. Ribeiro, "On the Performance of Device-to-Device Underlay Communication with Simple Power Control." in *Proc. IEEE 69th Vehicular Technology Conference*, pp. 1-5, Apr. 2009.
- [YTD09b] C.-H. Yu, O. Tirkkonen, K. Doppler, C. Ribeiro, "Power Optimization of Device-to-Device Communication Underlaying Cellular Communication." *IEEE International Conference on Communications*, June 2009.
- [YYZ15] R. Yin R, G. Yu, H. Zhang, Z. Zhang, YG Li "Pricing-based interference coordination for D2D communications in cellular networks." *IEEE Transactions on Wireless Communications* 14(3):1519-1532, 2015
- [YZY15] R. Yin, C. Zhong, G. Yu, Z. Zhang et al., "Joint Spectrum and Power Allocation for D2D Communications Underlaying Cellular Networks." *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, issue 4, pp. 2182-2195, 2015.

- [ZDO15] Z. Zhou, M. Dong, K. Ota, R. Shi, Z. Liu, & T. Sato, "Game-theoretic approach to energy-efficient resource allocation in device-to-device underlay communications." *IET Communications*, 9(3), 375-385, 2015.
- [ZHS10] M. Zulhasnine, C. Huang, A. Srinivasan, "Efficient resource allocation for device-to-device communication underlying LTE network." *IEEE 6th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, pp. 368-375, 2010.