



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΜΟΙΡΑΣΜΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΕ ΓΝΩΣΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΘΕΩΡΙΑΣ ΠΑΙΓΝΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

**ΑΝΑΡΓΥΡΟΥ Ι. ΡΟΥΜΕΛΙΩΤΗ**

**Επιβλέπων:** Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΜΟΙΡΑΣΜΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΕ ΓΝΩΣΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΘΕΩΡΙΑΣ ΠΑΙΓΝΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

**ΑΝΑΡΓΥΡΟΥ Ι. ΡΟΥΜΕΛΙΩΤΗ**

**Επιβλέπων:** Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος  
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 23<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου 2014

.....  
Αθανάσιος Παναγόπουλος  
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Χρήστος Καψάλης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γεώργιος Φικιώρης  
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ρουμελιώτης Ι. Ανάργυρος  
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ρουμελιώτης Ι. Ανάργυρος, 2014

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση του θέματος της διπλωματικής εργασίας μου και την βοήθεια που μου προσέφερε όποτε οι συνθήκες την καθιστούσαν απαραίτητη. Μάλιστα, με το συγκεκριμένο θέμα απέκτησα επιπλέον επιστημονικές γνώσεις σε ένα καινούριο προς εμένα ερευνητικό τομέα, που παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Διδάκτορα Μηχανικό Σταυρούλα Βασσάκη, για τη συνεχή εποπτεία της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας μου και τη διαρκή προθυμία της να με βοηθά κάθε φορά που απευθυνόμουν σε αυτήν.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου που με στηρίζουν σε κάθε μου προσπάθεια και κυρίως του γονείς μου, Ιωάννη και Βασιλική, για την αμέριστη αγάπη που μου δείχνουν και την απεριόριστη στήριξη σε κάθε νέο βήμα στη ζωή μου.



## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται ο διαμοιρασμός φάσματος σε γνωστικά ραδιοσυστήματα με τη χρήση της θεωρίας παιγνίων. Την τελευταία δεκαετία ο τομέας των γνωστικών ραδιοσυστημάτων αποτέλεσε αντικείμενο εκτενούς έρευνας και συνεχίζει να προσελκύει πολλούς ερευνητές, καθώς διαρκώς νέες προκλήσεις εγείρονται ως προς τους τρόπους υλοποίησής τους, αφού οι ανάγκες των χρηστών πληθαίνουν μέσα σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι παραπάνω προκλήσεις, η θεωρία παιγνίων αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη, τη μοντελοποίηση και την ανάλυση των γνωστικών διαδραστικών διαδικασιών.

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται μια επισκόπηση των χαρακτηριστικών των γνωστικών ραδιοσυστημάτων. Αυτά αναπτύχθηκαν για να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα της μη αποδοτικής χρησιμοποίησης του σπάνιου φασματικού πόρου από τους αδειοδοτημένους χρήστες, που ονομάζονται πρωτεύοντες χρήστες. Μάλιστα, υποστηρίζουν τη δυναμική πρόσβαση μη αδειοδοτημένων χρηστών, που ονομάζονται δευτερεύοντες χρήστες, σε τμήματα του φάσματος, που λέγονται «φασματικές τρύπες» και τα οποία κάποιες χρονικές στιγμές δε χρησιμοποιούνται από τους αδειοδοτημένους κατόχους τους. Βέβαια, τα γνωστικά συστήματα χρειάζονται ευφυείς-γνωστικούς πομπούς και δέκτες, ώστε να προσαρμόζονται στις αλλαγές του περιβάλλοντος.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται σύντομα η θεωρία παιγνίων, η οποία παρέχει καλά ορισμένα κριτήρια ισορροπίας για τη βελτιστότητα ένας παιγνίου υπό διαφορετικές συνθήκες. Έτσι, μπορεί να μοντελοποιήσει τα αντικρουόμενα ή τα κοινά συμφέροντα των χρηστών του γνωστικού ραδιοσυστήματος, που διεκδικούν πρόσβαση στο φάσμα. Επιπλέον, παρουσιάζονται διάφορα είδη παιγνίων με ιδιαίτερη έμφαση στα μη συνεργατικά παίγνια και αναπτύσσεται η έννοια της ισορροπίας Nash.

Στο Κεφάλαιο 3 εξετάζονται οικονομικές θεωρίες που χρησιμοποιούνται στη δυναμική φασματική πρόσβαση, όπως είναι το μονοπώλιο, το ολιγοπώλιο, η θεωρία δημοπρασιών και η θεωρία των συναρτήσεων χρησιμότητας. Στην ολιγοπωλιακή θεωρία παρουσιάζεται αναλυτικά το παίγνιο Stackelberg ή παίγνιο «αρχηγού-ακολουθού», που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία και στο τέλος του κεφαλαίου περιγράφονται κάποια σχετικά άρθρα από τη σύγχρονη βιβλιογραφία.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύεται πιο συγκεκριμένα ένα παιγνιοθεωρητικό μοντέλο για το διαμοιρασμό φάσματος. Πραγματοποιήθηκαν αναλυτικές και ακριβείς προσομοιώσεις σε περιβάλλον Matlab. Γίνεται παρουσίαση και ανάλυση των γραφημάτων που προέκυψαν και εξετάζονται τα οφέλη της συνεργασίας των πρωτευόντων και δευτερευόντων χρηστών, σε κάθε περίπτωση.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται συνοπτικά τα σημαντικότερα συμπεράσματα των προσομοιώσεων και παρατίθενται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

### Λέξεις κλειδιά

Γνωστικό δίκτυο, δυναμική πρόσβαση στο φάσμα, πρωτεύων χρήστης, δευτερεύων χρήστης, θεωρία παιγνίων, ισορροπία Nash, μη συνεργατικό παίγνιο, παίγνιο Stackelberg, θεωρία χρησιμότητας.





## Abstract

The scope of this Diploma thesis is to study the spectrum sharing in cognitive radio systems with the usage of game theory. In the last decade the area of cognitive radio systems has been the subject of extensive research and still attracts many researchers. New challenges are continuously arising such to how to implement them practically and that the cognitive users' needs are being multiplied in complicated radio environment. To address the above technical challenges, game theory is an important tool that can be used for the study, the modeling and the analysis of cognitive interactive processes.

The 1<sup>st</sup> Chapter provides an overview of the characteristics of cognitive radio systems. These were developed to address the problem of inefficient usage of scarce spectral resource by licensed users which are named as primary users. Furthermore, these systems support dynamic access of unlicensed users, called secondary users, in parts of the spectrum, called "spectral holes", which are some times not used by licensed owners. However, the cognitive systems need intelligent-cognitive transmitters and receivers in order to be adaptable to the environmental changes and the spectrum usage.

The 2<sup>nd</sup> Chapter analyzes game theory, which provides well-defined equilibrium criteria for a game's optimality under different circumstances. Therefore it is a good solution for modeling the common or conflicting interests of cognitive users who compete to access the spectrum. In addition, various types of games are also presented with particular emphasis on non-cooperative games and finally the concept of Nash equilibrium is explained.

The 3<sup>rd</sup> Chapter describes economic theories that can be employed for the dynamic spectrum access, such as monopoly, oligopoly, auction theory and the theory of utility functions. In oligopoly theory, the Stackelberg or "leader-follower" game is presented, which is mainly used in this thesis and at the end of this chapter some related articles from the recent literature are discussed.

The 4<sup>th</sup> Chapter presents general game theoretic model for the spectrum sharing. Analytical and accurate simulations have been implemented in Matlab. Moreover, there is a discussion for the simulations' results and figures and examining the benefits of cooperation between primary and secondary users in each case.

The 5<sup>th</sup> and final Chapter summarizes the main conclusions of the simulations that have been presented in the previous Chapter and also provides recommendations for future research and study on cognitive radio systems.

### Key words

Cognitive radio network, dynamic spectrum sharing, primary user, secondary user, game theory, Nash equilibrium, non-cooperative game, Stackelberg game, utility theory.



# Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:	ΓΝΩΣΤΙΚΑ ΡΑΔΙΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	16
1.1	Εισαγωγή.....	17
1.2	Επισκόπηση γνωστικών ραδιοσυστημάτων .....	18
1.3	Βασικές λειτουργίες των γνωστικών ραδιοσυστημάτων.....	20
1.3.1	Ανίχνευση «φασματικών οπών».....	24
1.3.2	Δυναμική πρόσβαση στο φάσμα.....	25
1.3.3	Αρχιτεκτονική γνωστικών ραδιοσυστημάτων.....	28
1.3.4	Θερμοκρασία παρεμβολής .....	30
1.3.5	Συνεργατική επικοινωνία.....	32
1.3.6	Έλεγχος ισχύος στα γνωστικά ραδιοσυστήματα.....	36
1.3.7	Εκτίμηση της κατάστασης καναλιού .....	37
1.3.8	Διαχείριση του καναλιού ελέγχου .....	38
1.3.9	Ασφάλεια στα γνωστικά ραδιοσυστήματα.....	38
1.3.10	Πιθανές εφαρμογές των γνωστικών ραδιοσυστημάτων .....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:	ΘΕΩΡΙΑ ΠΑΙΓΝΙΩΝ .....	42
2.1	Εισαγωγή.....	42
2.2	Ιστορική επισκόπηση .....	42
2.3	Γενικά στοιχεία και βασικές αρχές της θεωρίας παιγνίων .....	43
2.3.1	Μορφές αναπαράστασης παιγνίων.....	44
2.3.2	Κατηγορίες παιγνίων.....	48
2.4	Σημαντικά στοιχεία της μη συνεργατικής θεωρίας παιγνίων .....	54
2.4.1	Είδη λύσεων .....	54
2.4.2	Τεχνικές βελτιστοποίησης μη αποδοτικής ισορροπίας Nash .....	59
2.4.3	Μικτή στρατηγική .....	60
2.5	Παίγνιο «διαπραγμάτευσης» μεταξύ αγοραστή και πωλητή .....	62
2.6	Παίγνιο συμμαχίας (coalition game) .....	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:	ΔΙΑΜΟΙΡΑΣΜΟΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ.....	65
3.1	Οικονομικές θεωρίες για τη δυναμική πρόσβαση στο φάσμα .....	65
3.1.1	Μονοπώλιο .....	66
3.1.2	Ολιγοπώλιο .....	66
3.1.3	Θεωρία δημοπρασιών .....	71
3.1.4	Θεωρία χρησιμότητας.....	74

3.2	Επισκόπηση σχετικής βιβλιογραφίας .....	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΙΓΝΙΟΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΓΙΑ ΤΟ ΔΙΑΜΟΙΡΑΣΜΟ ΕΥΡΟΥΣ ΖΩΝΗΣ ΣΕ		
ΓΝΩΣΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ .....		
4.1	Μοντέλο συστήματος και συνάρτηση χρησιμότητας.....	80
4.1.1	Μοντέλο συστήματος .....	80
4.1.2	Συναρτήσεις χρησιμότητας.....	83
4.2	Παιγνιοθεωρητική ανάλυση δικτύων με ένα πρωτεύοντα χρήστη.....	84
4.2.1	Βέλτιστες στρατηγικές για τους δευτερεύοντες χρήστες .....	84
4.2.2	Βέλτιστη στρατηγική για τον πρωτεύοντα χρήστη .....	87
4.2.3	Απόδειξη της ύπαρξης ισορροπίας.....	88
4.3	Παρουσίαση συνεργατικού μηχανισμού με πολλαπλούς πρωτεύοντες χρήστες....	91
4.4	Παρουσίαση-Σχολιασμός αποτελεσμάτων προσομοίωσης .....	95
4.4.1	Προσομοίωση συστήματος με έναν πρωτεύοντα χρήστη.....	95
4.4.2	Επίδραση του διαφορετικού αριθμού δευτερευόντων χρηστών στο σύστημα με ένα πρωτεύοντα χρήστη και τυχαία τοπολογία .....	99
4.4.3	Προσομοίωση συστήματος με πολλαπλούς πρωτεύοντες χρήστες.....	105
4.4.4	Επίδοση του συστήματος πολλαπλών πρωτευόντων χρηστών .....	107
4.4.5	Επίδραση του διαφορετικού αριθμού δευτερευόντων χρηστών στο σύστημα με πολλαπλούς πρωτεύοντες χρήστες και τυχαία τοπολογία.....	108
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα - Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....		
109		
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....		
111		

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Απεικόνιση "Φασματικών Τρυπών" .....	18
Σχήμα 1.2: Αρχιτεκτονική γνωστικού ραδιο-εκπομπού.....	19
Σχήμα 1.3: Ενδεικτική χρήση του φασματικού πόρου .....	20
Σχήμα 1.4: α) Κεντρικοποιημένο σύστημα και β) Κατανεμημένο σύστημα.....	21
Σχήμα 1.5: Γνωστικός κύκλος κατά Mitola.....	23
Σχήμα 1.6: Γνωστικός κύκλος κατά Haykin .....	24
Σχήμα 1.7: α) Interweave προσέγγιση και β) Underlay προσέγγιση.....	27
Σχήμα 1.8: Η στοιβα πρωτοκόλλων στο γνωστικό ραδιοσύστημα.....	28
Σχήμα 1.9: Συνύπαρξη CRN με άλλα πρωτεύοντα δίκτυα .....	29
Σχήμα 1.10: Τρόποι συνεργασίας μεταξύ του PU και SU δικτύου .....	32
Σχήμα 1.11: Μια γενική απεικόνιση της διαδικασίας διαμοιρασμού του φάσματος .....	33
Σχήμα 1.12: Δέκτης EGC.....	35
Σχήμα 1.13: Δέκτης MRC.....	35
Σχήμα 1.14: Αναπαράσταση ITS δικτύου.....	41
Σχήμα 2.1: Εκτεταμένη μορφή του παιχνιδιού "Κορώνα-Γράμματα" .....	45
Σχήμα 3.1: Σενάριο για backward induction.....	70
Σχήμα 3.2: Τα τρία είδη των δημοπρασιών .....	72
Σχήμα 3.3: Παράδειγμα ζήτησης και προσφοράς στη διπλή δημοπρασία .....	73
Σχήμα 4.1: Εποπτική αναπαράσταση του μοντέλου του συστήματος.....	80
Σχήμα 4.2: Αλγόριθμος A-Εκχώρηση SU .....	92
Σχήμα 4.3: Αλγόριθμος B- Επιλογή αναμεταδοτών.....	93
Σχήμα 4.4: Αλγόριθμος C-Αναβάθμιση PU .....	94
Σχήμα 4.5: Τυχαία τοπολογία του συστήματος με έναν PU.....	96
Σχήμα 4.6: Παρουσίαση της βέλτιστης στρατηγικής και της χρησιμότητας των SUs στο σύστημα με έναν πρωτεύοντα χρήστη .....	98
Σχήμα 4.7: Χρησιμότητα του PU και βέλτιστο $\alpha$ σε σύστημα με έναν πρωτεύοντα χρήστη και διαφορετικό αριθμό αναμεταδοτών .....	99
Σχήμα 4.8: Εκτίμηση αποτελεσμάτων 4000 επαναλήψεων με διαφορετικό αριθμό SUs και διαφορετική απόσταση μεταξύ STs και SRs: εκτίμηση αριθμού αναμεταδοτών .....	100
Σχήμα 4.9: Εκτίμηση αποτελεσμάτων 4000 επαναλήψεων με διαφορετικό αριθμό SUs και διαφορετική απόσταση μεταξύ STs και SRs: εκτίμηση του $\alpha^*$ .....	101
Σχήμα 4.10: Εκτίμηση αποτελεσμάτων 4000 επαναλήψεων με διαφορετικό αριθμό SUs και διαφορετική απόσταση μεταξύ STs και SRs: εκτίμηση των χρησιμότητων του PU και των SUs .....	102
Σχήμα 4.11: Εκτίμηση αποτελεσμάτων 4000 επαναλήψεων με διαφορετικό αριθμό SUs και διαφορετική παράμετρο $m$ : εκτίμηση αριθμού αναμεταδοτών.....	103
Σχήμα 4.12: Εκτίμηση αποτελεσμάτων 4000 επαναλήψεων με διαφορετικό αριθμό SUs και διαφορετική παράμετρο $m$ : εκτίμηση του $\alpha^*$ .....	104
Σχήμα 4.13: Εκτίμηση αποτελεσμάτων 4000 επαναλήψεων με διαφορετικό αριθμό SUs και διαφορετική παράμετρο $m$ : εκτίμηση των χρησιμότητων του PU και των SUs.....	105
Σχήμα 4.14: Τοπολογία συστήματος με δυο πρωτεύοντες χρήστες .....	106
Σχήμα 4.15: Παρουσίαση τόσο της εκχώρησης των SUs, όσο και των αντίστοιχων αναμεταδοτών σε κάθε PU.....	106

Σχήμα 4.16: Καμπύλη μέσης χρησιμότητας των PUs για σύστημα με δυο πρωτεύοντες χρήστες.....	107
Σχήμα 4.17: Εκτίμηση αποτελεσμάτων 4000 επαναλήψεων με διαφορετικό αριθμό SUs και διαφορετική απόσταση μεταξύ STs και SRs: εκτίμηση των χρησιμότητων των PUs και των SUs .....	108

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1-1: Αδειοδοτημένη κατανομή φάσματος στις Η.Π.Α.....	16
Πίνακας 1-2: Μη αδειοδοτημένες κατανομές φάσματος στις Η.Π.Α.....	17
Πίνακας 1-3: Σύγκριση των overlay, underlay και interweave προσεγγίσεων.....	28
Πίνακας 2-1: Κανονική μορφή του παιχνιδιού "Κορώνα-Γράμματα" .....	46
Πίνακας 2-2: Παίγνιο με κυρίαρχη στρατηγική .....	47
Πίνακας 2-3: Το παίγνιο για το δίλημμα του φυλακισμένου .....	48
Πίνακας 2-4: Το προς εξέταση παίγνιο .....	54
Πίνακας 2-5: α) Παίγνιο με ισορροπία Nash και β) Παίγνιο χωρίς ισορροπία Nash .....	57
Πίνακας 2-6: Ορισμός συμμετρικού παιγνίου .....	58
Πίνακας 2-7: Μικτή στρατηγική για το παίγνιο "Πέτρα-Ψαλίδι-Χαρτί" .....	61

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΓΝΩΣΤΙΚΑ ΡΑΔΙΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Το ραδιοφάσμα αναφέρεται σαν μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, σχετιζόμενο με τις ραδιοσυχνότητες, δηλαδή συχνότητες χαμηλότερες από τα 300GHz (ή ισοδύναμα μήκη κύματος μεγαλύτερα από 1mm). Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε αυτό το εύρος συχνοτήτων καλούνται ραδιοκύματα και χρησιμοποιούνται στις ραδιοεπικοινωνίες και σε πλήθος άλλων εφαρμογών, όπως παραδείγματος χάρη για θέρμανση. Τα ραδιοκύματα σε διαφορετικές συχνότητες έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά διάδοσης, καθένα από τα οποία είναι κατάλληλο για συγκεκριμένες ασύρματες εφαρμογές. Τα ραδιοκύματα χαμηλής συχνότητας είναι κατάλληλα για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων, ενώ τα ραδιοκύματα υψηλής συχνότητας είναι κατάλληλα για μικρών αποστάσεων και υψηλών ταχυτήτων ασύρματες επικοινωνίες.

Δεδομένης της περιορισμένης φύσης των φασματικών πόρων, η αποδοτική διαχείριση του εύρους ζώνης αποτελεί μια απαραίτητη λειτουργία. Συγκεκριμένα, η διαχείριση του φάσματος πρέπει να είναι τέτοια ώστε να υπάρχει έλεγχος στη μετάδοση των ραδιοκυμάτων, καθώς αυτά μπορεί να εκπέμπονται ταυτόχρονα από πολλαπλές πηγές πάνω στην ίδια συχνότητα, έτσι ώστε να αποφεύγεται η παρεμβολή μεταξύ των ασυρμάτων χρηστών. Συμβατικά, οι φασματικοί πόροι διανέμονται μέσω δημοπρασιών σε αδειοδοτημένους χρήστες από την κυβέρνηση. Αναλυτικότερα, η μέθοδος διανομής είναι η φασματική δημοπρασία και σύμφωνα με αυτή η κυβέρνηση προσφέρει μια ζώνη συχνοτήτων, της οποίας προδιαγράφει το είδος της ασύρματης τεχνολογίας/εφαρμογής που θα εξυπηρετήσει και καλεί τους ενδιαφερόμενους να υποβάλλουν τις προσφορές τους. Στη συνέχεια η εταιρεία ή ο χρήστης με τη μεγαλύτερη προσφορά αποκτά τη συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων και τη χρησιμοποιεί σύμφωνα με συγκεκριμένους κανόνες που τίθενται από την κυβέρνηση. Η διάρκεια χρήσης της ζώνης αυτής από τον αδειοδοτημένο χρήστη καθορίζεται από την κυβέρνηση. Στον Πίνακα 1-1 παρουσιάζονται οι αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων στις Η.Π.Α.

Service/system	Frequency
AM radio	535–1605 KHz
FM radio	88–108 MHz
Broadcast TV (channels 2–6)	54–88 MHz
Broadcast TV (channels 7–13)	174–216 MHz
Broadcast TV (UHF)	470–806 MHz
Broadband wireless	746–764 MHz, 776–794 MHz
3G wireless	1.7–1.85 GHz, 2.5–2.69 GHz
1G and 2G cellular	806–902 MHz
Personal communications systems	1.85–1.99 GHz
Wireless communications service	2.305–2.32 GHz, 2.345–2.36 GHz
Satellite digital radio	2.32–2.325 GHz
MMDS	2.15–2.68 GHz
Satellite TV	12.2–12.7 GHz
LMDS	27.5–29.5 GHz, 31–31.3 GHz
Fixed wireless services	38.6–40 GHz

Πίνακας 1-1: Αδειοδοτημένη κατανομή φάσματος στις Η.Π.Α



Ωστόσο, υπάρχουν φασματικές ζώνες που χρησιμοποιούνται για βιομηχανικούς, επιστημονικούς και ιατρικούς σκοπούς και ονομάζονται ISM (industrial, scientific, medicine). Αυτές οι φασματικές ζώνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για επικοινωνία δεδομένων. Καθώς όμως δεν υπάρχει έλεγχος στην ISM ζώνη, η επικοινωνία δεδομένων ενός ISM εξοπλισμού μπορεί να παρεμβάλλει με οποιοδήποτε ISM εξοπλισμό. Η κατανομή της ISM ζώνης για τις Η.Π.Α απεικονίζεται στον Πίνακα 1-2.

Band	Usage	Frequency
ISM band I	Cordless phones, 1G WLANs	902–928 MHz
ISM band II	Bluetooth <sup>®</sup> , 802.11b, 802.11g WLANs	2.4–2.4835 GHz
ISM band III	Wireless PBX	5.725–5.85 GHz
U-NII band I	Indoor systems, 802.11a WLANs	5.15–5.25 GHz
U-NII band II	Short-range outdoor systems, 802.11a WLANs	5.25–5.35 GHz
U-NII band III	Long-range outdoor systems, 802.11a WLANs	5.725–5.825 GHz

Πίνακας 1-2: Μη αδειοδοτημένες κατανομές φάσματος στις Η.Π.Α

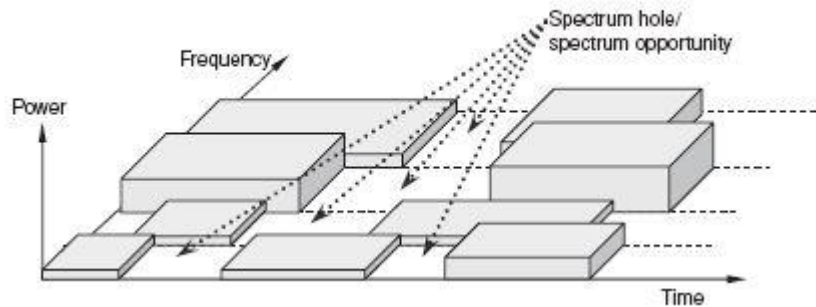
## 1.1 Εισαγωγή

Η ταχεία ανάπτυξη των νέων εξελιγμένων ασυρμάτων συσκευών και εφαρμογών συνέβαλε στην καλπάζουσα ζήτηση για φασματικούς ραδιοπόρους. Ωστόσο, οι τεχνικές σταθερής εκχώρησης αυτού του σπάνιου φυσικού πόρου αποτελούν εμπόδιο για την αποδοτική χρήση του. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το μεγαλύτερο μέρος του διαθέσιμου ραδιοφάσματος έχει ήδη διανεμηθεί στα υπάρχοντα ασύρματα συστήματα και μόνο μικρά τμήματά του μπορούν να αδειοδοτηθούν σε νέες ασύρματες εφαρμογές. Παρόλο αυτά, αν και υπάρχουν τμήματα του φάσματος τα οποία είναι ελεύθερα προς χρήση, διάφορες μη αδειοδοτημένες ασύρματες συσκευές (όπως για παράδειγμα οι αυτόματες πόρτες στα γκαράζ, τηλεκοντρολ κ.α) χρησιμοποιούν αυτά τα ελεύθερα τμήματα [1] [2]. Επιπρόσθετα, μελέτες έχουν δείξει ότι ενώ συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό από τους αδειοδοτημένους χρήστες για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και τοποθεσίες, υπάρχουν επίσης φασματικές ζώνες που απασχολούνται εν μέρει ή υποαπασχολούνται[3]. Παράδειγμα αποτελούν οι φασματικές συχνότητες που διανέμονται στα κυψελωτά δίκτυα των ΗΠΑ και η υψηλότερη χρήση τους γίνεται κατά τις εργάσιμες ώρες, ενώ υποαπασχολούνται από τα μεσάνυχτα μέχρι τις πρωινές ώρες [4].

Επομένως, η μη αποδοτική χρήση του φάσματος έγκειται στο γεγονός ότι από τη στιγμή που η ζώνη συχνοτήτων αποδοθεί στον αδειοδοτημένο χρήστη, ακόμα και αν δεν χρησιμοποιείται, δεν μπορεί να παραχωρηθεί σε μη αδειοδοτημένους χρήστες και εφαρμογές. Επιπλέον, λόγω της στατικής κατανομής συχνοτήτων αν ένα ασύρματο σύστημα λειτουργεί σε συγκεκριμένες συχνότητες που υπεραπασχολούνται, δεν μπορεί να μεταβεί σε άλλες που ίσως χρησιμοποιούνται λιγότερο.

Το δικαίωμα-«άδεια» της πρόσβασης στο φάσμα καθορίζεται από παραμέτρους, όπως η συχνότητα, ο χώρος, η μεταδιδόμενη ισχύς, ο κάτοχος του φάσματος, το είδος της χρήσης και η διάρκεια της αδειοδότησης. Δεδομένου ότι η άδεια ενός χρήστη δεν μπορεί να αλλάξει το είδος χρήσης του φάσματος, αλλά ούτε και να παραχωρηθεί σε κάποιον άλλο, αυτό

περιορίζει τη χρήση του φάσματος συχνοτήτων και καταλήγει σε χαμηλή χρησιμοποίησή του. Με αυτόν τον τρόπο, η στατική και μη ευέλικτη απόδοση φάσματος οδήγησε στην εμφάνιση του όρου «φασματικές τρύπες» ή «φασματικές οπές». Αυτές, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.1, είναι ζώνες είτε στο χρόνο, είτε στη συχνότητα που σε κάποια χρονική στιγμή ή γεωγραφική τοποθεσία δε χρησιμοποιούνται από τον αδειοδοτημένο χρήστη και μπορούν να έχουν πρόσβαση σε αυτές μη αδειοδοτημένοι χρήστες [5].



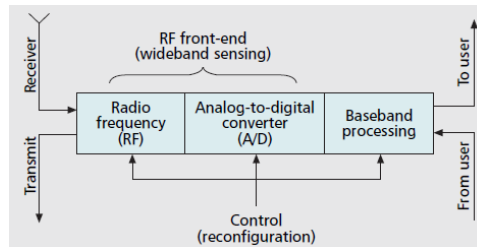
Σχήμα 1.1: Απεικόνιση "Φασματικών Τρυπών"

## 1.2 Επισκόπηση γνωστικών ραδιοσυστημάτων

Η μη αποδοτική χρήση του φάσματος οδήγησε στην ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών για τις επικοινωνίες, όπως είναι τα γνωστικά ραδιοσυστήματα (Cognitive Radio-CR). Τα συστήματα αυτά προτάθηκαν από τον Joseph Mitola III, σε σεμινάριο στο Royal Institute of Technology στη Στοκχόλμη (Σουηδία) το 1998 και δημοσιεύθηκαν σε άρθρο από τους Mitola και Gerald Q. Maguire, Jr το 1999 [6]. Μάλιστα, στο άρθρο αυτό αναφέρεται ότι τα γνωστικά συστήματα βελτιώνουν την ευελιξία των προσωπικών υπηρεσιών, μέσω μιας γλώσσας που ονομάζεται γλώσσα αναπαράστασης της ραδιογνώσης (RKRL, Radio Knowledge Representation Language). Επιπλέον, αναφέρεται πως η γλώσσα αυτή αναπαριστά τη γνώση των ραδιο-πρωτοκόλλων (radio etiquettes), συσκευών, μονάδων λογισμικού, αναγκών των χρηστών και σεναρίων εφαρμογής, με τρόπο που υποστηρίζει την αυτοματοποιημένη συλλογιστική που αφορά τις ανάγκες των χρηστών. Με τη γλώσσα αυτή οι ραδιο-κόμβοι από «τυφλοί» εκτελεστές προκαθορισμένων πρωτοκόλλων, μετατρέπονται σε ραδιο-ενήμερους ευφυείς πράκτορες που ψάχνουν τρόπους να εξυπηρετήσουν τις πολύπλοκες ανάγκες των χρηστών[7].

Τα CR έχουν βασιστεί, σε μεγάλο βαθμό, στις αρχές του Software-Defined Radio (SDR), που εισήχθη από τον Mitola, το 1991. Το τελευταίο αποτελεί ένα επαναρυθμιζόμενο ασύρματο σύστημα επικοινωνιών, στο οποίο οι παράμετροι μετάδοσης (όπως η ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας, ο τρόπος διαμόρφωσης και το πρωτόκολλο) ελέγχονται δυναμικά. Αυτή η προσαρμοστική λειτουργία επιτυγχάνεται με αλγορίθμους που ελέγχονται από λογισμικό. Το SDR παρέχει μια προγραμματιζόμενη και επεκτάσιμη πλατφόρμα λογισμικού για έναν ασύρματο ραδιοπομπό και βοηθά τον ραδιοδέκτη να λειτουργεί σε πολλαπλές ζώνες συχνοτήτων, όπως 3G, 802.11, GSM κ.α, χρησιμοποιώντας πολλαπλά πρωτόκολλα

μετάδοσης[8]. Αυτό είναι ένα ραδιοσύστημα επικοινωνιών που τα συστατικά του, τα οποία συμβατικά υλοποιούνται σε υλικό (hardware), όπως μίκτες, φίλτρα, ενισχυτές, διαμορφωτές, ανιχνευτές, πλέον υλοποιούνται με λογισμικό μέσω υπολογιστών ή ενσωματωμένων συστημάτων. Η αρχιτεκτονική του παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2.

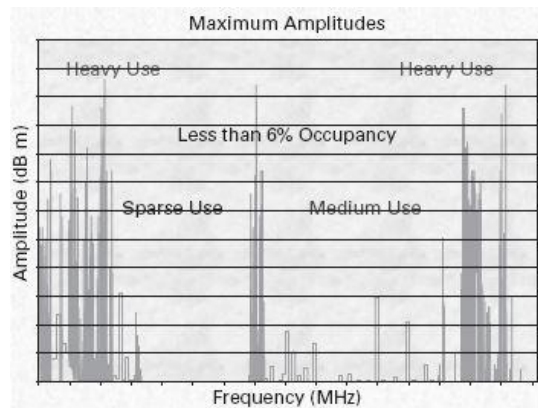


Σχήμα 1.2: Αρχιτεκτονική γνωστικού ραδιο-εκπομπού

Οι κύριες λειτουργίες του SDR είναι οι εξής[9]:

- Λειτουργία σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων: Λόγω αυτής της λειτουργίας, το SDR μπορεί να υποστηρίξει ασύρματες μεταδόσεις δεδομένων πάνω από διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, οι οποίες χρησιμοποιούνται από διαφορετικά ασύρματα συστήματα πρόσβασης, όπως για παράδειγμα οι ζώνες των κυψελωτών, οι ζώνες ISM και TV.
- Υποστήριξη διαφορετικών προτύπων (standards): Το SDR μπορεί να υποστηρίξει τόσο διαφορετικά πρότυπα (όπως GSM, WCDMA, WiMAX, WiFi), όσο και διαφορετικές διεπαφές μέσα στο ίδιο πρότυπο.
- Υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών: Ενδεικτικές υπηρεσίες είναι η κυψελωτή τηλεφωνία και η ευρεία (broadband) ασύρματη πρόσβαση στο διαδίκτυο.
- Υποστήριξη πολλαπλών καναλιών: Η λειτουργία αυτή καθιστά εφικτή την ταυτόχρονη λειτουργία (εκπομπή-λήψη) σε πολλαπλές ζώνες συχνοτήτων.

Όσον αφορά τους φασματικούς πόρους, η αρμόδια επιτροπή τους εκχωρεί σε αδειοδοτημένους κατόχους, που ονομάζονται πρωτεύοντες χρήστες (Primary Users-PUs) σε μακροχρόνια βάση και για μεγάλης έκτασης γεωγραφικές περιοχές. Παρόλα αυτά, μεγάλο μέρος του φάσματος παραμένει ανεκμετάλλευτο, όπως φαίνεται ενδεικτικά στο Σχήμα 1.3[10].



Σχήμα 1.3: Ενδεικτική χρήση του φασματικού πόρου

Έτσι, μέσω των γνωστικών ραδιοσυστημάτων, επιτρέπεται η πρόσβαση μη αδειοδοτημένων χρηστών, οι οποίοι ονομάζονται δευτερεύοντες χρήστες (Secondary Users-SUs), σε αχρησιμοποίητο, αδειοδοτημένο φάσμα, δηλαδή σε «φασματικές τρύπες». Τα συστήματα CR, που είναι επίσης γνωστά ως συστήματα «δυναμικής πρόσβασης φάσματος», χρησιμοποιούν το εύρος ζώνης πιο αποδοτικά, με έναν ευκαιριακό τρόπο, ώστε να μην παρεμβάλλουν οι δευτερεύοντες χρήστες στους πρωτεύοντες [11]. Συγκεκριμένα, μια γνωστική συσκευή επεξεργάζεται το φάσμα σε οποιαδήποτε συγκεκριμένη τοποθεσία, έτσι ώστε να αποκτήσει πληροφορίες για τα εξής:

- Ζώνες που μένουν αχρησιμοποίητες το περισσότερο χρονικό διάστημα
- Ζώνες που χρησιμοποιούνται μερικώς για κάποιο χρονικό διάστημα
- Ζώνες που χρησιμοποιούνται συνεχώς για ολόκληρο το χρονικό διάστημα

Ένας από τους ορισμούς των γνωστικών συστημάτων είναι ο εξής [12]:

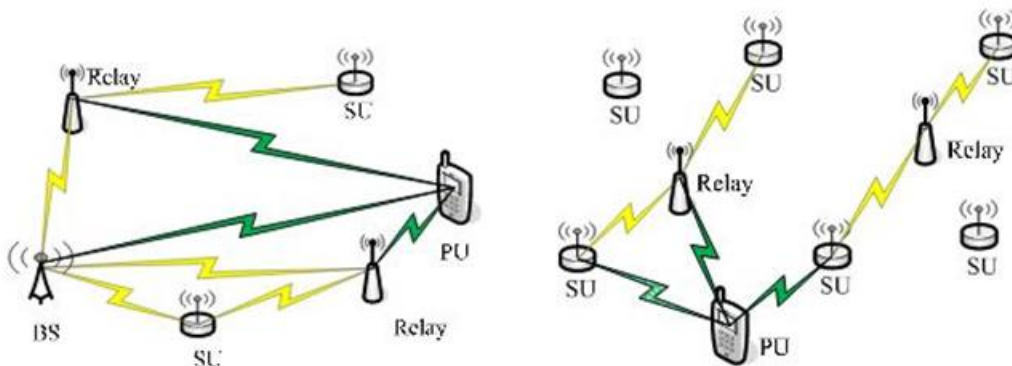
- **Ορισμός 1.1:** Το CR αποτελεί ένα ευφυές, ασύρματο σύστημα επικοινωνίας, που είναι ενημερωμένο για το περιβάλλον του, μαθαίνει από αυτό και προσαρμόζει τις εσωτερικές καταστάσεις του βάσει των στατιστικών διακυμάνσεων στα υπάρχοντα RF ερεθίσματα, ρυθμίζοντας τις παραμέτρους μετάδοσης (όπως η ζώνη συχνοτήτων, η μέθοδος διαμόρφωσης και η ισχύς εκπομπής) σε πραγματικό χρόνο. Οι κύριοι στόχοι των συστημάτων αυτών αναφέρονται στην:
  - Επίτευξη υψηλής αξιοπιστίας και απόδοσης στις ασύρματες επικοινωνίες.
  - Βελτίωση στη χρησιμοποίηση του φάσματος συχνοτήτων.

### 1.3 Βασικές λειτουργίες των γνωστικών ραδιοσυστημάτων

Στη συνέχεια περιγράφονται οι κύριες λειτουργίες των γνωστικών ραδιοσυστημάτων που απαιτούνται προκειμένου να υποστηρίξουν την ευφυή και αποδοτική χρησιμοποίηση του φάσματος συχνοτήτων.

- Ανίχνευση φάσματος (spectrum sensing): Η ανίχνευση φάσματος καθορίζει την κατάσταση του φάσματος και τη δραστηριότητα των αδειοδοτημένων χρηστών, με την περιοδική ανίχνευση της επιθυμητής ζώνης συχνοτήτων. Συγκεκριμένα, ένας

γνωστικός πομπός ανιχνεύει τις «φασματικές τρύπες» (ζώνη, τοποθεσία, χρόνος) και καθορίζει τη μέθοδο με την οποία θα έχει πρόσβαση σε αυτές (ισχύς μετάδοσης και διάρκεια πρόσβασης) χωρίς να παρεμβάλλει στη μετάδοση του αδειοδοτημένου χρήστη. Με αυτόν τον τρόπο, η ανίχνευση φάσματος μπορεί να πραγματοποιείται είτε με **κεντροκοποιημένη**, είτε με **κατανεμημένη** μορφή. Στην πρώτη περίπτωση, ο ελεγκτής ανίχνευσης (sensing controller), που μπορεί να είναι ένα access point ή ένας σταθμός βάσης, ανιχνεύει την επιθυμητή ζώνη συχνοτήτων και στη συνέχεια, η πληροφορία που αποκτάται, μοιράζεται με τους άλλους κόμβους του συστήματος. Η κεντροκοποιημένη ανίχνευση φάσματος μπορεί να μειώσει την πολυπλοκότητα των τεματικών των χρηστών, αφού όλες οι λειτουργίες ανίχνευσης λαμβάνουν χώρα στον ελεγκτή ανίχνευσης. Ταυτόχρονα όμως, εμφανίζεται το πρόβλημα ότι ο κεντρικός ελεγκτής ίσως να μην μπορεί να ανιχνεύσει την ύπαρξη ενός μη αδειοδοτημένου χρήστη στα άκρα μιας κυψέλης. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται καλύτερα με τη χρήση μιας κατανεμημένης μεθόδου ανίχνευσης φάσματος. Στις μεθόδους αυτές, οι μη αδειοδοτημένοι χρήστες μπορούν να ανιχνεύσουν το φάσμα ανεξάρτητα και τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε από ανεξάρτητα CRs (μη συνεργατική ανίχνευση) ή να μοιραστούν με άλλους χρήστες (συνεργατική ανίχνευση). Στο Σχήμα 1.4 που ακολουθεί απεικονίζονται σχηματικά οι αναπαραστάσεις των κεντροκοποιημένων και κατανεμημένων μεθόδων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ η συνεργατική ανίχνευση επιβαρύνεται με την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τη μη συνεργατική ανίχνευση.



Σχήμα 1.4: α) Κεντροκοποιημένο σύστημα και β) Κατανεμημένο σύστημα

### Τρόποι φασματικής ανίχνευσης

Τρία σχήματα χρησιμοποιούνται ευρέως στην ανίχνευση.

1. Ανιχνευτής προσαρμοσμένου φίλτρου (Matched Filter Detection): Αυτός χρησιμοποιείται για να ανιχνεύσει ένα σήμα συγκρίνοντας το σήμα εισόδου με ένα ήδη γνωστό σήμα (σήμα-οδηγός). Το προσαρμοσμένο φίλτρο μεγιστοποιεί το λαμβανόμενο σηματοθορυβικό λόγο για το συγκεκριμένο μετρούμενο σήμα. Έτσι, αν η πληροφορία του σήματος ενός αδειοδοτημένου χρήστη είναι γνωστή, το προσαρμοσμένο φίλτρο είναι ο βέλτιστος ανιχνευτής σε περίπτωση στατικού γκαουσιανού θορύβου.

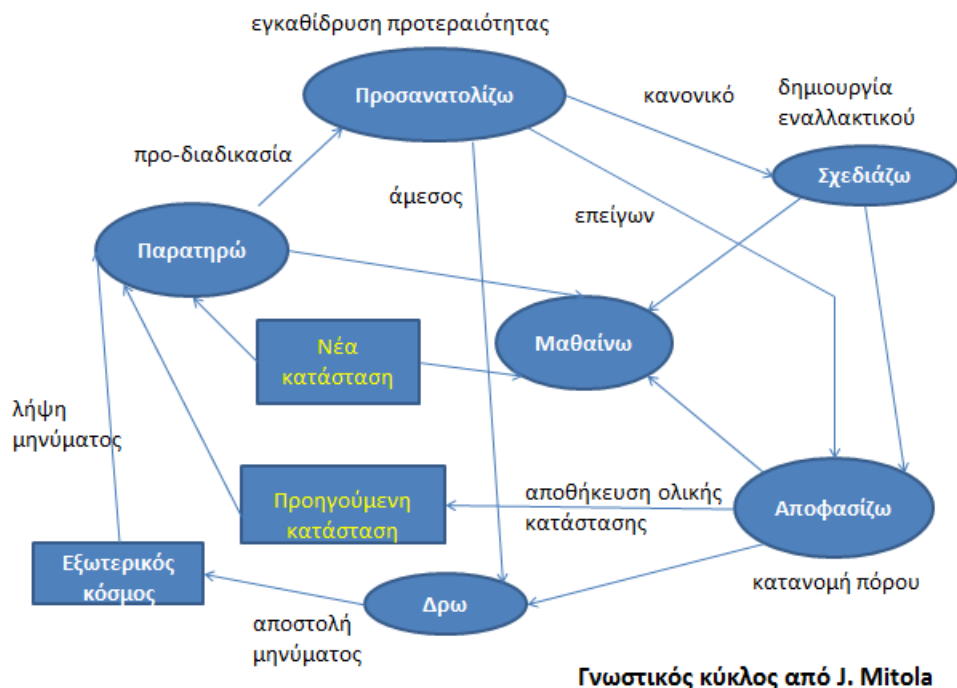
Καθώς χρησιμοποιείται ένα σήμα-οδηγός για την ανίχνευση, το προσαρμοσμένο φίλτρο εξάγει αποτέλεσμα σε σύντομο χρονικό διάστημα. Η ανίχνευση αυτή ενδείκνυται όταν η μετάδοση ενός αδειοδοτημένου χρήστη χρησιμοποιεί πιλοτικό σήμα, προοίμια ή κώδικες εξάπλωσης, μέσω των οποίων μπορεί να ανασκευαστεί το σήμα-οδηγός για τη φασματική ανίχνευση.

2. Ανιχνευτής ενέργειας (Energy Detection): Ο ανιχνευτής ενέργειας αποτελεί τη βέλτιστη μέθοδο της φασματικής ανίχνευσης όταν η πληροφορία για τον αδειοδοτημένο χρήστη είναι ανεπαρκής. Ωστόσο, ο συγκεκριμένος ανιχνευτής είναι ευαίσθητος στη στοχαστικότητα του θορύβου ισχύος. Στην περίπτωση του ανιχνευτή ενέργειας το σήμα από ένα ζωνοπερατό φίλτρο τετραγωνίζεται και ολοκληρώνεται πάνω στο διάστημα παρατήρησης. Ένας αλγόριθμος απόφασης συγκρίνει την έξοδο του ολοκληρωτή με ένα κατώφλι για να αποφασίσει εν τέλει αν υπάρχει ή όχι αδειοδοτημένος χρήστης. Γενικά, η επίδοση του ανιχνευτή ενέργειας υποβαθμίζεται όταν ο σηματοθορυβικός λόγος μειώνεται.
  3. Κυκλοστατικός ανιχνευτής χαρακτηριστικών (Cyclostationary Feature Detection): Το μεταδιδόμενο σήμα από τον αδειοδοτημένο χρήστη, γενικά, έχει περιοδικό μοτίβο. Αυτό αναφέρεται σαν κυκλοστατικότητα και χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της παρουσίας ενός αδειοδοτημένου χρήστη. Ένα σήμα είναι κυκλοστατικό υπό την ευρεία έννοια αν η αυτοσυσχέτιση είναι περιοδική συνάρτηση. Με αυτό το περιοδικό μοτίβο, το μεταδιδόμενο σήμα ενός αδειοδοτημένου χρήστη μπορεί να διαχωριστεί από το θόρυβο, που είναι ένα υπό την ευρεία έννοια στατικό σήμα χωρίς συσχέτιση. Γενικά, η κυκλοστατική ανίχνευση μπορεί να παρέχει ένα περισσότερο ακριβές αποτέλεσμα ανίχνευσης και είναι εύρωστη στις μεταβολές της ισχύος του θορύβου. Όμως, η ανίχνευση αυτή είναι πολύπλοκη και απαιτεί μεγάλες περιόδους παρατήρησης για να λειτουργήσει σωστά [5].
- Φασματική ανάλυση: Η πληροφορία που αποκτάται από την ανίχνευση του φάσματος χρησιμοποιείται για να σχεδιαστεί η μέθοδος πρόσβασης στο φάσμα από τους μη αδειοδοτημένους χρήστες (SUs). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι απαιτήσεις επικοινωνίας των μη αδειοδοτημένων χρηστών χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων μετάδοσης. Τα κύρια συστατικά της διαχείρισης φάσματος είναι η βελτιστοποίηση της φασματικής ανάλυσης και της φασματικής πρόσβασης. Στη φάση της φασματικής ανάλυσης, οι πληροφορίες από τη φασματική ανίχνευση αναλύονται για να αποκτηθεί γνώση για τις «φασματικές τρύπες». Κατόπιν λαμβάνεται απόφαση για την πρόσβαση στο φάσμα, βελτιστοποιώντας τη συνολική απόδοση του συστήματος μέσω μιας αντικειμενικής συνάρτησης (όπως η μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης των μη αδειοδοτημένων χρηστών), με συγκεκριμένους περιορισμούς (όπως διατήρηση του επιπέδου παρεμβολής που προκαλείται στους αδειοδοτημένους χρήστες ( PUs) κάτω από ένα όριο).
  - Φασματική πρόσβαση: Μετά την απόφαση για πρόσβαση στο φάσμα που βασίζεται στην προηγηθείσα φασματική ανάλυση, οι SUs αποκτούν πρόσβαση στις «φασματικές τρύπες». Η φασματική πρόσβαση βασίζεται στο πρωτόκολλο γνωστικής

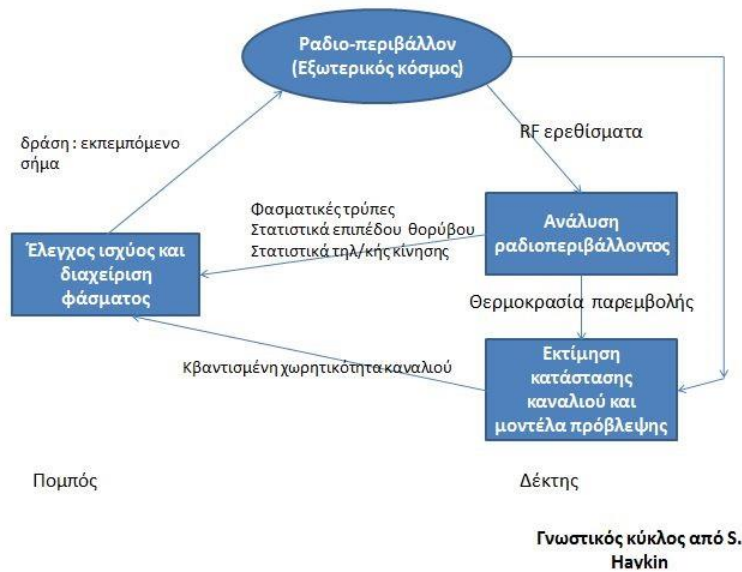
πρόσβασης στο μέσο (Cognitive Medium Access Control - MAC), που έχει ως σκοπό να αποφευχθούν συγκρούσεις με τους PUs και με άλλους SUs. Μάλιστα, ο γνωστικός πομπός πρέπει να επικοινωνεί με τον αντίστοιχο δέκτη για να συγχρονίσουν τη μετάδοση, ώστε η μεταδιδόμενη πληροφορία να λαμβάνεται επιτυχώς.

- Φασματική κινητικότητα: Είναι η λειτουργία που σχετίζεται με την αλλαγή στη ζώνη συχνοτήτων των γνωστικών χρηστών, όποτε χρειάζεται. Όταν ο αδειοδοτημένος χρήστης έχει πρόσβαση σε ένα ασύρματο κανάλι, το οποίο χρησιμοποιείται ήδη από έναν μη αδειοδοτημένο χρήστη, ο τελευταίος μεταβαίνει σε άλλη μη χρησιμοποιούμενη ζώνη. Αυτή η αλλαγή στη ζώνη συχνοτήτων ονομάζεται φασματική μεταπομπή. Κατά τη διάρκεια της μεταπομπής πρέπει να εξασφαλίζεται πως η μετάδοση δεδομένων από τον μη αδειοδοτημένο χρήστη μπορεί να συνεχιστεί και στη νέα ζώνη συχνοτήτων.

Οι κύριες λειτουργίες των γνωστικών ραδιοσυστημάτων, σύμφωνα με τις οποίες απαιτείται η ρύθμιση των παραμέτρων μετάδοσης ανάλογα με τις αλλαγές του περιβάλλοντος, μπορούν να αναπαρασταθούν μέσω ενός «γνωστικού κύκλου». Στα Σχήματα 1.5 και 1.6 απεικονίζονται οι αναπαραστάσεις δυο διακεκριμένων επιστημόνων, του J. Mitola και S. Haykin, αντίστοιχα, όπου η περιγραφή του πρώτου τείνει προς τον τομέα της πληροφορικής, ενώ του δεύτερου περισσότερο προς τις ραδιοεπικοινωνίες.



Σχήμα 1.5: Γνωστικός κύκλος κατά Mitola



Σχήμα 1.6: Γνωστικός κύκλος κατά Haykin

Για να διατηρείται η επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός καναλιού ανάδρασης μεταξύ των δύο οντοτήτων, που θα μεταφέρει το σήμα ελέγχου με πληροφορίες για την ζεύξη από το δέκτη στον πομπό, προκειμένου να προσαρμόσει ο τελευταίος τις παραμέτρους του. Με αυτόν τον τρόπο, το CR γίνεται ένα παράδειγμα ενός επικοινωνιακού συστήματος με ανάδραση.

Ένα ευρέως καθορισμένο γνωστικό ραδιοσύστημα φιλοξενεί μια κλίμακα διαφορετικών βαθμών γνωστικότητας. Από τη μια πλευρά της κλίμακας ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μια «φασματική τρύπα» και να σχηματίσει το γνωστικό του κύκλο γύρω από αυτή. Από την άλλη πλευρά της κλίμακας αυτός δύναται να αναπτύξει πολλαπλές τεχνολογίες, ώστε να σχηματίσει τον γνωστικό του κύκλο γύρω από μια ευρείας ζώνης «φασματική τρύπα» ή ένα σύνολο «φασματικών τρυπών» στενής ζώνης, για να επιτύχει την καλύτερη επίδοση σε όρους φασματικής διαχείρισης και ελέγχου εκπεμπόμενης ισχύος.

### 1.3.1 Ανίχνευση «φασματικών οπών»

Από την εκτίμηση του φάσματος ισχύος των εισερχομένων RF ερεθισμάτων έχει δημιουργηθεί μια βάση που οδηγεί στο διαχωρισμό του φάσματος σε τρεις κατηγορίες[12].

1. Μαύρα διαστήματα, τα οποία καταλαμβάνονται από «τοπικούς» παρεμβολείς υψηλής ισχύος, για κάποια χρονικά διαστήματα.
2. Γκρίζα διαστήματα, τα οποία χρησιμοποιούνται μερικώς από χαμηλής ισχύος παρεμβολείς.
3. Λευκά διαστήματα, τα οποία είναι ελεύθερα σε RF παρεμβολείς πέρα από το θόρυβο του περιβάλλοντος, που αποτελείται από φυσικές και τεχνητές μορφές θορύβου και συγκεκριμένα:
  - Θερμικό θόρυβο ευρυεκπομπής που παράγεται από εξωτερικά φυσικά φαινόμενα, όπως η ηλιακή ακτινοβολία.
  - Παροδικές ανακλάσεις από αστραπές, φωτεινές πηγές πλάσματος και αεροσκάφη.
  - Κρουστικό θόρυβο που παράγεται από αναφλέξεις, μεταγωγούς και μικροκυματικές συσκευές.



- Θερμικό θόρυβο, που οφείλεται σε εσωτερικές αυθόρμητες διακυμάνσεις ηλεκτρονίων στους δέκτες.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό πως περισσότερο τα λευκά και λιγότερο τα γκριζα διαστήματα είναι υποψήφια για χρήση από μη αδειοδοτημένους χρήστες. Ενώ, τα μαύρα διαστήματα πρέπει να αποφεύγονται όταν και όπου οι RF δέκτες είναι ενεργοί. Παρόλα αυτά, αν σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία οι πομποί είναι ανενεργοί και τα μαύρα διαστήματα κατέχουν το ρόλο των «φασματικών τρυπών», το γνωστικό ραδιοσύστημα παρέχει την ευκαιρία για τη δημιουργία σημαντικών λευκών διαστημάτων, μέσω της ικανότητας του δυναμικού συντονισμού στο διαμοιρασμό του φάσματος.

Η διαδικασία της ανίχνευσης των φασματικών οπών και της φασματικής διαχείρισης επηρεάζεται από τους εξής παράγοντες:

- Περιβαλλοντικοί παράγοντες: Η ραδιομετάδοση μέσω ενός ασύρματου καναλιού επηρεάζεται από τους ακόλουθους παράγοντες :
  - Απώλειες διαδρομής, που αναφέρονται στην εξασθένηση της ισχύος του σήματος λόγω της απόστασης πομπού και δέκτη.
  - Σκίαση, που προκαλεί τη διακύμανση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος γύρω από την τιμή της απώλειας λόγω διαδρομής κατά ένα πολλαπλασιαστικό παράγοντα, προκαλώντας με αυτόν τον τρόπο οπές κάλυψης.
- Αποκλειστικές ζώνες: Μια αποκλειστική ζώνη αναφέρεται σε μια περιοχή (κύκλος με μια ακτίνα και κέντρο στη τοποθεσία ενός PU), μέσα στην οποία το φάσμα είναι ελεύθερο προς χρήση και μπορεί να διατεθεί σε μη εξουσιοδοτημένους χρήστες. Το θέμα αυτό απαιτεί ειδική προσοχή σε δυο πιθανά σενάρια:
  - Ο PU λειτουργεί εκτός της αποκλειστικής ζώνης και στην συγκεκριμένη περίπτωση ο εντοπισμός μιας «φασματικής τρύπας» δεν πρέπει να είναι ευαίσθητος στη ραδιοπαρεμβολή του PU.
  - Ασύρματα σενάρια που βασίζονται σε δίκτυα συνεργατικής αναμετάδοσης (ad hoc)[13][14], τα οποία σχεδιάζονται να λειτουργούν σε πολύ χαμηλές ισχείς μετάδοσης. Ο αλγόριθμος δυναμικής διαχείρισης φάσματος πρέπει να είναι ικανός να αντιμετωπίζει τέτοια αδύναμα σενάρια.
- Προγνωστική ικανότητα για μελλοντική χρήση: Ο εντοπισμός μιας «φασματικής τρύπας», σε συγκεκριμένο χώρο και για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, θα ισχύει μόνο για τη δεδομένη στιγμή και όχι απαραίτητα για το μέλλον. Ο αλγόριθμος δυναμικής διαχείρισης φάσματος στον πομπό πρέπει να περιλαμβάνει δυο προβλέψεις :
  - Συνεχή παρακολούθηση της «φασματικής τρύπας».
  - Εναλλακτική φασματική οδό για την αντιμετώπιση του γεγονότος ο πρωτεύοντας χρήστης να χρειαστεί το φάσμα για προσωπική του χρήση.

### **1.3.2 Δυναμική πρόσβαση στο φάσμα**

Η δυναμική πρόσβαση στο φάσμα ορίζεται σαν ένας μηχανισμός που ρυθμίζει τη χρήση του φάσματος σε πραγματικό χρόνο, ώστε να αντιμετωπίζονται οι χρονικές μεταβολές του ραδιο-περιβάλλοντος, όπως είναι η αλλαγή της τοποθεσίας, η αλλαγή στον αριθμό των

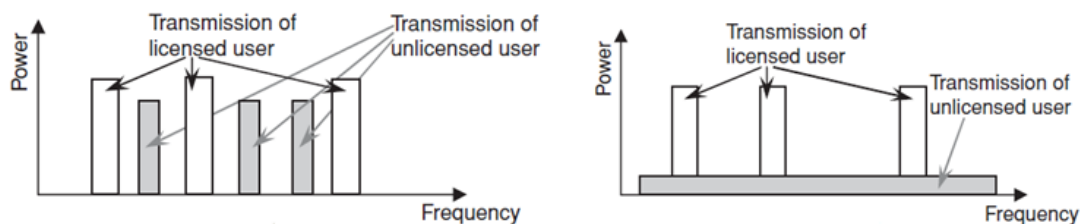
πρωτευόντων χρηστών, τα διαθέσιμα κανάλια και οι περιορισμοί ως προς τις παρεμβολές. Υπάρχουν τρεις μηχανισμοί δυναμικής πρόσβασης στο φάσμα (Dynamic Spectrum Access, DSA): το μοντέλο αποκλειστικής χρήσης (exclusive-use), το μοντέλο κοινής χρήσης (common-use) και το μοντέλο διαμοιραζόμενης χρήσης (shared-use).

- Στο μοντέλο αποκλειστικής χρήσης, ο αδειοδοτημένος χρήστης μπορεί να επιτρέψει την πρόσβαση στο φάσμα σε κάποιον μη αδειοδοτημένο χρήστη, για κάποια χρονική περίοδο. Γενικά υπάρχουν δυο προσεγγίσεις, η παροχή δικαιωμάτων λόγω της ιδιοκτησίας του φάσματος και η δυναμική κατανομή φάσματος. Στην πρώτη προσέγγιση, ο ιδιοκτήτης του φάσματος μπορεί να πουλήσει και να εμπορευτεί το φάσμα που κατέχει και είναι ελεύθερος να επιλέξει την τεχνολογία που επιθυμεί. Με τη δεύτερη προσέγγιση βελτιώνεται η φασματική επίδοση με την εκμετάλλευση των χωρικών και χρονικών στατιστικών της κίνησης των διαφορετικών υπηρεσιών.[15]
- Στο μοντέλο κοινής χρήσης το φάσμα είναι ελεύθερο προς χρήση σε όλους τους χρήστες. Η ISM (industrial, scientific, medical) ζώνη και το WiFi αποτελούν παραδείγματα του μοντέλου αυτού. Στο μοντέλο αυτό, ο διαμοιρασμός φάσματος μπορεί να γίνει μεταξύ ομοιογενών ή ετερογενών δικτύων. Όταν όλα τα δίκτυα σε ένα ετερογενές περιβάλλον έχουν γνωστικές/προσαρμοστικές ικανότητες, αυτό αναφέρεται ως συμμετρικός διαμοιρασμός φάσματος. Αντίθετα, αν ένα ή περισσότερα δίκτυα δεν έχουν τις συγκεκριμένες ικανότητες τότε αυτό αναφέρεται ως ασύμμετρος διαμοιρασμός φάσματος. [15]
- Στο μοντέλο διαμοιραζόμενης, ευκαιριακής χρήσης εμφανίζονται οι εξής προσεγγίσεις[16]:
  - Overlay προσέγγιση: Η προϋπόθεση για τα overlay συστήματα είναι ότι ο γνωστικός πομπός, δηλαδή ο πομπός του SU, έχει γνώση τόσο της κωδικοποίησης που χρησιμοποιούν οι μη γνωστικοί χρήστες όσο και των μηνυμάτων τους. Η γνώση των κωδίκων των PUs, που είναι μη γνωστικοί χρήστες, μπορεί να επιτευχθεί ανακοινώνοντάς τους, περιοδικά, οι τελευταίοι. Ένα μήνυμα μη γνωστικού χρήστη μπορεί να αποκτηθεί αποκωδικοποιώντας το στην πλευρά του γνωστικού δέκτη. Όμως, η overlay προσέγγιση υποθέτει πως το μη γνωστικό μήνυμα είναι ήδη γνωστό στον γνωστικό πομπό, όταν αρχίζει η μετάδοση του μη γνωστικού χρήστη. Ενώ αυτό είναι ανέφικτο στην αρχική μετάδοση, η υπόθεση ευσταθεί στην επαναμετάδοση ενός μηνύματος, όπου ο γνωστικός χρήστης «ακούει» τη μετάδοση και την αποκωδικοποιεί, ενώ ο προβλεπόμενος δέκτης μπορεί να μην μπορεί να την αποκωδικοποιήσει είτε λόγω διαλείψεων, είτε λόγω παρεμβολής. Εναλλακτικά, ο μη γνωστικός χρήστης μπορεί να στείλει το μήνυμα στο γνωστικό δέκτη, υποθέτοντας ότι βρίσκονται κοντά, πριν τη μετάδοσή του. Η γνώση του μηνύματος και/ή των κωδίκων του μη γνωστικού χρήστη είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, αφού είτε μειώνει την παρεμβολή που εμφανίζεται στους γνωστικούς και μη γνωστικούς δέκτες, είτε οι γνωστικοί χρήστες χρησιμοποιώντας τη γνώση αυτή εκχωρούν μέρος της ισχύος τους για τη επικοινωνία τους και το υπόλοιπο για τη λειτουργία τους ως αναμεταδότες των μη γνωστικών μεταδόσεων. Με προσεκτική επιλογή της ισχύος, η αύξηση του σηματοθορυβικού λόγου (SNR) των μη γνωστικών χρηστών λόγω της βοήθειας της μη γνωστικής αναμετάδοσης, μπορεί να αντισταθμίσει τη μείωση του μη γνωστικού SNR, που

προκαλείται από την παρεμβολή της εναπομείνουσας ισχύος που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία μεταξύ των γνωστικών χρηστών. Αυτό εγγυάται πως ο σηματοθορυβικός λόγος των μη γνωστικών χρηστών παραμένει αμετάβλητος καθώς οι γνωστικοί χρήστες διανέμουν ένα μέρος της ισχύος τους για τις μεταξύ τους μεταδόσεις.

- Underlay προσέγγιση: Οι SUs μπορούν να μεταδώσουν σε ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται από PUs, αν δεν προκαλούν μη επιθυμητή παρεμβολή στους τελευταίους. Η προσέγγιση αυτή δεν απαιτεί οι SUs να εκτελούν ανίχνευση φάσματος, όμως η παρεμβολή που προκαλείται θα πρέπει να μην υπερβαίνει κάποιο συγκεκριμένο κατώφλι (interference temperature). Στην περίπτωση αυτή, θα πρέπει να είναι διαθέσιμες στο γνωστικό δίκτυο οι πληροφορίες για την παρεμβολή που προκαλείται από τις εκπομπές των δευτερευόντων χρηστών στους δέκτες των πρωτευόντων.
- Interweave προσέγγιση: Σε αυτή την προσέγγιση, ο PU έχει το αποκλειστικό δικαίωμα της πρόσβασης στο φάσμα. Όμως, σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή ή συχνότητα ή γεωγραφική τοποθεσία, αν το φάσμα δεν χρησιμοποιείται από τον κάτοχό του, τότε ευκαιριακά μπορεί να έχει πρόσβαση σε αυτό ένας SU. Έτσι, για να έχει πρόσβαση σε αυτό, ένας SU πρέπει να ανιχνεύσει το φάσμα για να εντοπίσει αν υπάρχει δραστηριότητα του PU σε αυτή τη ζώνη συχνοτήτων, δηλαδή να εντοπίσει αν υπάρχει «φασματική τρύπα» (κενή ζώνη συχνοτήτων). Αν βρεθεί κενή ζώνη συχνοτήτων, τότε ο SU αποκτά πρόσβαση στο φάσμα. Η interweave προσέγγιση απαιτεί τη γνώση της δραστηριότητας των μη γνωστικών (αδειοδοτημένων και μη) χρηστών στο φάσμα. Εν κατακλείδι με τη μέθοδο αυτή ανιχνεύεται περιοδικά το φάσμα, εντοπίζεται έξυπνα η κατοχή διαφορετικών φασματικών μερών και υπάρχει ευκαιριακή επικοινωνία του γνωστικού ραδιοσυστήματος μέσω των «φασματικών τρυπών» με ελάχιστη παρεμβολή στους ενεργούς χρήστες.

Οι παραπάνω τεχνικές παρουσιάζονται στο κάτωθι σχήμα. Στο Σχήμα 1.7 (α) παρουσιάζεται η interweave προσέγγιση και στο Σχήμα 1.7 (β) η underlay προσέγγιση.



Σχήμα 1.7: α) Interweave προσέγγιση και β) Underlay προσέγγιση

Στον Πίνακα 1-3 παρουσιάζεται η συνοπτική περιγραφή των overlay, underlay και interweave προσεγγίσεων.

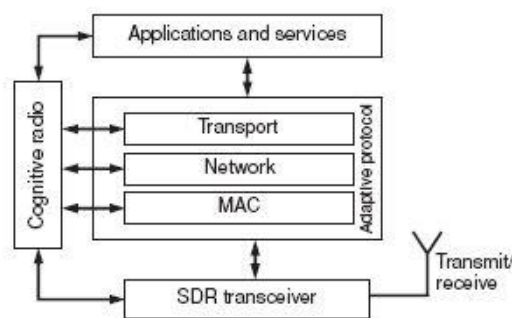
Overlay	Underlay	Interweave
<p><u>Πληροφόρηση κωδικοποίησης:</u> Οι γνωστικοί κόμβοι γνωρίζουν τα κέρδη των καναλιών, τις κωδικοποιήσεις και τα μηνύματα των μη γνωστικών χρηστών.</p> <p>Ο γνωστικός χρήστης μπορεί να μεταδίδει ταυτόχρονα με τον μη γνωστικό και η παρεμβολή που προκαλεί μπορεί να αντισταθμιστεί χρησιμοποιώντας μέρος της ισχύος των γνωστικών χρηστών για την αναμετάδοση του μηνύματος των μη γνωστικών χρηστών.</p> <p>Ο γνωστικός χρήστης μπορεί να μεταδίδει με οποιαδήποτε ισχύ. Η παρεμβολή στους μη γνωστικούς χρήστες μπορεί να αντισταθμιστεί μέσω της αναμετάδοσης του μηνύματος των μη γνωστικών χρηστών.</p>	<p><u>Πληροφόρηση καναλιού:</u> Ο γνωστικός (δευτερεύων) πομπός γνωρίζει τις δυνατότητες καναλιού των μη γνωστικών (πρωτεύοντων) χρηστών.</p> <p>Ο γνωστικός χρήστης μπορεί να μεταδίδει ταυτόχρονα με τον μη γνωστικό, εφόσον η παρεμβολή που προκαλείται διατηρείται κάτω από ένα αποδεκτό όριο.</p> <p>Η μεταδιδόμενη ισχύς του γνωστικού χρήστη περιορίζεται λόγω ενός ανώτατου αποδεκτού ορίου παρεμβολής.</p>	<p><u>Πληροφόρηση δραστηριότητας:</u> Ο γνωστικός χρήστης γνωρίζει τις «φασματικές τρύπες» στο χώρο, το χρόνο ή τη συχνότητα, όταν οι μη γνωστικοί χρήστες δεν τις χρησιμοποιούν.</p> <p>Ο γνωστικός χρήστης μπορεί να μεταδίδει ταυτόχρονα με τον μη γνωστικό μόνο σε περίπτωση λανθασμένης ανίχνευσης «φασματικής τρύπας».</p> <p>Η μεταδιδόμενη ισχύς του γνωστικού χρήστη περιορίζεται από το εύρος ανίχνευσης της «φασματικής τρύπας».</p>

Πίνακας 1-3: Σύγκριση των overlay, underlay και interweave προσεγγίσεων

### 1.3.3 Αρχιτεκτονική γνωστικών ραδιοσυστημάτων

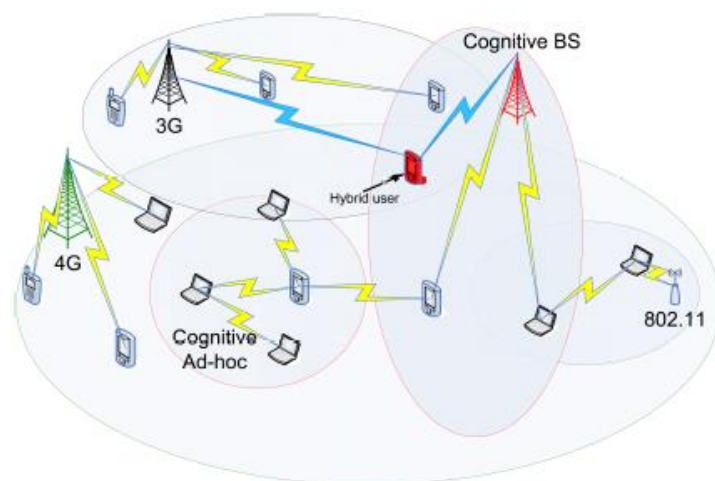
#### 1.3.3.1 Στοιβά πρωτοκόλλων στο γνωστικό ραδιοδίκτυο

Το φυσικό επίπεδο της στοιβάς πρωτοκόλλων του γνωστικού ραδιοδικτύου (Cognitive Radio Network-CRN) αποκτά υπόσταση μέσω ενός SDR εκπομπού. Τα προσαρμοστικά πρωτόκολλα στα επίπεδα MAC, δικτύου, μεταφοράς και εφαρμογής, πρέπει να είναι ενήμερα για τις μεταβολές του γνωστικού ραδιο-περιβάλλοντος. Ιδιαίτερως αυτά πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους τη δράση των PUs, τις απαιτήσεις μετάδοσης των SUs και τις μεταβολές στην ποιότητα του καναλιού. Για τη σύνδεση μεταξύ των δομών χρησιμοποιείται ένας γνωστικός ελεγκτής για να εγκαταστήσει διεπαφές ανάμεσα στον SDR εκπομπό, τα προσαρμοστικά πρωτόκολλα και τις ασύρματες εφαρμογές και υπηρεσίες. Η συνολική διάταξη χρησιμοποιεί ευφυείς αλγορίθμους για την επεξεργασία του μετρούμενου σήματος στο φυσικό επίπεδο και λαμβάνει πληροφορίες για τις απαιτήσεις μετάδοσης από τις διάφορες εφαρμογές, ώστε να ελέγχονται οι παράμετροι των πρωτοκόλλων στα διαφορετικά επίπεδα [5]. Μάλιστα, η στοιβά πρωτοκόλλων παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.8.



Σχήμα 1.8: Η στοιβά πρωτοκόλλων στο γνωστικό ραδιοσύστημα

### 1.3.3.2 Συνύπαρξη ετερογενών δικτύων



Σχήμα 1.9: Συνύπαρξη CRN με άλλα πρωτεύοντα δίκτυα

Η CRN αρχιτεκτονική αποτελείται από πρωτεύοντα και δευτερεύοντα δίκτυα. Στο Σχήμα 1.9 παρουσιάζεται μια τέτοια πιθανή αρχιτεκτονική. Τα πρωτεύοντα δίκτυα περιέχουν τις ήδη υπάρχουσες ασύρματες δικτυακές υποδομές, όπως GSM, UMTS, τηλεοπτική εκπομπή κ.α, στις οποίες έχουν εκχωρηθεί άδειες για λειτουργία σε συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων. Τα δίκτυα αυτά περιέχουν πρωτεύοντες σταθμούς βάσης και πρωτεύοντες χρήστες. Οι πρωτεύοντες σταθμοί βάσης χρησιμοποιούνται στα ασύρματα δίκτυα με υποδομή και διατηρούν φασματική άδεια για την επικοινωνία με τους πρωτεύοντες χρήστες. Γενικά, οι πρωτεύοντες σταθμοί βάσης δεν έχουν τη δυνατότητα διαμοιρασμού του φάσματος με τους δευτερεύοντες χρήστες.

Το δευτερεύον δίκτυο είναι ένα γνωστικό δίκτυο του οποίου τα συστατικά δεν έχουν άδεια για πρόσβαση σε οποιαδήποτε ζώνη συχνοτήτων. Αυτό μπορεί να είναι με ή χωρίς υποδομή (ad hoc) δίκτυο. Στη δεύτερη περίπτωση σχηματίζεται δίκτυο μεταξύ των χρηστών, χωρίς να χρειάζεται σταθμός βάσης, αφού κάποιος από τους χρήστες λειτουργεί σαν σημείο πρόσβασης (Access Point-AP). Στην περίπτωση ενός δευτερεύοντος δικτύου με υποδομή, οι δευτερεύοντες σταθμοί βάσης παρέχουν επικοινωνία ενός άλματος στους δευτερεύοντες χρήστες, ανακαλύπτουν «φασματικές τρύπες» και λειτουργούν στην πιο κατάλληλη διαθέσιμη ζώνη συχνοτήτων για να αποφευχθεί η παρεμβολή με τα πρωτεύοντα δίκτυα. Παράδειγμα CRN αρχιτεκτονικής με υποδομή αποτελεί το δίκτυο IEEE 802.22 [17]. Οι δευτερεύοντες χρήστες είναι εξοπλισμένοι με γνωστικές συσκευές και έχουν δυναμική πρόσβαση στο φάσμα, αλλάζοντας τις συχνοτικές ζώνες όταν ανιχνεύουν πρωτεύουσες μεταδόσεις. Οι SUs μπορεί να είναι συνδεδεμένοι είτε σε έναν δευτερεύοντα σταθμό βάσης, είτε με αδόμητο τρόπο. Οι φασματικοί εξυπηρετητές ή «μεσάζοντες φάσματος» χρησιμοποιούνται για να συντονίσουν τη φασματική χρήση μεταξύ διαφορετικών δευτερεύοντων δικτύων.

Ένα άλλο είδος γνωστικών χρηστών που μπορεί να αναδυθεί στο μέλλον, ώστε να εκμεταλλεύεται πλήρως τις δυνατότητες της CR τεχνολογίας, είναι οι υβριδικοί χρήστες.

Αυτοί είναι πρωτεύοντες χρήστες που είναι εξοπλισμένοι, εκτός από τους πρωτεύοντες εκπομπούς τους, με γνωστικές ραδιο-συσκευές. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.9 οι χρήστες μπορεί να εξοπλίζονται με smartphone (υβριδικό) που έχει 3G σύνδεση διαδικτύου, όπως οι πρωτεύοντες χρήστες στην αδειοδοτημένη 3G ζώνη, αλλά και διεπαφή για ασύρματο γνωστικό δίκτυο, οπότε το smartphone μπορεί να συνδέεται και σε δευτερεύοντα δίκτυα. Έτσι, οι υβριδικοί χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση όχι μόνο σε πρωτεύοντα, αλλά και σε δευτερεύοντα δίκτυα και μάλιστα ταυτόχρονα, αφού η σύνδεση σε καθένα από αυτά μπορεί να γίνει με διαφορετικές ραδιο-διεπαφές. Με αυτόν τον τρόπο μεγιστοποιούν την επίδοσή τους και την ποιότητα υπηρεσίας, διότι θα εκτελούνται διαφορετικές εφαρμογές σε κάθε δίκτυο και η μια σύνδεση δεν θα επηρεάζει την επίδοση των άλλων συνδέσεων, καθώς θα λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες. Παραδείγματος χάρη, σε μια γεωγραφική περιοχή όπου πολλαπλά πρωτεύοντα δίκτυα λειτουργούν μαζί με δευτερεύοντα δίκτυα, οι υβριδικοί χρήστες θα είναι ικανοί να έχουν πρόσβαση σε κάθε τύπο δικτύου, ανάλογα με τις προτιμήσεις τους και το φόρτο τηλεπικοινωνιακής κίνησης των δικτύων, ή ακόμα και ταυτόχρονη πρόσβαση στα πολλαπλά δίκτυα. Το πλεονέκτημα των υβριδικών χρηστών είναι ότι έχουν υψηλότερη προτεραιότητα από τους SUs όταν εισέρχονται στα πρωτεύοντα δίκτυα και την ίδια προτεραιότητα με τους SUs, όσον αφορά την είσοδό τους σε γνωστικά δίκτυα. Οι χρήστες αυτοί δεν εκκενώνουν την αδειοδοτημένη ζώνη συχνοτήτων όταν εκπέμπουν άλλοι πρωτεύοντες χρήστες, αφού και οι ίδιοι είναι PUs, όμως μπορούν να εκμεταλλευτούν το διαθέσιμο φάσμα σε άλλες συχνότητες σε περίπτωση υψηλής συνολικής απαίτησης για ρυθμαπόδοση [11].

#### 1.3.4 Θερμοκρασία παρεμβολής

Η πιο κλασική προσέγγιση που αφορά την πρόσβαση των SUs στις φασματικές ζώνες των PUs, είναι να περιορίζεται η ισχύς εκπομπής τους κάτω από κάποιο όριο. Συγκεκριμένα, η ισχύς τους δεν θα πρέπει να βρίσκεται πάνω από κάποιο προκαθορισμένο κατώφλι θορύβου, σε συγκεκριμένη απόσταση από τον πομπό. Λόγω όμως της υψηλής κινητικότητας και των μεταβολών στους πομπούς μετάδοσης, ο περιορισμός της ισχύος εκπομπής μπορεί να γίνει πολύπλοκος, καθώς μπορεί να εμφανισθούν απρόσμενα νέες πηγές παρεμβολής. Για να αντιμετωπιστεί η συγκεκριμένη περίπτωση, η αρμόδια επιτροπή πρότεινε την ανάπτυξη της μετρικής που ονόμασε «θερμοκρασία παρεμβολής»[18]. Η θερμοκρασία παρεμβολής είναι μια μετρική της λαμβανόμενης ισχύος στην κεραία του δέκτη και αναπαριστά τις ισχείς άλλων πομπών αλλά και πηγών θορύβου. Συγκεκριμένα ορίζεται ανά μονάδα εύρους ζώνης με τον κάτωθι τύπο

$$I_T(f_c, W) = \frac{P_I(f_c, W)}{KW} \quad (\text{Εξίσωση 1.1})$$

όπου  $P_I(f_c, W)$  είναι η μέση ισχύς παρεμβολής σε Watts, με κεντρική συχνότητα την  $f_c$ , καλύπτοντας εύρος ζώνης  $W$ , μετρούμενο σε hertz και η σταθερά Boltzmann  $K$  έχει τιμή  $1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ .

Μάλιστα, η προδιαγραφή του «ορίου θερμοκρασίας παρεμβολής» παρέχει τον χαρακτηρισμό της «χειρίστης περίπτωσης» του ραδιο-περιβάλλοντος σε μια συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων και σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, όπου ο δέκτης

προσδοκάται να λειτουργεί ικανοποιητικά. Κάθε μη αδειοδοτημένος (δευτερεύων) πομπός, που χρησιμοποιεί μια ζώνη συχνοτήτων, πρέπει να εγγυάται πως η μετάδοσή του, μαζί με τον υπάρχοντα θόρυβο και την παρεμβολή, δεν θα πρέπει να υπερβαίνουν το όριο θερμοκρασίας παρεμβολής στον αδειοδοτημένο δέκτη.

Η ανάπτυξη του όρου «θερμοκρασία παρεμβολής» έχει τα εξής οφέλη:

1. Η θερμοκρασία παρεμβολής στην κεραία του δέκτη παρέχει ένα ακριβές μέτρο για το αποδεκτό επίπεδο της ραδιο-παρεμβολής στην επιθυμητή ζώνη συχνοτήτων. Οποιαδήποτε μετάδοση σε αυτή τη ζώνη ενδέχεται να είναι επιζήμια αν αυξάνει το επίπεδο θορύβου πάνω από το όριο θερμοκρασίας παρεμβολής. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό, είναι αναγκαίο ο δέκτης να έχει μια αξιόπιστη εκτίμηση φάσματος ως προς τη θερμοκρασία παρεμβολής. Αυτή η απαίτηση επιτυγχάνεται ακολουθώντας τα δύο παρακάτω βήματα:

a) Χρήση της μεθόδου multitaper για την εκτίμηση της φασματικής ισχύος της θερμοκρασίας παρεμβολής, λόγω της συσσωρευτικής κατανομής τόσο των εσωτερικών πηγών θορύβου, όσο και εξωτερικών πηγών ενέργειας RF. Η μέθοδος αυτή μπορεί να επιλύσει το δίλημμα μεταξύ της πόλωσης (bias) και της διακύμανσης (variance) ενός εκτιμητή και να παρέχει μια εκτίμηση της επίδοσης κοντά στη βέλτιστη[19].

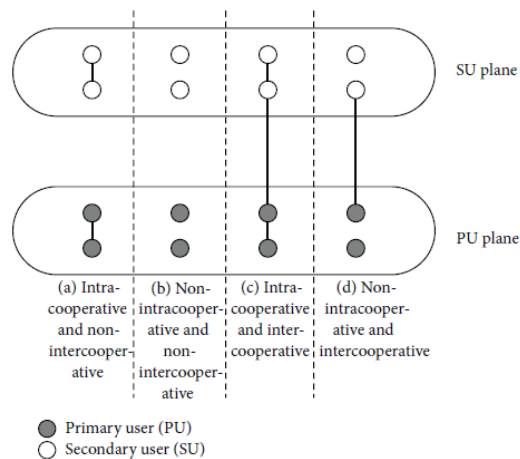
Το προαναφερθέν δίλημμα περιγράφεται στα εξής δυο σημεία:

- Η πόλωση της εκτίμησης του φάσματος ισχύος μιας χρονοσειράς, λόγω του φαινομένου της διαρροής του πλευρικού λοβού, μειώνεται μέσω της παραθυροποίησης (windowing ή tapering ) της χρονοσειράς.
- Το κόστος της παραπάνω βελτίωσης είναι μια αύξηση στη διακύμανση της εκτίμησης, που οφείλεται στην απώλεια πληροφορίας λόγω της μείωσης του αποδοτικού μεγέθους του δείγματος.

b) Χρήση ενός μεγάλου αριθμού αισθητήρων για την εποπτεία του ραδιο-περιβάλλοντος, όπου είναι εφικτό. Ο μεγάλος αριθμός αισθητήρων χρειάζεται για τον υπολογισμό των χωρικών διακυμάνσεων των RF ερεθισμάτων από την μια τοποθεσία στην άλλη.

2. Δεδομένης μιας συγκεκριμένης ζώνης συχνοτήτων, στην οποία η θερμοκρασία παρεμβολής δεν υπερβαίνεται, η συγκεκριμένη ζώνη μπορεί να καταστεί διαθέσιμη σε μη εξυπηρετούμενους χρήστες. Το όριο θερμοκρασίας παρεμβολής μπορεί τότε να χρησιμοποιηθεί σαν ένας περιορισμός για την πιθανή ενέργεια των ραδιοσυχνοτήτων, που μπορεί να εισαχθεί στη συγκεκριμένη ζώνη.

### 1.3.5 Συνεργατική επικοινωνία



Σχήμα 1.10: Τρόποι συνεργασίας μεταξύ του PU και SU δικτύου

Στο Σχήμα 1.10 παρουσιάζονται οι τέσσερις πιθανές κατηγορίες στις οποίες θα μπορούσε να διακριθεί η συνεργασία PUs και SUs στα γνωστικά ραδιοσυστήματα.

- **Ενδοσυνεργατική/Μη ενδοσυνεργατική συμπεριφορά:** Οι PUs συνεργάζονται μεταξύ τους για να επιτύχουν οικονομικά οφέλη καθώς και βελτίωση της απόδοσης τους, ενώ τον ίδιο τρόπο συνεργασίας μπορούν να ακολουθήσουν και οι SUs. Στο Σχήμα 1.10 η ενδοσυνεργασία παρουσιάζεται στα (a) και (c). Από την πλευρά των δευτερευόντων χρηστών, αυτοί μπορεί να προχωρούν σε ενδοσυνεργασία για τη βελτίωση της ρυθμαπόδοσής τους και τη μείωση του οικονομικού και μη κόστους που τίθεται από τους πρωτεύοντες χρήστες για την επικοινωνία του φάσματος. Με άλλα λόγια, μια ομάδα δευτερευόντων χρηστών μπορεί να επικοινωνήσει ένα κανάλι και εν συνεχεία να το μοιραστεί με τους υπολοίπους δευτερεύοντες χρήστες έτσι ώστε να μειωθεί το κόστος επικοινωνίας. Ο μη ενδοσυνεργατικός τρόπος παρουσιάζεται στα (b) και (d). Από την πλευρά του PU, κάθε PU μπορεί να μη συνεργάζεται με τους υπολοίπους με σκοπό να επικοινωνήσει τις δικές του «φασματικές τρύπες» και έτσι κάθε πρωτεύων χρήστης μπορεί να θέσει μια ανταγωνιστική τιμή βασιζόμενη στη ζήτηση των καναλιών από τους δευτερεύοντες χρήστες. Όσον αφορά τους SUs, αυτοί μπορεί να ανταγωνίζονται μεταξύ τους για την πρόσβαση στο φάσμα μέσω δημοπρατικών μηχανισμών.
- **Διασυνεργατική/Μη διασυνεργατική συμπεριφορά:** Οι PUs και SUs μπορεί να αναπτύξουν διασυνεργατική συμπεριφορά, που παρουσιάζεται στα (c) και (d), για να επιτύχουν οικονομικά οφέλη και βελτίωση της επίδοσης του δικτύου. Στα (a) και (b) παρουσιάζεται η μη διασυνεργατική συμπεριφορά και οι πρωτεύοντες και δευτερεύοντες χρήστες αναφέρονται ως εγωιστές, αφού δεν συνεργάζονται μεταξύ τους [20]. Για παράδειγμα στο [21] προσπαθούν να μεγιστοποιήσουν το κέρδος ή τα έσοδα τους με την επικοινωνία του φάσματος, ενώ οι δευτερεύοντες χρήστες προσπαθούν να μειώσουν το κόστος.

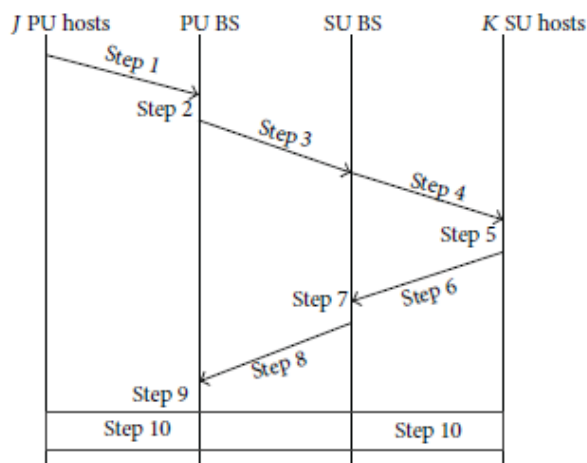
Τα πρωτόκολλα συνεργασίας επιτρέπουν στους SUs να δρουν σαν αναμεταδότες του σήματος των PUs για κάποιο χρονικό διάστημα, με αντάλλαγμα την πρόσβαση στο φάσμα.



Με αυτόν τον τρόπο, οι PUs μεγιστοποιούν την απόδοση τους ως προς την καταναλισκόμενη ισχύ και οι SUs τη ρυθμαπόδοσή τους.

Η έννοια της συνεργασίας κατέχει σημαντικό ρόλο στα CR δίκτυα επόμενης γενιάς (CRN) παρέχοντας διάφορους τρόπους έτσι ώστε ασύρματες συσκευές χαμηλότερης ισχύος να επιτυγχάνουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Αυτή, εκμεταλλευόμενη το χρονικό και χωρικό διαφορισμό, βελτιώνει την επίδοση του CRN και παρέχει πλεονεκτήματα όπως χαμηλότερη ισχύ εκπομπής, υψηλότερη ενεργειακή απόδοση, υψηλή ρυθμαπόδοση, χαμηλότερη παρεμβολή στο πρωτεύον δίκτυο και καλύτερη κάλυψη του δικτύου. Η συνεργασία, όμως, έχει και μειονεκτήματα, όπως η αυξημένη τηλεπικοινωνιακή κίνηση λόγω της αναμετάδοσης και η αυξημένη από άκρο σε άκρο καθυστέρηση. Η συνεργασία μπορεί να διακριθεί σε **αυστηρή**, όπου οι SUs μπορούν να δρουν μόνο σαν αναμεταδότες και **δυναμική**, όπου οι SUs μπορούν να συνεργάζονται με πρωτεύοντα και δευτερεύοντα δίκτυα[15].

Ο διαμοιρασμός του φάσματος περιλαμβάνει διάφορα βήματα και μεθόδους «χειραψίας» μέσω μηνυμάτων μεταξύ των μερών. Στο Σχήμα 1.11 απεικονίζεται μια γενική διαδικασία διαμοιρασμού του φάσματος μεταξύ δυο κεντροποιημένων πρωτευόντων και δευτερευόντων δικτύων τα οποία συνυπάρχουν στην ίδια περιοχή. Οι διάφοροι PU hosts (ή SU hosts) σχετίζονται με έναν PU BS (ή SU BS). Η διαδικασία περιγράφεται παρακάτω.



Σχήμα 1.11: Μια γενική απεικόνιση της διαδικασίας διαμοιρασμού του φάσματος

- 1) Οι PU hosts πληροφορούν τον PU BS για τις σιωπηρές περιόδους τους (ή «φασματικές τρύπες»).
- 2) Ο PU BS καθορίζει το κόστος και τη διάρκεια των «φασματικών τρυπών». Υπάρχουν J PU hosts που μπορούν να επικοινωνήσουν φάσμα σε SUs.
- 3) Ο PU BS στέλνει την πληροφορία για τη συνεργασία, όπως το κόστος, τη διάρκεια και το σηματοθορυβικό λόγο των «φασματικών τρυπών» στον SU BS.
- 4) Ο SU BS εκπέμπει τη συνεργατική πληροφορία στους K SU hosts.
- 5) Οι SU hosts καθορίζουν τις βέλτιστες στρατηγικές για τη μετάδοση και την αναμετάδοση χρησιμοποιώντας τη συνεργατική πληροφορία. Αν εφαρμόζεται δημοπρατικός μηχανισμός, τότε οι SU hosts υποβάλλουν τις προσφορές τους.
- 6) Οι SU hosts στέλνουν τις αντίστοιχες αποφάσεις τους (στρατηγικές και προσφορές) στον SU BS.

- 7) Ο SU BS αποφασίζει αν θα αποδεχθεί ή όχι την επικοινωνία και επιλέγει τους κατάλληλους PUs για τη συνεργασία.
- 8) Ο SU BS στέλνει τις αποφάσεις του στον PU BS.
- 9) Ο PU BS αποφασίζει αν θα επικοινωνήσει ή όχι το φάσμα και επιλέγει τους κατάλληλους SUs που θα λειτουργήσουν σαν αναμεταδότες.
- 10) Τελικώς, βασιζόμενοι στην επικοινωνία, ο PU BS μεταδίδει τα πακέτα άμεσα, μέσω ενός άλματος, ή έμμεσα χρησιμοποιώντας τους SUs σαν κόμβους αναμετάδοσης στον PU BS κόμβο προορισμού. Ο SU BS μπορεί να διαιρέσει τις «φασματικές τρύπες» και να εκχωρήσει το χρόνο πρόσβασης αυτών σε κάθε SU host. Οι SUs στη συνέχεια προχωρούν στη μετάδοση των πακέτων τους. [20]

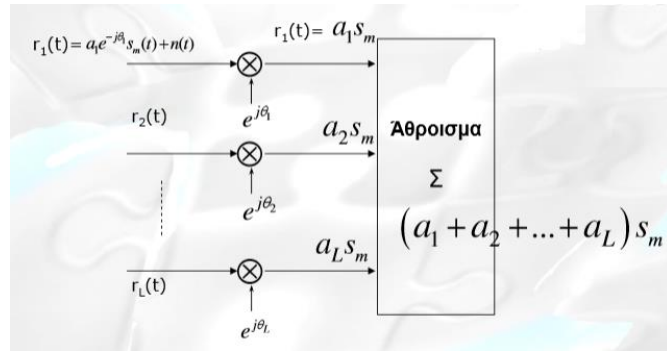
Ευρέως χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα αναμετάδοσης που βελτιώνουν την επίδοση των ασύρματων δικτύων είναι τα :

- Ενίσχυσης και προώθησης (Amplify and Forward-AF): Σε ένα AF σχήμα, ο αναμεταδότης ενισχύει και προωθεί το λαμβανόμενο σήμα προς τον προορισμό.
- Αποκωδικοποίησης και προώθησης (Decode and Forward-DF): Σε ένα DF σχήμα, ο αναμεταδότης πρώτα αποκωδικοποιεί και στη συνέχεια προωθεί το επανακωδικοποιημένο σήμα προς τον προορισμό.
- Συμπίεσης και προώθησης (Compress and Forward-CF): Σε ένα CF σχήμα, ο αναμεταδότης συμπιέζει το λαμβανόμενο από τον κόμβο-πηγή σήμα και το προωθεί στον προορισμό.

Στο **CF σχήμα** η κβαντισμένη και συμπιεσμένη εκδοχή του λαμβανόμενου σήματος μεταδίδεται από τον αναμεταδότη, ενώ στα DF και AF σχήματα ο αναμεταδότης μεταδίδει ένα αντίγραφο του λαμβανόμενου σήματος. Στην περίπτωση του CF σχήματος, ο δέκτης πρέπει να χρησιμοποιήσει απαραίτητες συνδυαστικές τεχνικές για να συνδυάσει το απευθείας μη κβαντισμένο, μη συμπιεσμένο σήμα, με το αναμεταδιδόμενο κβαντισμένο και συμπιεσμένο σήμα.

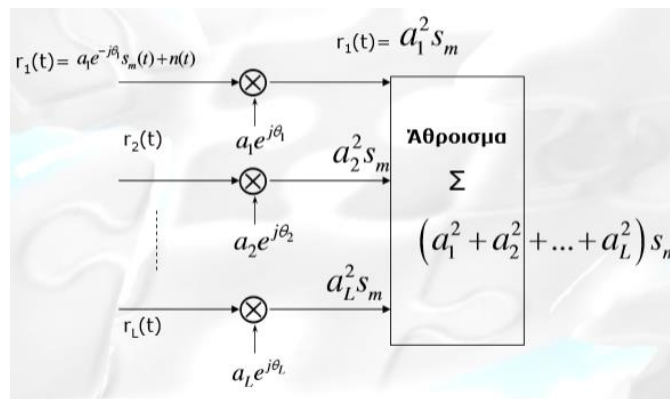
Τα πλεονεκτήματα του **AF πρωτοκόλλου** αναμετάδοσης είναι η απλότητα και το μειωμένο κόστος υλοποίησης, αλλά αυτό παρουσιάζει λάθη κατά τη διάδοση, αφού μαζί με το σήμα ενισχύεται και ο θόρυβος στον αναμεταδότη. Τα παραπάνω λάθη αντιμετωπίζονται με τη βοήθεια των CF και DF πρωτοκόλλων. Οι CF αναμεταδότες καταναλώνουν περισσότερη ισχύ, λόγω του μηχανισμού αποκωδικοποίησης και συμπίεσης. Για δίκτυα με καλές backhaul συνδέσεις το DF σχήμα είναι προτιμητέο, ενώ σε αυτά με φτωχές backhaul συνδέσεις προτιμάται το AF σχήμα.

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα στα πρωτόκολλα αναμετάδοσης είναι η πολυπλοκότητα του δέκτη και εξαρτάται από τις συνδυαστικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται σε αυτόν. Οι συνδυαστικές τεχνικές είναι οι εξής: η **συνδυαστική ίσου κέρδους** (Equal Gain Combining-EGC), η **συνδυαστική επιλογής** (Selection Combining-SC) και η **συνδυαστική μεγίστου λόγου** (Maximal Ratio Combining-MRC). Η υλοποίηση της τελευταίας απαιτεί την μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στο δέκτη.



Σχήμα 1.12: Δέκτης EGC

Στη συνδυαστική ίσου κέρδους (EGC) τα αντίγραφα σήματα είναι μόνο ομοφασικά και ο συγκεκριμένος δέκτης παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.12.



Σχήμα 1.13: Δέκτης MRC

Στη συνδυαστική μεγίστου λόγου (MRC), ο σηματοθορυβικός λόγος (SNR) στη συνδυασμένη έξοδο του MRC δέκτη δίνεται από το άθροισμα των SNR των L διαφορετικών μονοπατιών.

$$SNR_{MRC} = \sum_{i=1}^L SNR_i \quad (\text{Εξίσωση 1.2})$$

Στο δέκτη αυτόν τα ληφθέντα σήματα πολλαπλασιάζονται με τον συζυγή του βάρους του καναλιού και συνδυάζονται με σύμφωνο τρόπο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.13.

Στη συνδυαστική επιλογής (SC), ο SC δέκτης επιλέγει κάθε φορά το αντίγραφο εκείνο, από τα L διαφορετικά μονοπάτια, με το υψηλότερο SNR, δηλαδή το σήμα με την καλύτερη ποιότητα.

$$SNR_{SC} = \max[SNR_1, SNR_2, \dots, SNR_L] \quad (\text{Εξίσωση 1.3})$$

Οι αναμεταδότες στα συνεργατικά πρωτόκολλα επικοινωνίας λειτουργούν με δυο τρόπους, είτε σε **half-duplex** (χρησιμοποιείται ένας δίαυλος και για τις δυο κατευθύνσεις επικοινωνίας, αμφίδρομη αλλά όχι ταυτόχρονη επικοινωνία και συνεπώς ο χρήστης, σε μια δεδομένη χρονική στιγμή μπορεί μόνο να εκπέμπει ή μόνο να λαμβάνει), είτε σε **full-duplex** (υπάρχει ταυτόχρονη εκπομπή και λήψη, δηλαδή το σύστημα παρέχει δύο ταυτόχρονους δίαυλους για την επικοινωνία στις δυο κατευθύνσεις). Στον πρώτο τρόπο λειτουργίας, η διαβίβαση του κάθε συμβόλου λαμβάνει χώρα σε δυο φάσεις (δυο χρονοθυρίδες). Στην πρώτη φάση, η πηγή εκπέμπει τα δεδομένα της και ο προορισμός και ο (οι) αναμεταδότης

(-τες) λαμβάνουν το σήμα που μεταφέρει τα δεδομένα. Στη δεύτερη φάση, μόνο οι αναμεταδότες προωθούν τα δεδομένα στον προορισμό. Στον full-duplex τρόπο λειτουργίας οι αναμεταδότες εκπέμπουν και λαμβάνουν ταυτόχρονα. Η επίδοση του συστήματος μπορεί να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας πολλαπλούς αναμεταδότες, παρά ένα μόνο αναμεταδότη, για τη διαβίβαση της ίδιας πληροφορίας στον προορισμό. Οι πολλαπλοί αναμεταδότες προσφέρουν μεγαλύτερη ελευθερία στην επιλογή καλών διαδρομών ανάμεσα στην πηγή και τους αναμεταδότες και τους αναμεταδότες και τον προορισμό. Έτσι, εγείρεται το θέμα της κατάλληλης επιλογής της ομάδας των SUs που θα λειτουργήσουν ως αναμεταδότες του σήματος των PUs.

Τέλος, τα συνεργατικά πρωτόκολλα μπορούν να λειτουργούν είτε με **ορθογωνικό**, είτε με **διαμοιραζόμενη ζώνη** τρόπο. Στον ορθογωνικό τρόπο πολλαπλοί αναμεταδότες μεταδίδουν την ίδια πληροφορία στον προορισμό σε ορθογωνικά κανάλια, όπως διαφορετικές χρονοσχισμές ή συχνότητες ή συνδυασμό των δύο. Στον διαμοιραζόμενη ζώνη τρόπο οι πολλαπλοί αναμεταδότες αποστέλλουν τα ίδια δεδομένα στον προορισμό ταυτόχρονα, στην ίδια συχνότητα και στην ίδια χρονοσχισμή. Στον δεύτερο τρόπο απαιτείται αυστηρός συγχρονισμός μεταξύ των αναμεταδοτών, για να αποφεύγεται η παρεμβολή και η επίδοση των αναμεταδοτών είναι καλύτερη από αυτούς που χρησιμοποιούν τον ορθογωνικό τρόπο, αλλά απαιτείται πολυπλοκότερη διάταξη στο δέκτη.

### 1.3.6 Έλεγχος ισχύος στα γνωστικά ραδιοσυστήματα

Οι συμβατικές ασύρματες επικοινωνίες αναπτύσσονται γύρω από σταθμούς βάσης, οι οποίοι ελέγχουν τα επίπεδα ισχύος εκπομπής, ώστε να εξυπηρετούν την απαιτούμενη περιοχή κάλυψης και να επιτυγχάνεται η προσχεδιασμένη επίδοση στο δέκτη. Από την άλλη πλευρά, ίσως είναι απαραίτητο για ένα γνωστικό ραδιοσύστημα να λειτουργεί με ένα αποκεντρωμένο τρόπο, επεκτείνοντας το εύρος των εφαρμογών του. Για να συμβεί αυτό πρέπει να αναπτυχθούν εναλλακτικοί τρόποι ελέγχου της ισχύος. Μια μερική απάντηση στο θεμελιώδες ζήτημα για το πώς μπορεί να επιτευχθεί ο έλεγχος της εκπεμπόμενης ισχύος στον πομπό, δίνεται μέσω των συνεργατικών μηχανισμών με τους οποίους επιτυγχάνεται η πολλαπλή πρόσβαση των χρηστών στο γνωστικό ραδιοκανάλι [12]. Οι συνεργατικοί μηχανισμοί περιλαμβάνουν τα κάτωθι :

- 1) Ετικέτα και πρωτόκολλο: Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να παρομοιαστούν με τη χρήση των φαναριών, τα σήματα стоп και τα όρια ταχύτητας που ισχύουν για τους αυτοκινητιστές (χρησιμοποιώντας ένα σύστημα υψηλής μεταφορικής πυκνότητας από δρόμους και λεωφόρους) για την προσωπική τους ασφάλεια.
- 2) Συνεργατικά ad hoc ( χωρίς σταθερή υποδομή ) δίκτυα: Στο [13] ο Shepard μελετά ένα δίκτυο μεγάλων πακέτων χρησιμοποιώντας διαμόρφωση φασματικής εξάπλωσης. Η μόνη μορφή συντονισμού που απαιτείται σε αυτό το δίκτυο είναι η δημιουργία ζευγών μεταξύ γειτονικών κόμβων (χρηστών), τα οποία βρίσκονται σε άμεση επικοινωνία. Για τον περιορισμό της παρεμβολής προτείνεται σε κάθε κόμβο η δημιουργία ενός προγράμματος εκπομπής-λήψης. Για το πρόγραμμα αυτό ενημερώνεται ο κοντινότερος γείτονας μόνο όταν τα προγράμματα των δυο κόμβων επιτρέπουν στον κόμβο πηγή να εκπέμψει και στον κόμβο δέκτη να λάβει. Κάποιες προσομοιώσεις έδειξαν πως με τον ολικά αποκεντρωμένο τρόπο ελέγχου το δίκτυο μπορεί να αυξηθεί σε σχεδόν αυθαίρετο αριθμό κόμβων.

Με τους συνεργατικούς μηχανισμούς, οι γνωστικοί χρήστες ωφελούνται από τη συνεργασία και το σύστημα μπορεί να εξυπηρετήσει περισσότερους χρήστες, μέσω της βελτίωσης της στρατηγικής στη διαχείριση του φάσματος.

Βέβαια, εκτός από τη συνεργασία στα ad hoc και στα δίκτυα σταθερής υποδομής μεταξύ των χρηστών, μπορεί να εμφανιστεί και ο ανταγωνισμός. Αυτό που οδηγεί τους χρήστες να ανταγωνίζονται μεταξύ τους είναι οι περιορισμοί που τίθενται στους διαθέσιμους πόρους του δικτύου. Σε ένα περιβάλλον πολλαπλών χρηστών κάποιος από αυτούς θα θέλει να αξιοποιήσει το κανάλι για προσωπική του χρήση, οδηγώντας και τους υπόλοιπους χρήστες σε παρόμοια συμπεριφορά. Όμως, η εκμετάλλευση μέσω του ανταγωνισμού δεν θα πρέπει να οδηγήσει σε σύγχυση ως προς τον αυτοπροσδιορισμό του CR, που περιλαμβάνει την εκχώρηση προτεραιότητας σε ορισμένα ερεθίσματα, όπως είναι επείγοντα αιτήματα ή ανάγκες. Το πρόβλημα στο περιβάλλον πολλαπλών χρηστών είναι ότι ο έλεγχος της εκπεμπόμενης ισχύος έχει δυο αυστηρούς περιορισμούς ως προς τους δικτυακούς πόρους: το όριο της θερμοκρασίας παρεμβολής που επιβάλλουν οι αρμόδιες αρχές και τον περιορισμένο αριθμό των «φασματικών τρυπών» ανάλογα με τη χρήση.

### **1.3.7 Εκτίμηση της κατάστασης καναλιού**

Σε κάθε επικοινωνιακή ζεύξη ο υπολογισμός της χωρητικότητας καναλιού απαιτεί τη γνώση της κατάστασης του καναλιού. Το ίδιο συμβαίνει και με τις ζεύξεις των γνωστικών ραδιοσυστημάτων. Για την εκτίμηση της κατάστασης του καναλιού (Channel State Information-CSI) ακολουθείται ένας από τους παρακάτω δυο τρόπους[22].

- Διαφορική ανίχνευση, η οποία δανείζεται στην M-αδική διαμόρφωση φάσης.
- Πιλοτική μετάδοση, που περιλαμβάνει τη μετάδοση ενός πιλοτικού σήματος γνωστού στο δέκτη.

Η χρήση της διαφορικής ανίχνευσης προσφέρει ευρωστία και απλότητα στην υλοποίηση, αλλά οδηγεί σε σημαντική υποβάθμιση το ρυθμό λανθασμένων πλαισίων (Frame Error Rate-FER) ως προς το σηματοθορυβικό λόγο (Signal-to-Noise Ratio-SNR) στο δέκτη. Αντίθετα, η πιλοτική μετάδοση προσφέρει βελτίωση στην επίδοση του δέκτη, αλλά αποτελεί σπατάλη στη μεταδιδόμενη ισχύ και στο εύρος ζώνης καναλιού.

Ο δέκτης απαιτεί τη γνώση του CSI για να υπάρχει ικανοποιητική επίδοση και για να το επιτύχει χρησιμοποιεί την ημίτυφλη εκμάθηση(semi-blind training)[23] που διαχωρίζεται από τις δυο παραπάνω προσεγγίσεις (διαφορική ανίχνευση, πιλοτική μετάδοση) στο γεγονός ότι ο δέκτης έχει δυο τρόπους λειτουργίας:

- Εποπτευόμενη λειτουργία εκμάθησης : Σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας ο δέκτης αποκτά μια εκτίμηση για το CSI, η οποία πραγματοποιείται με την παρατήρηση μιας σύντομης ακολουθίας εκμάθησης, που αποτελείται από δυο ή τέσσερα σύμβολα γνωστά στο δέκτη. Η σύντομη αυτή ακολουθία εκπέμπεται από τον πομπό στο κανάλι, πριν την περίοδο της μετάδοσης των πραγματικών δεδομένων.
- Λειτουργία παρακολούθησης : Από τη στιγμή που επιτυγχάνεται μια αξιόπιστη εκτίμηση για την κατάσταση του καναλιού, η αλληλουχία εκμάθησης σταματά, η πραγματική μετάδοση δεδομένων ξεκινά και ο δέκτης εισέρχεται στη φάση της λειτουργίας παρακολούθησης. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας λαμβάνει χώρα χωρίς εποπτεία και σε συνεχή βάση κατά τη διάρκεια μετάδοσης δεδομένων.

### 1.3.8 Διαχείριση του καναλιού ελέγχου

Τα περισσότερα συστήματα δυναμικής διαχείρισης φάσματος χρησιμοποιούν ένα μοναδικό κανάλι ελέγχου για να συντονίζουν την διανομή του φάσματος. Η υπόθεση αυτή δεν είναι ρεαλιστική για την ευκαιριακή πρόσβαση, αφού μπορεί να μην υπάρχει κάποιο μόνιμο κανάλι διαθέσιμο για τους SUs. Μια κατανομημένη ομαδική συνεργατική λύση προτείνεται στο [24], όπου γειτονικοί κόμβοι που μοιράζονται κοινά κανάλια μπορεί να έχουν ένα κοινό, τοπικά, κανάλι ελέγχου. Ακόμα, τοπικά, μπορεί να επιλέγονται κοινά κανάλια ελέγχου για ένα πλήθος SUs, σύμφωνα με την ποιότητα των ανιχνεύσιμων «φασματικών τρυπών» και την επιλογή των γειτονικών χρηστών, όπως προτείνεται από το κατανομημένο σχήμα εκχώρησης καναλιού στο [25]. Στα περισσότερα δίκτυα CR προτείνεται ένα κοινό κανάλι ελέγχου (Common Control Channel-CCC) για το συντονισμό του διαμοιρασμού του φάσματος. Όμως, πιθανός κορεσμός του καναλιού θα επιφέρει υποβάθμιση του δικτύου. Έτσι, προτείνεται στο [26] ένα εναλλακτικό MAC πρωτόκολλο, χωρίς να απαιτεί ένα CCC στα πολλαπλών βημάτων δίκτυα CR, σύμφωνα με το οποίο χωρίζοντας το χρόνο σε σταθερά διαστήματα και έχοντας όλους τους χρήστες να ακούν σε ένα κανάλι στην αρχή της κάθε χρονοσχημής, εξασφαλίζει ότι τα σήματα ελέγχου μπορούν να ανταλλαχθούν μεταξύ των χρηστών. Μάλιστα, προσομοιώσεις δείχνουν πως το συγκεκριμένο πρωτόκολλο παρουσιάζει καλύτερες επιδόσεις από αυτό που βασίζεται στο κοινό κανάλι ελέγχου.

### 1.3.9 Ασφάλεια στα γνωστικά ραδιοσυστήματα

Λόγω των χαρακτηριστικών τους, όπως η απαίτηση για τη γνώση του περιβάλλοντος που ανήκουν και της εσωτερικής κατάστασής τους, η γνώση από τις παρατηρήσεις και την εμπειρία στην αναγνώριση των περιβαλλοντικών διακυμάνσεων, η προσαρμογή στο περιβάλλον και η συνεργασία με άλλους χρήστες/συσκευές για καλύτερη λειτουργία, τα γνωστικά ραδιοδίκτυα αντιμετωπίζουν μοναδικές προκλήσεις ως προς την ασφάλειά τους. Στο [27] μελετώνται η επίγνωση του spoofing (κοροϊδία) και ο αντίκτυπος σε διαφορετικές φάσεις του γνωστικού κύκλου. Μέσω του spoofing οι επιτιθέμενοι μπορούν να δημιουργήσουν ένα «ψεύτικο» περιβάλλον, να εισάγουν διαστρεβλώσεις ως προς τη λήψη αποφάσεων στο CR σύστημα και να χειριστούν τις κινήσεις των SUs. Στο [28] ερευνάται η επίθεση εξομοίωσης στον πρωτεύοντα χρήστη, όπου οι γνωστικοί επιτιθέμενοι μπορεί να μιμούνται το σήμα του πρωτεύοντος χρήστη, ώστε να εμποδίζουν τους SUs από την πρόσβαση στο αδειοδοτημένο φάσμα. Για να αντιμετωπιστεί αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί αμυντικός μηχανισμός που βασίζεται στον εντοπισμό. Αυτός επαληθεύει την πηγή του ανιχνευόμενου σήματος παρατηρώντας τα χαρακτηριστικά του και εκτιμώντας την τοποθεσία από την ενέργεια του λαμβανόμενου σήματος. Γενικά, ο πρωτεύων χρήστης παρατηρώντας, συνεχώς, την πρόσβαση των SUs στο φάσμα μπορεί να ανιχνεύσει τους κακόβουλους δευτερεύοντες χρήστες. Όμως η συνεχής παρακολούθηση προκαλεί επιπλέον φόρτο λόγω της μεγαλύτερης κατανάλωσης ενέργειας από τους PUs. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, αφού κακόβουλοι SUs μπορεί να χρησιμοποιούν το φάσμα παρανόμως μειώνοντας τον αριθμό των «φασματικών τρυπών» για τους νόμιμους SUs με αποτέλεσμα τη γενικότερη υποβάθμιση των επιδόσεων των SUs και PUs. Τρία παραδείγματα προβλημάτων ασφαλείας που σχετίζονται με το διαμοιρασμό του φάσματος είναι τα εξής:

- Στο πλαίσιο της λογικής ότι το σχήμα διαμοιρασμού του φάσματος χρησιμοποιεί τη θεωρία των δημοπρασιών, οι κακόβουλοι SUs προσπαθούν να χρησιμοποιήσουν τις

«φασματικές τρύπες» μέσω μιας ψεύτικης αύξησης των προσφορών τους προς τους PUs [29].

- Οι κακόβουλοι, νικητές της δημοπρασίας, SUs μπορεί να επικοινωνιάζουν περαιτέρω τα κανάλια τους στους ηττημένους νόμιμους SUs με χρηματικό όφελος [29].
- Οι κακόβουλοι SUs μπορεί να συνεννοούνται μεταξύ τους, ώστε κατά τη διάρκεια της δημοπρασίας να υποβάλουν χαμηλότερες προσφορές στους PUs με αποτέλεσμα τη μείωση του χρηματικού οφέλους των τελευταίων.[30]

Ακόμα μια μορφή επίθεσης που ερευνάται στο [31] είναι η παραποίηση στα δεδομένα που προέρχονται από την ανίχνευση του φάσματος. Για την ανακούφιση από την υποβάθμιση της επίδοσης λόγω του σφάλματος ανίχνευσης, προτείνεται η μετρική μιας διαδοχικής σταθμισμένης πιθανότητας ελέγχου. Τα ατομικά αποτελέσματα κάθε χρήστη συγκρίνονται με την τελική απόφαση. Οι χρήστες που τα αποτελέσματά τους ταυτίζονται με την τελική απόφαση συμμετέχουν με μεγαλύτερη βαρύτητα σε μια μελλοντική έκδοση απόφασης. Οι επιθέσεις προκαλούν αστοχίες στη διαχείριση του φάσματος όταν καλούνται οι SUs να παρεμβάλλουν με τους PUs, αστοχίες ως προς τον πομπό και το δέκτη, την τοποθεσία, τους αισθητήρες, ενώ επιθέσεις γίνονται και στο κοινό κανάλι ελέγχου[10].

### **1.3.10 Πιθανές εφαρμογές των γνωστικών ραδιοσυστημάτων**

Τα γνωστικά ραδιοσυστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ποικίλα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά σενάρια μερικά από τα οποία περιγράφονται παρακάτω:

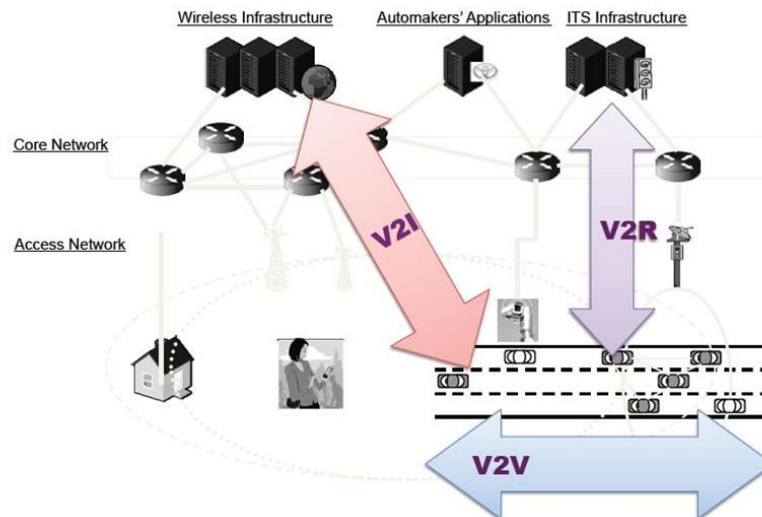
- Ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς: Τα γνωστικά ραδιοσυστήματα προσδοκείται να αποτελέσουν την τεχνολογία κλειδί για τα ετερογενή ασύρματα δίκτυα της επόμενης γενιάς. Αυτά παρέχουν την ευφυΐα στους εξοπλισμούς του χρήστη και του παρόχου, ώστε να διαχειριστούν την εναέρια διεπαφή και το δίκτυο, αποδοτικά. Στην πλευρά του χρήστη, μια κινητή συσκευή με πολλαπλές εναέριες διεπαφές, όπως για παράδειγμα WiFi, WiMAX, κυψελωτή κ.α, μπορεί να παρατηρήσει την κατάσταση ασύρματης πρόσβασης των δικτύων (ποιότητα μετάδοσης, ρυθμαπόδοση, καθυστέρηση και συμφόρηση) και να αποφασίσει με ποιό δίκτυο να συνδεθεί. Στην πλευρά του παρόχου, ο ραδιο-πόρος από πολλαπλά δίκτυα μπορεί να βελτιστοποιηθεί για ένα δεδομένο σύνολο κινούμενων χρηστών και τις απαιτήσεις τους ως προς την ποιότητα υπηρεσίας. Βασιζόμενοι στην κινητικότητα και τα μοτίβα τηλεπικοινωνιακής κίνησης των χρηστών, αποδοτικοί μηχανισμοί εξισορρόπησης φορτίου μπορούν να εφαρμοστούν στην υποδομή του παρόχου, ώστε να διανέμουν το τηλεπικοινωνιακό φορτίο μεταξύ των πολλαπλών δικτύων για να μειώσουν τη συμφόρηση του δικτύου.
- Συνύπαρξη διαφορετικών ασυρμάτων τεχνολογιών: Νέες ασύρματες τεχνολογίες, όπως το IEEE 802.22 - βασισμένο στα WRAN (Wireless Regional Area Networks) δίκτυα [17], αναπτύσσονται για την επαναχρησιμοποίηση του ραδιο-φάσματος που διανέμεται σε άλλες ασύρματες υπηρεσίες, όπως η υπηρεσία της τηλεόρασης. Τα γνωστικά ραδιοσυστήματα είναι μια λύση στη συνύπαρξη μεταξύ των διαφορετικών τεχνολογιών και των ασυρμάτων υπηρεσιών. Παραδείγματος χάρη, οι χρήστες του IEEE 802.22 - βασισμένου στα WRAN δίκτυα μπορούν ευκαιριακά να χρησιμοποιούν τη ζώνη των τηλεοπτικών συχνοτήτων, όταν δεν υπάρχει κάποιος χρήστης τηλεόρασης σε κοντινή απόσταση ή όταν δεν εκπέμπει κάποιος τηλεοπτικός σταθμός

[32]. Η ανίχνευση και η διαχείριση φάσματος είναι κρίσιμοι τομείς για το IEEE 802.22 - βασισμένο στη WRAN τεχνολογία, ώστε να αποφευχθεί η παρεμβολή στους χρήστες της τηλεόρασης και να μεγιστοποιηθεί η ρυθμαπόδοση των WRAN χρηστών.

- Υπηρεσίες υγείας: Διάφορες ασύρματες τεχνολογίες υιοθετούνται στις υπηρεσίες φροντίδας υγείας για να βελτιώσουν τη διαχείριση αυτής και τη φροντίδα των ασθενών. Όμως, η χρήση συσκευών ασυρμάτων επικοινωνιών στη φροντίδα της υγείας περιορίζεται από τις απαιτήσεις της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής (EMI) και της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC). Καθώς οι ιατρικοί εξοπλισμοί και οι αισθητήρες βιοσημάτων είναι ευαίσθητοι στην EMI, η μεταδιδόμενη ισχύς των ασυρμάτων συσκευών πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά. Επίσης, διαφορετικές βιοϊατρικές συσκευές, όπως χειρουργικός εξοπλισμός, συσκευές διάγνωσης και παρακολούθησης, μεταδίδουν στη ζώνη των ραδιοσυχνοτήτων. Η φασματική χρήση των συσκευών αυτών πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά ώστε να αποφεύγεται η μεταξύ τους παρεμβολή. Στην περίπτωση αυτή τα γνωστικά ραδιοσυστήματα μπορούν να εφαρμοστούν. Για παράδειγμα, πολλοί ασύρματοι ιατρικοί αισθητήρες σχεδιάζονται να λειτουργούν στην ISM (industrial, scientific, medical) ζώνη συχνοτήτων και χρησιμοποιούν γνωστικές μεθόδους για την επιλογή κατάλληλων ζωνών μετάδοσης ώστε να αποφευχθεί η παρεμβολή.
- Έξυπνα μεταφορικά συστήματα: Τα έξυπνα μεταφορικά συστήματα (Intelligent Transportation Systems-ITS) χρησιμοποιούν διάφορες ασύρματες τεχνολογίες για να βελτιώσουν την απόδοση και την ασφάλεια της μεταφοράς των οχημάτων. Δυο διαφορετικά είδη επικοινωνιακών σεναρίων σε ένα ITS σύστημα επικοινωνιών είναι η Vehicle-to-Roadside (V2R) επικοινωνία και η Vehicle-to-Vehicle (V2V) επικοινωνία. Στην Vehicle-to-Roadside επικοινωνία, η πληροφορία ανταλλάσσεται μεταξύ της μονάδας που βρίσκεται στην πλευρά του δρόμου (Roadside Unit-RSU) και της μονάδας που βρίσκεται πάνω στο όχημα (On Board Unit-OBU). Η RSU μπορεί να ανήκει σε προϋπάρχουσα δικτυακή υποδομή, όπως είναι τα ασύρματα σημεία πρόσβασης. Στην Vehicle-to-Vehicle επικοινωνία, μια ειδική μορφή ενός δικτύου χωρίς υποδομή (ad hoc), που ονομάζεται Vehicular Ad Hoc Network-VANET, εφαρμόζεται μεταξύ των οχημάτων για την ανταλλαγή πληροφορίας σχετικής με την ασφάλεια. Η υψηλή κινητικότητα των οχημάτων και οι γρήγορες μεταβολές στη τοπολογία του δικτύου θέτουν σημαντικές προκλήσεις στην επίτευξη αποδοτικών V2R και V2V επικοινωνιών. Η έννοια των γνωστικών ραδιοσυστημάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στα OBUs, όσο και στα RSUs, ώστε να προσαρμοστούν οι μεταδόσεις τους για να αντιμετωπίσουν τις γρήγορες μεταβολές του ραδιοπεριβάλλοντος[33]. Τα OBUs, με τις πολλαπλές ραδιο-δυνατότητές τους, θα είναι ικανά για προσαρμοστική επιλογή των ραδιο-συχνοτήτων, ώστε να επικοινωνούν με τα RSUs αποδοτικά.

Μια παραστατική απεικόνιση των ITS δίνεται στο Σχήμα 1.14.





Σχήμα 1.14: Αναπαράσταση ITS δικτύου

- Δίκτυα έκτακτης ανάγκης: Τα δίκτυα δημόσιας ασφαλείας και έκτακτης ανάγκης μπορούν να επωφεληθούν από την ύπαρξη των γνωστικών ραδιοσυστημάτων, ώστε να παρέχουν αξιόπιστη και ευέλικτη ασύρματη επικοινωνία. Παραδείγματος χάρη, σε ένα καταστροφικό σενάριο, μπορεί η κύρια υποδομή επικοινωνίας να μην είναι διαθέσιμη και ένα προσαρμοστικό ασύρματο επικοινωνιακό σύστημα (δίκτυο έκτακτης ανάγκης) να χρειάζεται να εγκατασταθεί, ώστε να βοηθήσει στην ανάκαμψη από την καταστροφή. Ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να είναι γνωστικό για να επιτρέψει την ασύρματη μετάδοση και λήψη σε ένα πλατύ εύρος του ραδιοφάσματος.
- Στρατιωτικά δίκτυα: Με το γνωστικό ραδιοσύστημα, οι ασύρματες επικοινωνιακές παράμετροι μπορούν να προσαρμοστούν δυναμικά βασιζόμενες στο χρόνο, την τοποθεσία και τις στρατιωτικές αποστολές. Για παράδειγμα, αν κάποιες συχνότητες είναι μπλοκαρισμένες ή θορυβώδεις, ο γνωστικός ραδιο-εκπομπός μπορεί να ψάξει και να έχει πρόσβαση σε εναλλακτικές ζώνες συχνοτήτων. Επιπλέον, το τοπικά-ενήμερο γνωστικό ραδιοσύστημα μπορεί να ελέγχει την εκπεμπόμενη κυματομορφή σε μια συγκεκριμένη περιοχή για να αποφευχθεί η παρεμβολή στα υψίστης προτεραιότητας στρατιωτικά επικοινωνιακά συστήματα [34].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΙΑ ΠΑΙΓΝΙΩΝ

### 2.1 Εισαγωγή

Στα γνωστικά ραδιοσυστήματα οι χρήστες είναι έξυπνοι και έχουν την ικανότητα να παρατηρούν, να μαθαίνουν και να δρουν προς βελτιστοποίηση της επίδοσής τους. Σε περίπτωση που ανήκουν σε διαφορετικές αρχές και επιδιώκουν διαφορετικούς στόχους, όπως η περίπτωση κατά την οποία ανταγωνίζονται για μια μη αδειοδοτημένη ελεύθερη μπάντα συχνοτήτων, οι πλήρως συνεργατικές συμπεριφορές δεν μπορούν να θεωρηθούν δεδομένες. Αντίθετα, οι χρήστες θα συνεργαστούν με άλλους μόνο αν η συνεργασία τους προσφέρει μεγαλύτερο όφελος από ότι θα είχαν στην περίπτωση μη συνεργασίας. Επιπλέον, το ραδιο-περιβάλλον μεταβάλλεται διαρκώς λόγω της φύσης των ασύρματων καναλιών, της κινητικότητας των χρηστών, της δυναμικής τοπολογίας και των μεταβολών στην τηλεπικοινωνιακή κίνηση. Στις κλασικές τεχνικές διαμοιρασμού φάσματος ακόμα και μια μικρή μεταβολή στο ραδιο-περιβάλλον μπορεί να οδηγήσει στην επανακατανομή των φασματικών πόρων, κάτι το οποίο καταλήγει σε μεγάλο επικοινωνιακό φορτίο. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι παραπάνω προκλήσεις, η θεωρία παιγνίων αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη, τη μοντελοποίηση και την ανάλυση των γνωστικών διαδραστικών διαδικασιών.

Η σημασία της μελέτης των γνωστικών ραδιο-δικτύων στο παιγνιο-θεωρητικό πλαίσιο είναι πολύπλευρη. Καταρχήν, μοντελοποιώντας το δυναμικό διαμοιρασμό του φάσματος μεταξύ των χρηστών (πρωτεύοντες και δευτερεύοντες χρήστες) σαν παίγνια, οι συμπεριφορές και οι δράσεις των χρηστών του δικτύου αποκτούν τη δομή του παιγνίου και οι θεωρητικές προσεγγίσεις της θεωρίας παιγνίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Δεύτερον, η βελτιστοποίηση στη χρήση του φάσματος είναι ένα πολυεπίπεδο πρόβλημα βελτιστοποίησης που είναι πολύ δύσκολο να αναλυθεί και να επιλυθεί. Η θεωρία παιγνίων παρέχει καλά ορισμένα κριτήρια ισορροπίας για τη βελτιστότητα ενός παιγνίου υπό διαφορετικές συνθήκες. Τέλος, η μη συνεργατική θεωρία παιγνίων, από τους πιο σημαντικούς κλάδους, βοηθά σε κατανεμημένες αποδοτικές προσεγγίσεις για το δυναμικό διαμοιρασμό φάσματος χρησιμοποιώντας μόνο τοπική πληροφόρηση. Τέτοιες προσεγγίσεις είναι επιθυμητές όταν ο κεντρικός έλεγχος δεν είναι διαθέσιμος ή είναι απαραίτητες ευέλικτες αυτοοργανωμένες προσεγγίσεις [10].

### 2.2 Ιστορική επισκόπηση

Η θεωρία παιγνίων είναι ένας κλάδος των εφαρμοσμένων μαθηματικών που ασχολείται με τη μελέτη καταστάσεων που περιλαμβάνουν κοινά ή αντικρουόμενα συμφέροντα. Ιδιαίτερα στοχεύει στη μαθηματική απεικόνιση της συμπεριφοράς σε στρατηγικές καταστάσεις όπου η επιτυχία κάθε ατόμου εξαρτάται από τις επιλογές άλλων ατόμων. Το πεδίο της θεωρίας παιγνίων γεννήθηκε μέσα από το βιβλίο των John von Neumann και Oscar Morgenstern, το 1944, το οποίο περιλάμβανε εκτός από τα θεμέλια αυτής και τη μέθοδο για την εύρεση αμοιβαία συμβατών λύσεων σε παίγνια μηδενικού αθροίσματος δυο ατόμων [35]. Στα τέλη της δεκαετίας του 1940-1950, εμφανίζεται η έννοια της συνεργατικής θεωρίας παιγνίων, η

οποία αναλύει τις βέλτιστες στρατηγικές ομάδων ατόμων υποθέτοντας ότι μπορούν να συνεργαστούν μεταξύ τους ώστε να βελτιώσουν από κοινού τις θέσεις τους στο παίγνιο. Στις αρχές τις δεκαετίας του 1950 ο J.Nash[36] ανέπτυξε ένα νέο κριτήριο, γνωστό ως ισορροπία Nash, για να χαρακτηρίσει τις αμοιβαία συνεπείς στρατηγικές των παικτών. Αυτή η προσέγγιση είναι πιο γενική από το κριτήριο που τέθηκε από τους Neumann και Morgestern, αφού εφαρμόζεται και σε παίγνια μη μηδενικού αθροίσματος και αποτελεί σημαντικό βήμα για τη διατύπωση της μη συνεργατικής θεωρίας παιγνίων [37], που οδήγησε στη βράβευση του Nash με Νόμπελ, το 1994.

Στη διάρκεια της δεκαετίας του 1950 αναπτύχθηκαν σημαντικές έννοιες της θεωρίας παιγνίων, όπως η έννοια του πυρήνα, τα παίγνια εκτεταμένης μορφής, τα επαναλαμβανόμενα παίγνια και η τιμή Sharpley. Στη δεκαετία του 1960 προτάθηκαν βελτιώσεις της ισορροπίας Nash και των εννοιών της πλήρους πληροφόρησης καθώς και των μεϋζιανών παιγνίων. Επιπλέον, την ίδια περίοδο αναπτύσσεται ένας νέος κλάδος που εστιάζει στην έννοια της λύσης για μια τάξη παιγνίων ιδιωτικής πληροφόρησης και είναι γνωστός ως θεωρία σχεδίασης μηχανισμών. Ακόμα, η θεωρία παιγνίων εισήχθη στη βιολογία μέσω των εξελικτικών παιγνίων από τον J.M. Smith στη δεκαετία του 1970, ενώ την ίδια περίοδο οι έννοιες της συσχετισμένης ισορροπίας και της κοινής γνώσης εισήχθησαν από τον R. Aumann[38]. Σήμερα, είναι ευρέως αναγνωρισμένη σαν ένα σημαντικό εργαλείο σε πολλά πεδία, όπως στις κοινωνικές επιστήμες, στη βιολογία, στις επιστήμες μηχανικών, στις πολιτικές επιστήμες, στις διεθνείς σχέσεις και στην επιστήμη των υπολογιστών για την κατανόηση της συνεργασίας και της σύγκρουσης μεταξύ των πρακτόρων.

### 2.3 Γενικά στοιχεία και βασικές αρχές της θεωρίας παιγνίων

Η θεωρία παιγνίων είναι ένα μαθηματικό εργαλείο που αναλύει τις στρατηγικές αντιδράσεις μεταξύ αυτών που λαμβάνουν αποφάσεις (παικτών). Αναλυτικότερα, κάθε παίκτης ρυθμίζει τη στρατηγική του ώστε να βελτιστοποιήσει τη χρησιμότητά του ενώ ανταγωνίζεται με τους άλλους παίκτες. Οι έννοιες της στρατηγικής, της χρησιμότητας και του παιγνίου μπορούν να οριστούν ως εξής:

- **Ορισμός 2.1:** **Στρατηγική**  $r$  είναι ένα ολοκληρωμένο σχέδιο, ή ένας κανόνας απόφασης, που καθορίζει τη δράση που θα επιλέξει ένας παίκτης σε κάθε διακριτή κατάσταση  $\Omega$ .
- **Ορισμός 2.2:** Σε ένα οποιοδήποτε παίγνιο, η **χρησιμότητα** (αποπληρωμή)  $u$  αντιπροσωπεύει τα κίνητρα των παικτών. Μια συνάρτηση χρησιμότητας για κάποιον παίκτη, αντιστοιχίζει έναν αριθμό σε κάθε ένα πιθανό αποτέλεσμα του παιγνίου, με την ιδιότητα ότι ένας υψηλότερος (ή χαμηλότερος) αριθμός καταδεικνύει ένα προτιμότερο αποτέλεσμα.
- **Ορισμός 2.3:** Ένα **παίγνιο**  $G$  σε στρατηγική μορφή έχει τρία στοιχεία: το σύνολο των παικτών  $i \in I$ , που είναι ένα πεπερασμένο σύνολο  $\{1, 2, \dots, N\}$ , το χώρο στρατηγικών  $\Omega_i$  για κάθε παίκτη  $i$  και τη συνάρτηση χρησιμότητας  $u_i$ , η οποία μετρά το αποτέλεσμα για τον  $i$ -οστό παίκτη για κάθε στρατηγική  $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_N)$ . Επιπλέον, ορίζουμε ως  $\mathbf{r}_{-i}$  τις στρατηγικές των αντιπάλων του παίκτη  $i$ , δηλαδή  $\mathbf{r}_{-i} = (r_1, \dots, r_{i-1}, r_{i+1}, \dots, r_N)$ .

Μια από τις κοινές υποθέσεις που γίνονται στη θεωρία παιγνίων είναι η υπόθεση των λογικών πρακτόρων. Δοθέντων των πολλαπλών ειδών λύσεων, των βελτιωμένων ισορροπιών Nash, που θα αναπτυχθούν στη συνέχεια, και της εμφανούς αυθαιρεσίας με την οποία εφαρμόζονται, είναι δύσκολο να πιστέψει κανείς ότι οι συγκεκριμένοι κανόνες θα εφαρμοστούν σε ένα πραγματικό μη συνεργατικό παίγνιο, αν οι παίκτες δε θεωρηθούν λογικοί. Ένας παίκτης θεωρείται λογικός αν δρα με συνέπεια για τη βελτίωση της ανταμοιβής του χωρίς να κάνει λάθη, έχει πλήρη γνώση για τα κίνητρα των υπολοίπων παικτών και τις δράσεις που είναι διαθέσιμες και έχει απεριόριστη ικανότητα στον, εκ των προτέρων, υπολογισμό όλων των βελτιώσεων των ισορροπιών Nash στην προσπάθειά του να βρει τη βέλτιστη. Αν ένα παίγνιο περιλαμβάνει μόνο λογικούς παίκτες καθένας από τους οποίους πιστεύει ότι όλοι οι υπόλοιποι παίκτες είναι λογικοί, τότε τα θεωρητικά αποτελέσματα προσφέρουν ακριβείς προβλέψεις για την έκβαση του παιγνίου[39].

### 2.3.1 Μορφές αναπαράστασης παιγνίων

Στη βιβλιογραφία συναντώνται κυρίως δύο μορφές αναπαράστασης των παιγνίων. Η πρώτη αναφέρεται στην αναπαράσταση σε εκτεταμένη και η δεύτερη σε κανονική μορφή, όπως αναλύονται στη συνέχεια.

#### Εκτεταμένη αναπαράσταση

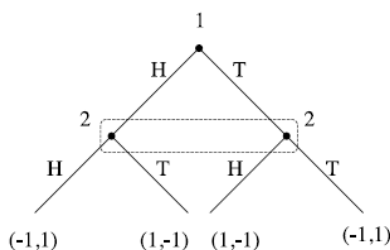
Η εκτεταμένη αναπαράσταση, γενικώς, περιλαμβάνει διάφορες δράσεις ή στάδια και κάθε παίκτης επιλέγει μια στρατηγική σε κάθε στάδιο. Η δομή πληροφόρησης του παιγνίου, (όπως πόση πληροφορία αποκαλύπτεται και σε ποιούς παίκτες), εκτιμώντας τα αποτελέσματα του παιγνίου και τις δράσεις των αντιπάλων σε προηγούμενα στάδια, επηρεάζει άμεσα την ανάλυση τέτοιων παιγνίων. Τα παίγνια εκτεταμένης αναπαράστασης απεικονίζονται συνήθως μέσω δενδρικού γράφου. Κάθε κόμβος, που ονομάζεται κόμβος απόφασης, απεικονίζει κάθε πιθανή κατάσταση της εξέλιξης του παιγνίου. Η διαδικασία ξεκινά από μια μοναδική αρχική κατάσταση και προχωρά μέσα στο δέντρο κατά μήκος ενός μονοπατιού που καθορίζεται από τους παίκτες μέχρι να φθάσει στον τελικό κόμβο, όπου το παίγνιο σταματά και τα κόστη εκχωρούνται σε όλους τους παίκτες. Κάθε μη τερματικός κόμβος ανήκει σε έναν παίκτη, αυτός επιλέγει μεταξύ όλων των πιθανών κινήσεων σε αυτόν τον κόμβο και κάθε πιθανή κίνηση είναι μια ακμή που οδηγεί από αυτόν τον κόμβο σε κάποιον άλλον. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ανάλυση των παιγνίων εκτεταμένης αναπαράστασης γίνεται πιο δύσκολη με τον αυξανόμενο αριθμό των παικτών και των σταδίων του παιγνίου. Παρακάτω δίνεται ορισμός για τα παίγνια αυτού του είδους.

- **Ορισμός 2.4:** Ένα παίγνιο  $G$   $m$ -παικτών σε εκτεταμένη μορφή ορίζεται σαν ένας δενδρικός γράφος από κορυφές (κόμβους) συνδεδεμένες με ακμές (αποφάσεις ή επιλογές) με ορισμένες ιδιότητες:
  1. Το παίγνιο  $G$  έχει μια συγκεκριμένη κορυφή που ονομάζεται αρχικό σημείο του παιγνίου.
  2. Μια συνάρτηση που καλείται συνάρτηση κόστους και εκχωρεί ένα  $m$ -διάστατο διάνυσμα (πλειάδα)  $J_1, \dots, J_m$  σε κάθε τερματική κορυφή (αποτέλεσμα) του παιγνίου  $G$ , όπου το  $J_i$  δείχνει το κόστος του  $i$ -οστού παίκτη,  $i = \{1, \dots, m\}$ .

3. Κάθε μη τερματική κορυφή του παιχνιδιού  $G$  διαμερίζεται σε  $m+1$  πιθανά σύνολα,  $S_0, S_1, \dots, S_m$  που καλούνται σύνολα των παικτών, όπου το  $S_0$  αναπαριστά την τυχαία επιλογή.
4. Κάθε κορυφή  $S_0$  έχει μια κατανομή πιθανότητας για τις ακμές που αναχωρούν από αυτή.
5. Οι κορυφές κάθε παίκτη  $S_i, i=1, \dots, m$  διαμερίζονται σε υποσύνολα γνωστά σαν σύνολα πληροφορίας,  $S_{i,j}$ , τέτοια ώστε δυο κορυφές στο ίδιο σύνολο πληροφορίας να έχουν τον ίδιο αριθμό άμεσων (επιλογές/ακμές) ακολούθων και καμία κορυφή δεν μπορεί να ακολουθήσει οποιαδήποτε άλλη κορυφή στο ίδιο σύνολο πληροφορίας.

Σαν συνέπεια του (5) ένας παίκτης γνωρίζει σε ποίο σύνολο πληροφορίας βρίσκεται, αλλά όχι σε ποια κορυφή του συνόλου[39].

**Παράδειγμα 2.1:** Εκτεταμένη μορφή του παιχνιδιού "Κορώνα-Γράμματα"



Σχήμα 2.1: Εκτεταμένη μορφή του παιχνιδιού "Κορώνα-Γράμματα"

Στο παιχνίδι «Κορώνα-Γράμματα» ο παίκτης 1 επιλέγει είτε κορώνα-Heads (H) είτε γράμματα-Tails (T) και ο παίκτης 2, μη γνωρίζοντας την επιλογή, επίσης επιλέγει μεταξύ H ή T. Αν ο παίκτης 2 κάνει την ίδια επιλογή με τον παίκτη 1 τότε κερδίζει 1 cent από αυτόν, δηλαδή +1 για τον παίκτη 2 και -1 για τον παίκτη 1, στην αντίθετη περίπτωση ο παίκτης 1 κερδίζει 1 cent από τον παίκτη 2, δηλαδή +1 για τον παίκτη 1 και -1 για τον παίκτη 2. Το δέντρο του παιχνιδιού δίνεται στο Σχήμα 2.1, με τα ζεύγη των αριθμών στους τερματικούς κόμβους να είναι οι συναρτήσεις κόστους, ενώ ο αριθμός κοντά στις κορυφές φανερώνει τον παίκτη στον οποίο ανήκει η κίνηση. Η διακεκομμένη περιοχή δείχνει τις κινήσεις που ανήκουν στο ίδιο σύνολο πληροφορίας. Δεδομένου ότι ο παίκτης 2 δεν έχει γνώση της επιλογής του αντιπάλου του, τη στιγμή που παίζει αυτός δεν γνωρίζει σε ποιόν κόμβο (κορυφή) βρίσκεται και έτσι είναι σαν οι δυο παίκτες να ενεργούν ταυτόχρονα[40].

**Κανονική αναπαράσταση**

- **Ορισμός 2.5:** Η **στρατηγική** (κανονική) μορφή είναι μια μητρική αναπαράσταση ενός ταυτόχρονου παιχνιδιού. Στην περίπτωση δυο παικτών, ο ένας είναι ο παίκτης «γραμμή» και ο άλλος ο παίκτης «στήλη». Κάθε γραμμή και στήλη αντιπροσωπεύει μια στρατηγική και κάθε κελί αντιπροσωπεύει την ανταμοιβή του κάθε παίκτη για οποιοδήποτε συνδυασμό στρατηγικών.
- **Ορισμός 2.6:** **Κυρίαρχες στρατηγικές:** Μια στρατηγική είναι κυρίαρχη αν, ανεξάρτητα από το τι κάνουν οι άλλοι παίκτες, με τη στρατηγική αυτή ένας παίκτης

έχει μεγαλύτερη ανταμοιβή από οποιαδήποτε άλλη. Έτσι, η κυρίαρχη στρατηγική είναι πάντα καλύτερη από κάθε άλλη, ανεξάρτητα από το τι κάνουν οι αντίπαλοι. Αν ένας παίκτης έχει μια κυρίαρχη στρατηγική θα την ακολουθήσει στην ισορροπία. Αντίθετα, αν μια στρατηγική είναι **κυριαρχούμενη** τότε δεν πρόκειται να «παιχτεί» στην ισορροπία[5].

Τα παίγνια σε κανονική μορφή (στρατηγική μορφή) μοντελοποιούν σενάρια στα οποία ένας ή περισσότεροι παίκτες πρέπει να πάρουν άμεσα και ταυτόχρονα μια απόφαση. Η κανονική μορφή είναι μια πιο συνοπτική μορφή παιγνίου, αποτελούμενη μόνο από την επιλογή των στρατηγικών των παικτών και είναι πιο εύχρηστη για μαθηματική ανάλυση. Το γεγονός πως όλοι οι παίκτες λαμβάνουν τις αποφάσεις ταυτόχρονα δεν αποτελεί χρονικό περιορισμό αλλά περιορισμό ως προς τη διαθέσιμη πληροφορία. Η πληροφορία ενός παιγνίου αποτελεί προδιαγραφή για το πόσα γνωρίζουν οι παίκτες τη στιγμή που επιλέγουν τη στρατηγική τους. Για παράδειγμα, στα παίγνια Stackelberg, που υπάρχουν αρχηγοί και ακόλουθοι, μερικοί παίκτες (ακόλουθοι) επιλέγουν τις στρατηγικές τους μόνο αφού αποκαλυφθούν οι στρατηγικές επιλογές των αρχηγών[41].

Για την περιγραφή ενός παιγνίου σε κανονική μορφή πρέπει να καθοριστούν οι χώροι των στρατηγικών των παικτών και οι συναρτήσεις κόστους. Ο χώρος των στρατηγικών για έναν παίκτη είναι το σύνολο των στρατηγικών που είναι διαθέσιμες σε αυτόν, όπου η στρατηγική είναι ένα ολοκληρωμένο σχέδιο δράσης για κάθε στάδιο του παιγνίου ανεξάρτητα αν τελικά προκύψει το στάδιο αυτό μέσα στο παίγνιο. Η συνάρτηση κόστους ενός παίκτη είναι η αντιστοίχιση του εξωτερικού γινομένου των στρατηγικών χώρων των παικτών στο σύνολο που περιλαμβάνει τα κόστη του κάθε παίκτη.

Για κάθε στρατηγική  $\mathbf{u} \in \Omega$ , όπου  $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_m) \in \Omega$  είναι μια m-πλειάδα των στρατηγικών των παικτών και  $\Omega = \Omega_1 \times \dots \times \Omega_m$  είναι ο συνολικός χώρος των στρατηγικών, ορίζουμε την  $J_i(\mathbf{u}) \in R$  ως το κόστος του i-οστού παίκτη που εξαρτάται από τις στρατηγικές των υπολοίπων παικτών. Το κόστος αυτό αναπαριστά τα έσοδα μιας εταιρείας ή τη χρησιμότητα του καταναλωτή. Όλοι αυτοί οι πραγματικοί αριθμοί  $J_i(\mathbf{u})$ ,  $i \in M$ , με  $M$  το σύνολο των παικτών, συνιστούν το συνδυασμένο στρατηγικό διάνυσμα των συναρτήσεων κόστους του παιγνίου,  $\mathbf{J} : \Omega \rightarrow R_m$ . Ένα παίγνιο σε κανονική μορφή  $G(M, \Omega_i, J_i)$  ορίζεται μέσω του καθορισμού των  $\Omega_i$  και  $J_i$ . Είναι πιθανό να υπολογίσουμε τις συναρτήσεις  $J_i$  για όλες τις πιθανές τιμές των  $u_1, \dots, u_m \in \Omega$  είτε σε μια σχέση (ευκολότερο για συνεχή ή άπειρα παίγνια όταν το  $\Omega$  αποτελεί ένα συνεχές σύνολο), είτε σαν ένας m-διάστατος πίνακας στην περίπτωση των πεπερασμένων παιγνίων (όταν το  $\Omega$  είναι ένα πεπερασμένο σύνολο)[39].

**Παράδειγμα 2.2 :**Κανονική μορφή του παιχνιδιού "Κορώνα-Γράμματα"

		player 2	
		H	T
player 1	H	(-1, 1)	(1, -1)
	T	(1, -1)	(-1, 1)

Πίνακας 2-1: Κανονική μορφή του παιχνιδιού "Κορώνα-Γράμματα"

Θεωρώντας το παιχνίδι «Κορώνα-Γράμματα» που περιγράφεται παραπάνω και στο οποίο κάθε παίκτης έχει δυο στρατηγικές κορώνα-Η ή γράμματα-Τ, η κανονική μορφή περιγράφεται στον Πίνακα 2-1 ή με τη μορφή μήτρας

$$M = \begin{pmatrix} (-1,1) & (1,-1) \\ (1,-1) & (-1,1) \end{pmatrix}$$

Τις περισσότερες φορές αντί για τη μήτρα M χρησιμοποιούνται ένα ζευγάρι μητρών (A,B) που φανερώνουν το αποτέλεσμα για κάθε παίκτη ξεχωριστά, μήτρα A για τον παίκτη 1 και μήτρα B για τον παίκτη 2. Έτσι, για το παραπάνω παιχνίδι έχουμε

$$A = \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$$

Οποιοδήποτε παίγνιο που βρίσκεται σε εκτεταμένη μορφή μπορεί να μετατραπεί σε κανονική μορφή.

**Παράδειγμα 2.3 :** Παίγνιο με κυρίαρχη στρατηγική

		<b>Player B</b>	
		Left	Right
<b>Player A</b>	Top	1, 2	0, 1
	Bottom	2, 1	1, 0

**Πίνακας 2-2:** Παίγνιο με κυρίαρχη στρατηγική

Υποθέτουμε πως δυο άνθρωποι παίζουν ένα απλό παιχνίδι. Ο παίκτης A γράφει σε ένα χαρτί μια από τις λέξεις «top» ή «bottom». Ταυτόχρονα ο παίκτης B ανεξάρτητα γράφει σε ένα χαρτί μια από τις λέξεις «left» ή «right». Αφού γίνει αυτό τα χαρτιά εξετάζονται και ο καθένας από τους παίκτες θα πάρει την ανταμοιβή που βρίσκεται στο αντίστοιχο κελί του Πίνακα 2-2. Έτσι, αν ο A γράψει «top» και ο B γράψει «left», τότε εξετάζεται η επάνω αριστερή γωνία του πίνακα. Στον πίνακα αυτόν η ανταμοιβή του A είναι η πρώτη είσοδος στο κελί, 1, και του B είναι η δεύτερη είσοδος, 2. Ο πίνακας του παιχνιδιού φανερώνει τις ανταμοιβές του κάθε παίκτη για κάθε συνδυασμό των στρατηγικών που έχει επιλέξει.

Από την οπτική γωνία του A, είναι πάντα καλύτερο να γράφει «bottom» αφού οι ανταμοιβές του (2 ή 1) είναι πάντα μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της επιλογής «top» (1 ή 0). Ομοίως είναι πάντα καλύτερο για τον B να γράφει «left» αφού 2 και 1 κυριαρχούν έναντι του 1 και 0. Επομένως η στρατηγική ισορροπίας είναι για μεν τον A να γράψει «bottom», για δε τον B να γράψει «left». Οι επιλογές αυτές κυριαρχούν των εναλλακτικών και υπάρχει ισορροπία στις κυρίαρχες στρατηγικές. Αν υπάρχει κυρίαρχη στρατηγική για κάθε παίκτη σε ένα παίγνιο, τότε μπορεί να προβλεφθεί πως στην τομή των κυρίαρχων στρατηγικών βρίσκεται η ισορροπία του παιγνίου[40].

**Παράδειγμα 2.4:** Το δίλημμα του φυλακισμένου

		Player B	
		Confess	Deny
Player A	Confess	-3, -3	0, -6
	Deny	-6, 0	-1, -1

Πίνακας 2-3: Το παίγνιο για το δίλημμα του φυλακισμένου

Ένα από τα πιο γνωστά παραδείγματα της θεωρίας παιγνίων είναι το δίλημμα του φυλακισμένου[42]. Δυο φυλακισμένοι, συνεργοί σε ένα έγκλημα, συλλαμβάνονται και ανακρίνονται σε ξεχωριστά δωμάτια. Καθένας από αυτούς έχει την επιλογή να ομολογήσει την πράξη του και έτσι να εμπλέξει τον άλλο ή να αρνηθεί τη συμμετοχή στο έγκλημα. Αν ένας μόνο φυλακισμένος ομολογήσει, τότε θα ελευθερωθεί και οι αρχές θα κατηγορήσουν τον συνεργό του τιμωρώντας τον με 6 μήνες φυλάκιση. Αν και οι δυο αρνηθούν τη συμμετοχή τους, τότε θα τιμωρηθούν με φυλάκιση 1 μηνός και αν και οι δυο ομολογήσουν θα τιμωρηθούν με φυλάκιση 3 μηνών. Ο Πίνακας 2-3 παρουσιάζει τις ανταμοιβές του παίγνιου. Οι είσοδοι στον πίνακα αντιπροσωπεύουν τις χρησιμότητες που εκχωρούνται ανάλογα με τις ποινές και για απλότητα παρουσιάζονται με αρνητικό πρόσημο τα χρονικά διαστήματα των ποινών τους.

Αν ο παίκτης B αποφασίσει να αρνηθεί τη συμμετοχή στο έγκλημα, τότε είναι καλύτερο για τον παίκτη A να ομολογήσει, αφού θα αφεθεί ελεύθερος. Επίσης, αν ο παίκτης B ομολογήσει, τότε θα πρέπει να ομολογήσει και ο παίκτης A, καθώς η ποινή θα είναι τρίμηνη αντί για εξάμηνη. Επομένως, ανεξάρτητα τι θα κάνει ο παίκτης B, ο παίκτης A είναι προτιμότερο να ομολογήσει. Το ίδιο συμβαίνει και για τον παίκτη B, είναι καλύτερο να ομολογήσει και αυτός. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα πως η ομολογία είναι η μοναδική ισορροπία Nash του παίγνιου. Η από κοινού ομολογία δεν αποτελεί μόνο ισορροπία Nash, αλλά και κυρίαρχη στρατηγική, αφού κάθε παίκτης έχει την ίδια βέλτιστη επιλογή ανεξαρτήτως από την επιλογή του άλλου παίκτη.

Αν εμπιστεύονταν ο ένας τον άλλον, ότι θα αρνηθεί το έγκλημα θα ήταν το καλύτερο αποτέλεσμα και για τους δυο, αφού η ανταμοιβή τους θα ήταν -1. Η στρατηγική (Άρνηση, Άρνηση) είναι αποδοτική κατά Pareto, καθώς δεν υπάρχει άλλη επιλογή που να είναι τόσο καλή και για τους δυο παίκτες, ενώ η στρατηγική (Ομολογία, Ομολογία) είναι μη αποδοτική κατά Pareto. Το πρόβλημα έγκειται στο ότι δεν υπάρχει τρόπος για να έρθουν σε συνεννόηση οι δυο κατηγορούμενοι.

### 2.3.2 Κατηγορίες παιγνίων

Πέρα από τις διαφορετικές μορφές αναπαράστασης, τα παίγνια χωρίζονται επίσης σε κατηγορίες, βάσει διαφόρων κριτηρίων. Μερικές βασικές κατηγορίες παιγνίων παρουσιάζονται παρακάτω.

#### 2.3.2.1 Συνεργατικά-Μη συνεργατικά παίγνια

Στα **συνεργατικά** παίγνια, θεωρείται ότι υπάρχει μια κεντρική αρχή η οποία διευθύνει το παίγνιο και κάθε χρήστης θεωρείται συνεργατικός. Αναλυτικότερα, θεωρείται ότι δεν υπάρχει ανταγωνισμός μεταξύ των παικτών στην ίδια ομάδα και αυτοί δρουν σαν μια μοναδική οντότητα για να μεγιστοποιήσουν τη συνολική χρησιμότητα της ομάδας. Μια λύση



του μοντέλου αυτού αποτελεί η Nash Bargaining Solution, η οποία χρησιμοποιείται για να διατυπώσει την αλληλεπίδραση μεταξύ των συνεργατικών παικτών, θεωρώντας ότι ένας παίκτης μπορεί να επηρεάσει τη δράση των άλλων παικτών και να εξασφαλίσει αποδοτικότητα και δικαιοσύνη μεταξύ αυτών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνεργατικών παιγνίων είναι τα παίγνια διαπραγμάτευσης και συμμαχίας[43].

Στα **μη συνεργατικά** παίγνια, κάθε χρήστης ενδιαφέρεται μόνο για το δικό του όφελος και επιλέγει τη βέλτιστη στρατηγική που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση ανταμοιβής του. Οι λογικοί χρήστες δεν είναι συνεργατικοί που σημαίνει ότι είναι εγωιστές ή ακόμη και κακόβουλοι. Έτσι, η στρατηγική που υιοθετείται από τους χρήστες εξαρτάται από τις προσωπικές τους προοπτικές, που σημαίνει ότι οι παίκτες έχουν διαφορετικά (συχνά συγκρουόμενα) συμφέροντα και δεν υπάρχει μια κεντρική αρχή. Μια γνωστή λύση του παιγνίου αυτού είναι η ισορροπία Nash[37][44].

### 2.3.2.2 Στοχαστικά παίγνια

Τα στοχαστικά παίγνια, που συχνά αναφέρονται και ως Μαρκοβιανά παίγνια, επινοήθηκαν στις αρχές της δεκαετίας 1950-1960 από τον Lloyd Shapley [45]. Τα παίγνια αυτά είναι δυναμικά, ανταγωνιστικά με πιθανοτικές μεταβάσεις από έναν ή περισσότερους παίκτες. Το παίγνιο αναπτύσσεται σε διαδοχικά στάδια. Στην αρχή κάθε σταδίου το παίγνιο είναι σε κάποια κατάσταση. Οι παίκτες επιλέγουν δράσεις και κάθε παίκτης λαμβάνει μια ανταμοιβή που εξαρτάται από την τρέχουσα κατάσταση και τις επιλεγμένες δράσεις. Το παίγνιο, κατόπιν, κινείται σε μια νέα τυχαία κατάσταση που η συνεισφορά της εξαρτάται από την προηγούμενη κατάσταση και τις δράσεις που επιλέγονται από τους παίκτες. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται στη νέα κατάσταση και το παίγνιο συνεχίζει για πεπερασμένο ή άπειρο αριθμό σταδίων. Η συνολική ανταμοιβή ενός παίκτη συχνά λαμβάνεται σαν το εκπτώτικό άθροισμα ή το κατώτερο όριο των μέσων τιμών των ανταμοιβών των σταδίων. Ακολουθεί ο ορισμός που δίνεται για τα στοχαστικά παίγνια.

- **Ορισμός 2.7:** Ένα στοχαστικό παίγνιο περιγράφεται από μια πλειάδα πέντε μερών  $\{N, S, \bar{A}, P, \vec{R}\}$  όπου
  1.  $N$  είναι ένα σύνολο παικτών με δείκτες  $1, 2, \dots, n$
  2.  $S$  είναι ένα σύνολο πιθανών καταστάσεων
  3.  $\bar{A}$  είναι ένας χώρος κοινής-δράσης που ορίζεται από το σύνολο  $A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$  όπου  $A_j$  είναι το σύνολο των δράσεων που είναι διαθέσιμο στον  $j$ -οστό παίκτη.
  4.  $P$  είναι μια πιθανοτική συνάρτηση μετάβασης, ένα στοιχείο της οποίας για τη δράση  $a$  ικανοποιεί τη συνθήκη  $\sum_{s \in S} p_{ss}^a = 1$  για όλα τα  $s \in S$  και  $a \in \bar{A}$
  5.  $\vec{R} = r_1 \times r_2 \times \dots \times r_n$ , όπου  $r_j$  είναι η ανταμοιβή για τον  $j$ -οστό παίκτη και η οποία είναι συνάρτηση των δράσεων όλων των παικτών.[46]

### 2.3.2.3 Στατικά παίγνια-Δυναμικά παίγνια

**Ορισμός 2.8:** Στατικό παίγνιο είναι αυτό στο οποίο όλοι οι παίκτες λαμβάνουν αποφάσεις (ή επιλέγουν στρατηγική) ταυτόχρονα, χωρίς τη γνώση των στρατηγικών που έχουν επιλεγεί

από τους υπόλοιπους παίκτες. Ακόμα και αν οι αποφάσεις ληφθούν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές το παίγνιο θεωρείται ταυτόχρονο, διότι οι παίκτες δεν έχουν πληροφορία για τις αποφάσεις των άλλων και έτσι οι αποφάσεις φαίνεται σαν να λαμβάνονται ταυτόχρονα.

Σε περίπτωση που το παίγνιο αλλάζει, όταν οι παίκτες αντιδρούν επαναληπτικά, τότε το παίγνιο αυτό καλείται **επαναλαμβανόμενο δυναμικό** παίγνιο και χαρακτηρίζεται από μια κατάσταση. Τα παίγνια αυτά καλούνται επίσης διαφορετικά παίγνια. Διαφορετικά από τα επαναλαμβανόμενα παίγνια στα οποία οι παίκτες παίζουν το ίδιο παίγνιο κάθε φορά, στα δυναμικά παίγνια η κατάσταση του παιγνίου επηρεάζει την εξέλιξη αυτού και το αποτέλεσμα του. Εν αντιθέσει με τα στατικά παίγνια, στα δυναμικά οι παίκτες μπορούν να αποκτήσουν χρήσιμες πληροφορίες από προηγούμενες στρατηγικές-κινήσεις που γίνονται κατά τη διεξαγωγή του παιγνίου και να τις λάβουν υπόψη τους στη διαμόρφωση των μελλοντικών δράσεών τους [39].

#### **2.3.2.4 Επαναλαμβανόμενα παίγνια**

Στα παίγνια αυτά οι παίκτες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους για πολλούς γύρους (παίζοντας το ίδιο παίγνιο). Σε αυτές τις περιπτώσεις οι παίκτες έχουν ευκαιρίες να προσαρμόσουν τις συμπεριφορές τους («να μάθουν») ώστε να προσπαθήσουν να γίνουν περισσότεροι επιτυχημένοι. Υπάρχουν επαναλαμβανόμενα παίγνια πεπερασμένου ορίζοντα, που το ίδιο παίγνιο επαναλαμβάνεται για σταθερό αριθμό φορών από τους ίδιους παίκτες, ή άπειρου ορίζοντα, στα οποία το παίγνιο επαναλαμβάνεται απεριόριστα.

#### **2.3.2.5 Παίγνια τέλει-ατελούς πληροφόρησης**

- **Ορισμός 2.9:** Ένα παίγνιο λέγεται **τέλειας πληροφόρησης** αν σε κάθε χρονική στιγμή, κάθε παίκτης γνωρίζει όλες τις δράσεις που έχουν κάνει μέχρι στιγμής οι υπόλοιποι παίκτες από την αρχή του παιγνίου, δηλαδή υπάρχει γνώση του ιστορικού του παιγνίου. Διαισθητικά, αν είναι η σειρά ενός παίκτη να κινηθεί, πάντα γνωρίζει ό,τι οποιοσδήποτε άλλος παίκτης έχει ολοκληρώσει μέχρι αυτό το σημείο.
- **Ορισμός 2.10:** Ένα παίγνιο λέγεται **ατελούς πληροφόρησης** αν ένας παίκτης δεν γνωρίζει ακριβώς ποιες δράσεις έχουν ακολουθηθεί από τους υπόλοιπους παίκτες μέχρι τη δεδομένη χρονική στιγμή. Τεχνικά, υπάρχει τουλάχιστον ένα πληροφοριακό σύνολο με περισσότερες από μια πιθανές εκδοχές. Διαισθητικά, αν είναι η σειρά ενός παίκτη να κινηθεί, ίσως να μη γνωρίζει τι έχει κάνει οποιοσδήποτε άλλος παίκτης μέχρι αυτό το σημείο. Έτσι, θα πρέπει να κινηθεί σύμφωνα με τις πιθανές δράσεις των υπολοίπων. [5]

#### **2.3.2.6 Παίγνια πλήρους-μη πλήρους πληροφόρησης**

- **Ορισμός 2.11:** Ένα παίγνιο ονομάζεται **πλήρους πληροφόρησης** αν όλες οι παράμετροι αυτού είναι γνωστές. Συγκεκριμένα, κάθε παίκτης είναι ενήμερος για τους υπόλοιπους παίκτες, το χρόνο του παιγνίου, το σύνολο των στρατηγικών και των ανταμοιβών (συναρτήσεις χρησιμότητας) για κάθε παίκτη.

Στα παίγνια μη **πλήρους πληροφόρησης**, που είναι γνωστά και ως μπεϋζιανά, οι παίκτες έχουν περιορισμένες γνώσεις για το παίγνιο[47].

### 2.3.2.7 Παίγνια δυναμικού (potential games)

Ένα παίγνιο θεωρείται παίγνιο δυναμικού, αν τα κίνητρα των παικτών να αλλάξουν τις στρατηγικές τους μπορούν να εκφραστούν με μια καθολική συνάρτηση, τη συνάρτηση δυναμικού. Η έννοια του δυναμικού παιγνίου προτάθηκε από τους Don Monderer και Lloyd Shapley [48]. Η συνάρτηση δυναμικού είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την ανάλυση των ιδιοτήτων ισορροπίας των παιγνίων αφού τα κίνητρα των παικτών αντιστοιχούν σε μια συνάρτηση και το σύνολο των καθαρών ισορροπιών Nash μπορούν να βρεθούν υπολογίζοντας απλά τα τοπικά βέλτιστα αυτής. Στη συνέχεια, δίνεται ο ορισμός του παιγνίου δυναμικού.

- **Ορισμός 2.12:** Ένα παίγνιο  $\langle N, (A_i), (u_i) \rangle$  (με  $N$  το σύνολο των παικτών,  $(A_i)$  το σύνολο των δράσεων για έναν παίκτη  $i$  και  $(u_i)$  τη συνάρτηση χρησιμότητας για έναν παίκτη  $i$ ) αποτελεί παίγνιο δυναμικού αν υπάρχει μια συνάρτηση δυναμικού  $P: A \rightarrow \mathbb{R}$  τέτοια ώστε να ικανοποιείται μια από τις παρακάτω συνθήκες. Το παίγνιο αποτελεί ένα ακριβές παίγνιο δυναμικού αν ισχύει η πρώτη συνθήκη και ένα σύνηθες παίγνιο δυναμικού αν ισχύει η δεύτερη συνθήκη:

1.  $P(\alpha_i, \alpha_{-i}) - P(\alpha'_i, \alpha_{-i}) = u_i(\alpha_i, \alpha_{-i}) - u_i(\alpha'_i, \alpha_{-i})$ , για κάθε  $i \in N$ ,  $a \in A$  και  $a'_i \in A_i$

2.  $\text{sgn}(P(\alpha_i, \alpha_{-i}) - P(\alpha'_i, \alpha_{-i})) = \text{sgn}(u_i(\alpha_i, \alpha_{-i}) - u_i(\alpha'_i, \alpha_{-i}))$ , για κάθε  $i \in N$ ,  $a \in A$  και  $a'_i \in A_i$

όπου  $\text{sgn}(\bullet)$  είναι η συνάρτηση προσήμου.

Από τον ορισμό είναι εύκολο να παρατηρηθεί ότι το ατομικό συμφέρον των παικτών ευθυγραμμίζεται με αυτό της ομάδας (συνάρτηση δυναμικού) και οποιοσδήποτε παίκτης που επιλέγει μια καλύτερη στρατηγική, ενώ δίνονται οι τρέχουσες στρατηγικές των άλλων παικτών, θα οδηγήσει σε βελτίωση της τιμής της συνάρτησης δυναμικού. Ένα παίγνιο δυναμικού στο οποίο όλοι οι παίκτες υιοθετούν καλύτερες στρατηγικές διαδοχικά, θα τερματιστεί σε πεπερασμένα βήματα σε ισορροπία Nash που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση δυναμικού.

Υπάρχουν διάφορες χρήσιμες συνθήκες που έχουν διατυπωθεί για τα παίγνια δυναμικού [48][49]. Στη συνέχεια, συνοψίζονται κάποιες βασικές συνθήκες, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποδείξουν αν ένα παίγνιο είναι δυναμικό ή ως οδηγός για το σχεδιασμό ενός δυναμικού παιγνίου.

Ένα παίγνιο  $\langle N, (A_i), (u_i) \rangle$  είναι ένα ακριβές παίγνιο δυναμικού με συνάρτηση δυναμικού  $P(\bullet)$ :

- Αν και μόνο αν

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial \alpha_i \partial \alpha_j} = \frac{\partial^2 u_j}{\partial \alpha_i \partial \alpha_j} \text{ για κάθε } i, j \in N \text{ (Εξίσωση 2.1)}$$

με την υπόθεση ότι το  $A_i$  είναι διάστημα πραγματικών αριθμών και το  $u_i$  είναι συνεχώς διαφορίσιμο για κάθε  $i \in N$ ,

- Αν και μόνο αν υπάρχουν συναρτήσεις  $P_0: A \rightarrow R$  και  $P_i: A_{-i} \rightarrow R$  ( $i \in N$ )

τέτοιες ώστε

$$u_i(\alpha_i, \alpha_{-i}) = P_0(\alpha_i, \alpha_{-i}) + P_i(\alpha_{-i}) \text{ (Εξίσωση 2.2)}$$

με  $P(\alpha_i, \alpha_{-i}) = P_0(\alpha_i, \alpha_{-i})$ ,

- Αν υπάρχουν συναρτήσεις  $P_{ij} : A_i \times A_j \rightarrow \mathbb{R}$  και  $P_i : A_i \rightarrow \mathbb{R}$  τέτοιες ώστε

$P_{ij}(\alpha_i, \alpha_j) = P_{ji}(\alpha_j, \alpha_i)$  και

$$u_i(a) = \sum_{j \in N \setminus \{i\}} P_{ij}(\alpha_i, \alpha_j) - P_i(\alpha_i) \text{ (Εξίσωση 2.3)}$$

για κάθε  $i, j \in N$  και  $a \in A$ .

Αυτό είναι γνωστό ως δίπλευρο συμμετρικό παίγνιο με

$$P(a) = \sum_{i \in N} \sum_{j=1}^{i-1} P_{ij}(\alpha_i, \alpha_j) - \sum_{i \in N} P_i(\alpha_i) \text{ (Εξίσωση 2.4)}$$

### 2.3.2.8 Παίγνια μηδενικού αθροίσματος

Τα παίγνια **μηδενικού αθροίσματος** είναι μια μαθηματική αναπαράσταση της κατάστασης στην οποία το κέρδος (ή απώλεια) στη χρησιμότητα ενός συμμετέχοντα είναι απόλυτα εξισορροπημένη από την απώλεια (ή κέρδος) στη χρησιμότητα του άλλου συμμετέχοντα. Αν τα συνολικά κέρδη των συμμετεχόντων προστεθούν και οι συνολικές απώλειες αφαιρεθούν τότε το άθροισμα θα είναι μηδενικό. Τα παίγνια μηδενικού αθροίσματος θεωρούνται παίγνια σταθερού αθροίσματος όπου τα συνολικά οφέλη και οι απώλειες αθροίζονται στη σταθερή μηδενική τιμή. Το κόσψιμο ενός κεϊκ είναι μηδενικό ή σταθερό άθροισμα διότι λαμβάνοντας ένα μεγαλύτερο κομμάτι μειώνεται η ποσότητα του κεϊκ που είναι διαθέσιμη για τους υπολοίπους. Αντίθετα, στο μη μηδενικό άθροισμα τα συνολικά κέρδη και απώλειες των αλληλεπιδρώντων μερών είναι λιγότερα ή περισσότερα από μηδέν και οι συμμετέχοντες μπορούν είτε όλοι μαζί να κερδίσουν, είτε να ζημιωθούν. Έτσι, η περίπτωση της ανταλλαγής μπανανών μιας χώρας που τις έχει σε περίσσεια με τα μήλα μιας άλλης χώρας μπορεί να οδηγήσει σε ωφέλεια και τις δυο χώρες και αποτελεί παίγνιο μη μηδενικού αθροίσματος.

Η ιδιότητα του μηδενικού αθροίσματος (αν κάποιος κερδίζει, κάποιος άλλος χάνει) σημαίνει ότι οποιοδήποτε αποτέλεσμα μιας κατάστασης μηδενικού αθροίσματος είναι βέλτιστο κατά Pareto. Γενικά οποιοδήποτε παίγνιο στο οποίο όλες οι στρατηγικές είναι βέλτιστες κατά Pareto αποτελεί παίγνιο σύγκρουσης.

Το 1944 οι John von Neumann και Oscar Morgenstern απέδειξαν ότι οποιοδήποτε παίγνιο μηδενικού αθροίσματος που περιλαμβάνει η παίκτες είναι στην πραγματικότητα μια γενικευμένη μορφή ενός παιγνίου μηδενικού αθροίσματος δυο παικτών και ότι οποιοδήποτε παίγνιο  $n$  παικτών μη μηδενικού αθροίσματος μπορεί να καταλήξει σε ένα παίγνιο μηδενικού αθροίσματος  $n+1$  παικτών, όπου ο  $n+1$  παίκτης αντιπροσωπεύει το ολικό κέρδος ή απώλεια.

**Παράδειγμα 2.5:** Το παιχνίδι «Κορώνα-Γράμματα» είναι μηδενικού αθροίσματος

Αν στον Πίνακα 2-1 προστεθούν οι ανταμοιβές σε κάθε κελί, βρίσκεται ότι  $1-1=0$  και έτσι πρόκειται για παίγνιο μηδενικού αθροίσματος. Ακόμα, μέσω των μητρών A και B που

παρουσιάστηκαν στο παράδειγμα 2.2 και επαναλαμβάνονται κάτωθι για ευκολία γίνεται φανερό πως για τα παίγνια μηδενικού αθροίσματος ισχύει ότι  $A=-B$ .

$$A = \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$$

### 2.3.2.9 Εξελικτικά παίγνια

Η εξελικτική θεωρία παιγνίων είναι η εφαρμογή της θεωρίας παιγνίων στον τρόπο εξέλιξης των ζώντων πληθυσμών στη βιολογία. Στο πεδίο αυτό, η θεωρία παιγνίων είναι χρήσιμη καθορίζοντας το πλαίσιο των στρατηγικών και αναλυτικών προσεγγίσεων, σύμφωνα με τις οποίες μπορεί να μοντελοποιηθεί ο ανταγωνισμός του Δαρβίνου. Αυτή εμφανίστηκε το 1973 στο πλαίσιο της τυποποίησης, από τους John Maynard Smith και George R. Price, του τρόπου με τον οποίο θα μπορούσαν να αναλυθούν ως «στρατηγικές» οι παραπάνω προσεγγίσεις και της ανάπτυξης μαθηματικών κριτηρίων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλέψουν το επικρατέστερο αποτέλεσμα τέτοιων ανταγωνιστικών στρατηγικών[50].

Η εξελικτική θεωρία παιγνίων παρέχει έναν καλό τρόπο για τη διαχείριση της στρατηγικής αβεβαιότητας που αντιμετωπίζει ένας παίκτης σε ένα παίγνιο λαμβάνοντας υπόψη την συμπεριφορά εκτός ισορροπίας, μαθαίνοντας μέσα από τις στρατηγικές αλληλεπιδράσεις και προσεγγίζοντας μια εύρωστη ισορροπία στρατηγικής. Μια τέτοια ισορροπία που υιοθετήθηκε ευρέως στην εξελικτική θεωρία παιγνίων είναι η εξελικτικά σταθερή στρατηγική (Evolutionary Stable Strategy-ESS) [51][52], η οποία είναι «μια στρατηγική τέτοια ώστε, αν όλα τα μέλη του πληθυσμού την υιοθετήσουν, τότε καμία μεταλλαγμένη στρατηγική δεν μπορεί να εισβάλλει στον πληθυσμό μέσω της επίδρασης της φυσικής επιλογής».

Στην εξελικτική θεωρία υπάρχει ο μηχανισμός της μετάλλαξης και της επιλογής. Ο πρώτος αναφέρεται στην τροποποίηση των χαρακτηριστικών των οντοτήτων με αποτέλεσμα την εισαγωγή οντοτήτων με νέα χαρακτηριστικά στον πληθυσμό και περιγράφεται μέσω της εξελικτικά σταθερής στρατηγικής. Ο μηχανισμός της επιλογής εφαρμόζεται για να παραμείνουν οι οντότητες που προσαρμόζονται στο περιβάλλον, δηλαδή αυτές με τα καλύτερα χαρακτηριστικά και να εξαλειφθούν οι υπόλοιπες, ενώ περιγράφεται μέσω της δυναμικής της αντιγραφής (replicator dynamics), που είναι ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων.

Η ισορροπία Nash επινοήθηκε για υπολογιστικά, λογικά όντα, καθένα από τα οποία προσπαθεί να επιλέξει μια κατάλληλη στρατηγική ανάλογα με τη βελτιστη στρατηγική που θα επιλέξουν οι υπόλοιποι. Η ESS σχεδιάστηκε για να μοντελοποιήσει τη συμπεριφορά των ζώων κάτω από τις εξελικτικές δυνάμεις, όπου οι στρατηγικές που είναι περισσότερο κατάλληλες αναπαράγονται ταχύτερα. Αλλά η ESS ισορροπία είναι και ισορροπία Nash, παρέχοντας ένα ακόμα επιχειρήμα στο γιατί η έννοια αυτή είναι τόσο σημαντική στη θεωρία παιγνίων[40].

## 2.4 Σημαντικά στοιχεία της μη συνεργατικής θεωρίας παιγνίων

### 2.4.1 Είδη λύσεων

Δοθείσης της προδιαγραφής ενός παιγνίου, ένα σημαντικό ζήτημα αποτελεί η πρόβλεψη του πώς θα παιχτεί το παίγνιο, δηλαδή ο καθορισμός του εξαγόμενου αποτελέσματός του. Αυτή η πρόβλεψη ονομάζεται λύση και περιγράφει ποιες στρατηγικές θα υιοθετηθούν από τους παίκτες, προβλέποντας έτσι το αποτέλεσμα του παιγνίου. Μια λύση περιγράφει, συντόμως, πώς θα χρησιμοποιηθεί ένα ορισμένο σύνολο μαθηματικών κανόνων για να αποφασιστεί πώς θα παιχτεί το παίγνιο. Πολλές λύσεις έχουν προταθεί για να καταδείξουν/προβλέψουν τη συμπεριφορά των παικτών στη διάρκεια του παιγνίου.

#### 2.4.1.1 Λύσεις ελαχίστου-μεγίστου

Μια από τις βασικότερες ιδιότητες ενός παιγνίου είναι η λύση ελαχίστου-μεγίστου, που ονομάζεται επίσης στρατηγική ελαχίστου-μεγίστου ή στρατηγική ασφαλείας. Αυτή είναι η στρατηγική εκείνη που ελαχιστοποιεί τη μέγιστη προσδοκώμενη απώλεια (κόστος) ενός παίκτη. Ακόμα, αντί για την ελαχιστοποίηση του μέγιστου προσδοκώμενου κόστους, μπορεί να γίνει η μεγιστοποίηση της ελάχιστης προσδοκώμενης ανταμοιβής. Αυτή η προσέγγιση ονομάζεται λύση μεγίστου-ελαχίστου. Οι όροι λύση ελαχίστου-μεγίστου και λύση μεγίστου-ελαχίστου μπορούν να χρησιμοποιηθούν αδιακρίτως. Η λύση ελαχίστου-μεγίστου είναι σημαντική έννοια στα παίγνια μηδενικού αθροίσματος[53].

- **Ορισμός 2.13:** Η ελάχιστη-μέγιστη ανταμοιβή του παίκτη  $i$  σε ένα στρατηγικό παίγνιο  $\langle N, (A_i), (u_i) \rangle$  (με  $N$  το σύνολο των παικτών,  $(A_i)$  το σύνολο των δράσεων για έναν παίκτη  $i$  και  $(u_i)$  τη συνάρτηση χρησιμότητας για έναν παίκτη  $i$ ) είναι

$$\min_{\alpha_{-i} \in A_{-i}} \max_{\alpha_i \in A_i} u_i(\alpha_i, \alpha_{-i}) \text{ (Εξίσωση 2.5)}$$

Η ελάχιστη-μέγιστη ανταμοιβή είναι η μικρότερη ανταμοιβή στην οποία οι άλλοι παίκτες μπορούν να οδηγήσουν τον παίκτη  $i$  και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν απειλή για τιμωρία. Μια άλλη απειλή είναι η επιλογή της ισορροπίας Nash σαν τιμωρία. Είναι γνωστό ότι η ισορροπία Nash δίνει τουλάχιστον την ελάχιστη-μέγιστη ανταμοιβή σε κάθε παίκτη, έτσι η απειλή Nash είναι πιο αδύναμη από την απειλή ελαχίστου-μεγίστου.

**Παράδειγμα 2.7:** Εύρεση *minimax* στρατηγικών και τιμές ανταμοιβών

Παίκτης 2		
Παίκτης 1	A (Πιθανότητα q)	B (Πιθανότητα 1-q)
A (Πιθανότητα p)	(5,3)	(2,6)
B (Πιθανότητα 1-p)	(3,2)	(4,5)

Πίνακας 2-4: Το προς εξέταση παίγνιο

### Στρατηγική ελαχίστου-μεγίστου για τον παίκτη 1

Με την υπόθεση ότι ο παίκτης 1 ακολουθεί τη δράση A με πιθανότητα  $p$  και ο παίκτης 2 την δράση A με πιθανότητα  $q$ , η προσδοκώμενη ανταμοιβή για τον παίκτη 1 δίνεται από την (Εξίσωση 2.6)

$$R_1(p, q) = 5pq + 2p(1-q) + 3(1-p)q + 4(1-p)(1-q) = 4pq - 2p - q + 4 \quad (\text{Εξίσωση 2.6})$$

Ο παίκτης 1 υποθέτει ότι ο παίκτης 2 επιθυμεί να ελαχιστοποιήσει την ανταμοιβή του. Για να καθοριστεί ποια στρατηγική του παίκτη 2 ελαχιστοποιεί την ανταμοιβή του παίκτη 1 υπολογίζεται η  $\frac{\partial R_1(p, q)}{\partial q}$ , δηλαδή το ποσοστό της μεταβολής της προσδοκώμενης ανταμοιβής του παίκτη 1 ως προς τη στρατηγική που ακολουθεί ο παίκτης 2.

$$\frac{\partial R_1(p, q)}{\partial q} = 4p - 1 \quad (\text{Εξίσωση 2.7})$$

Υπάρχουν τρεις πιθανότητες:

- $\frac{\partial R_1(p, q)}{\partial q} > 0$  για όλα τα  $p \in [0, 1]$ . Στην περίπτωση αυτή για να ελαχιστοποιηθεί η ανταμοιβή του παίκτη 1, ο παίκτης 2 πρέπει να παίξει  $q = 0$ , δηλαδή να ακολουθήσει τη δεύτερη δράση. Η στρατηγική ελαχίστου-μεγίστου για τον παίκτη 1 θα είναι να ακολουθήσει τη δράση που μεγιστοποιεί την ανταμοιβή του όταν ο παίκτης 2 ακολουθεί τη δράση B.
- $\frac{\partial R_1(p, q)}{\partial q} < 0$  για όλα τα  $p \in [0, 1]$ . Στην περίπτωση αυτή για να ελαχιστοποιηθεί η ανταμοιβή του παίκτη 1, ο παίκτης 2 πρέπει να παίξει  $q = 1$ , δηλαδή να ακολουθήσει την πρώτη δράση. Η στρατηγική ελαχίστου-μεγίστου για τον παίκτη 1 θα είναι να ακολουθήσει τη δράση που μεγιστοποιεί την ανταμοιβή του όταν ο παίκτης 2 ακολουθεί τη δράση A.
- Υπάρχουν μερικά  $p \in [0, 1]$  τέτοια ώστε  $\frac{\partial R_1(p, q)}{\partial q} = 0$ . Όταν ο παίκτης 1 χρησιμοποιεί τη στρατηγική αυτή η προσδοκώμενη ανταμοιβή του δεν εξαρτάται από τη στρατηγική που ακολουθείται από τον παίκτη 2.

$$\frac{\partial R_1(p, q)}{\partial q} = 0 \Rightarrow p = \frac{1}{4} \quad (\text{Εξίσωση 2.8})$$

Έτσι προκύπτει ότι

$$R_1\left(\frac{1}{4}, q\right) = -2p + 4 = 3.5 \quad (\text{Εξίσωση 2.9})$$

Επομένως η στρατηγική μέγιστου-ελαχίστου του παίκτη 1 είναι να ακολουθήσει τη δράση A με πιθανότητα 0.25 και η εγγυημένη ανταμοιβή του είναι 3.5.

Πρέπει να επισημανθεί ότι αν ο παίκτης 1 επιλέξει  $p > \frac{1}{4}$  τότε  $\frac{\partial R_1(p, q)}{\partial q} > 0$  και όπως

διαπιστώθηκε ο παίκτης 2, για να ελαχιστοποιήσει την ανταμοιβή του παίκτη 1, θα ακολουθήσει τη δράση B με  $q = 0$ . Στην περίπτωση αυτή η ανταμοιβή του παίκτη 1 είναι

$$R_1(p, 0) = -2p + 4 < 3.5 \text{ (Εξίσωση 2.10)}$$

Πρέπει να επισημανθεί ότι αν ο παίκτης 1 επιλέξει  $p < \frac{1}{4}$  τότε  $\frac{\partial R_1(p, q)}{\partial q} < 0$  και όπως

διαπιστώθηκε ο παίκτης 2, για να ελαχιστοποιήσει την ανταμοιβή του παίκτη 1, θα ακολουθήσει τη δράση A με  $q = 1$ . Στην περίπτωση αυτή η ανταμοιβή του παίκτη 1 είναι

$$R_1(p, 1) = 2p + 3 < 3.5 \text{ (Εξίσωση 2.11)}$$

Από τα παραπάνω γίνεται εμφανές ότι το 3.5 είναι η μέγιστη προσδοκώμενη ανταμοιβή για τον παίκτη 1.

### Στρατηγική ελαχίστου-μεγίστου για τον παίκτη 2

Με παρόμοιο τρόπο για τον παίκτη 2 έχουμε για τη συνάρτηση ανταμοιβής του

$$R_2(p, q) = 3pq + 6p(1-q) + 2(1-p)q + 5(1-p)(1-q) = p - 3q + 5 \text{ (Εξίσωση 2.12)}$$

$$\text{Προκύπτει ότι } \frac{\partial R_2(p, q)}{\partial p} = 1 > 0 \text{ (Εξίσωση 2.13)}$$

Συνάγεται ότι ο παίκτης 1 πάντα ελαχιστοποιεί την προσδοκώμενη ανταμοιβή του παίκτη 2 παίζοντας τη δράση B, δηλαδή  $p = 0$ . Αν ο παίκτης 1 ακολουθεί τη δράση B, τότε και ο παίκτης 2 θα την ακολουθήσει αφού θα έχει ανταμοιβή ίση με 5. Υποθέτοντας ότι οι δυο παίκτες χρησιμοποιούν τις στρατηγικές μεγίστου-ελαχίστου, δηλαδή ο παίκτης 1 ακολουθεί τη δράση A με πιθανότητα  $p=0.25$  και ο παίκτης 2 ακολουθεί πάντα τη δράση B, δηλαδή  $q=0$ , προκύπτουν οι εξής ανταμοιβές για τους δυο παίκτες:

$$R_1(0.25A + 0.75B, B) = 0.25 \times 2 + 0.75 \times 4 = 3.5$$

$$R_2(0.25A + 0.75B, B) = 0.25 \times 6 + 0.75 \times 5 = 5.25$$

Παρατηρείται, λοιπόν, ότι η ανταμοιβή του παίκτη 2 είναι μεγαλύτερη από την ανταμοιβή που προέκυψε μέσω της στρατηγικής μεγίστου-ελαχίστου. Γενικά, αν η στρατηγική μεγίστου-ελαχίστου ενός παίκτη είναι καθαρή στρατηγική, τότε στην περίπτωση που και οι δυο παίκτες παίζουν τις στρατηγικές μεγίστου-ελαχίστου, ο παίκτης αυτός θα αποκτήσει μια μεγαλύτερη προσδοκώμενη ανταμοιβή από αυτή που προκύπτει στη στρατηγική μεγίστου-ελαχίστου.

#### **2.4.1.2 Ισορροπία Nash**

Η έννοια της ισορροπίας Nash είναι από τις πιο διαδεδομένες έννοιες στα μη συνεργατικά παίγνια  $N$  παικτών και ίσως αποτελεί και τη μεγαλύτερη συνεισφορά στη θεωρία παιγνίων. Στην ισορροπία αυτή κανένας από τους παίκτες δεν επιθυμεί τη μονομερή απόκλιση από την τρέχουσα στρατηγική του. Δηλαδή αν αλλάξει στρατηγική μόνο ένας από τους παίκτες, η



αλλαγή αυτή θα οδηγήσει στη μικρότερη ανταμοιβή του παίκτη αυτού σε σύγκριση με την ανταμοιβή που του προσφέρει η τρέχουσα στρατηγική του. Από μια άλλη οπτική γωνία, αν κάθε παίκτης παίζει τη βέλτιστη απόκρισή του ως προς τις στρατηγικές των άλλων παικτών, τότε γίνεται λόγος για ισορροπία Nash.

- **Ορισμός 2.14:** Η **ισορροπία Nash** σε ένα στρατηγικό παίγνιο  $\langle N, (A_i), (u_i) \rangle$  (με  $N$  το σύνολο των παικτών,  $(A_i)$  το σύνολο των δράσεων για έναν παίκτη  $i$  και  $(u_i)$  τη συνάρτηση χρησιμότητας για έναν παίκτη  $i$ ) είναι ένα προφίλ στρατηγικών  $\alpha^* \in A$ , τέτοιων ώστε για κάθε παίκτη  $i \in N$  να ισχύει

$$u_i(\alpha_i^*, \alpha_{-i}^*) \geq u_i(\alpha_i, \alpha_{-i}^*) \quad (\text{Εξίσωση 2.14})$$

Για κάθε  $\alpha_i \in A_i$  με το  $\alpha_i$  να δηλώνει τη στρατηγική του  $i$ -οστού παίκτη και  $\alpha_{-i}$  να δηλώνει τις στρατηγικές όλων των υπολοίπων παικτών.

Έτσι, δεδομένων των στρατηγικών των άλλων παικτών, κανένας παίκτης δεν μπορεί να αυξήσει τη χρησιμότητά του αλλάζοντας μόνο τη δική του στρατηγική [54][55][36]. Βάσει του θεωρήματος σταθερού σημείου, που στην πιο απλή μορφή είναι ένα σημείο  $x$  για το οποίο  $F(x)=x$ , αποδεικνύεται το παρακάτω θεώρημα[56]:

**Θεώρημα 2.1:** Ένα στρατηγικό παίγνιο  $\langle N, (A_i), (u_i) \rangle$  έχει μια ισορροπία Nash, αν για κάθε  $i \in N$ , το σύνολο δράσης  $(A_i)$  του παίκτη  $i$  είναι ένα μη κενό συμπαγές κυρτό υποσύνολο του ευκλείδειου χώρου και η συνάρτηση ανταμοιβής  $u_i$  είναι συνεχής και ημι-κοίλη στο  $(A_i)$

**Παράδειγμα 2.8:** Παίγνια με και χωρίς ισορροπία Nash

		Player B	
		Left	Right
Player A	Top	2, 1	0, 0
	Bottom	0, 0	1, 2

		Player B	
		Left	Right
Player A	Top	0, 0	0, -1
	Bottom	1, 0	-1, 3

Πίνακας 2-5: α) Παίγνιο με ισορροπία Nash και β) Παίγνιο χωρίς ισορροπία Nash

Σε περίπτωση που οι στρατηγικές είναι κυρίαρχες, τα σημεία ισορροπίας (αν υπάρχουν) είναι ιδανικά, αλλά αυτό δεν γίνεται συχνά. Στον Πίνακα 2-5 (α) παρατηρείται ένα παίγνιο που δεν έχει ισορροπία κυρίαρχης στρατηγικής. Όταν ο B επιλέγει «left», οι ανταμοιβές για τον A είναι 2 ή 0. Όταν ο B επιλέγει «right», οι ανταμοιβές του A είναι 0 ή 1. Αυτό σημαίνει ότι όταν ο B επιλέξει «left», ο A θα προτιμήσει το «top» και όταν ο B επιλέξει «right», ο A θα προτιμήσει το «bottom». Έτσι, η βέλτιστη επιλογή του A εξαρτάται από το τι πιστεύει πως θα κάνει ο B.

Ένα ζεύγος στρατηγικών αποτελεί ισορροπία Nash αν η επιλογή του A είναι βέλτιστη, δοθείσας της επιλογής του B και η επιλογή του B είναι βέλτιστη δοθείσας της επιλογής του A. Κανένας παίκτης δεν γνωρίζει την επιλογή της στρατηγικής του άλλου παίκτη, αλλά έχει κάποιες προσδοκίες για το ποια μπορεί να είναι η επιλογή του άλλου παίκτη. Επομένως, η ισορροπία Nash είναι ένα ζεύγος προσδοκιών για την επιλογή κάθε παίκτη τέτοιο ώστε όταν

αποκαλυφθεί η ατομική επιλογή κανέναν από τους παίκτες να μη θέλει να αλλάξει στρατηγική.

Στο δεδομένο παίγνιο, η στρατηγική («top», «left») αποτελεί μια ισορροπία Nash. Αν ο A επιλέξει «top», τότε η βέλτιστη επιλογή για τον B είναι να επιλέξει «left», αφού οι ανταμοιβές του θα είναι 1 για το «left» και 0 για το «right». Αν ο B επιλέξει «left», οι ανταμοιβές για τον A είναι 2 ή 0 και έτσι τον συμφέρει να επιλέξει «top». Επομένως, αν ο A επιλέξει «top», τότε η βέλτιστη επιλογή για τον B είναι το «left» και αν ο B επιλέξει «left», η βέλτιστη επιλογή για τον A είναι το «top». Έτσι, υπάρχει ισορροπία Nash, αφού κάθε παίκτης κάνει τη βέλτιστη επιλογή, δοθείσας της επιλογής του άλλου παίκτη.

Επίσης ισορροπία Nash αποτελεί το ζεύγος («bottom», «right»), ακολουθώντας παρόμοια λογική με παραπάνω ή απλώς παρατηρώντας ότι το παίγνιο είναι **συμμετρικό**, δηλαδή οι ανταμοιβές του B σε μια έκβαση είναι ίδιες με αυτές του A στην άλλη έκβαση.

	<i>E</i>	<i>F</i>
<i>E</i>	a, a	b, c
<i>F</i>	c, b	d, d

Πίνακας 2-6: Ορισμός συμμετρικού παιγνίου

Στον Πίνακα 2-5 (β) παρατηρείται ένα παίγνιο που δεν έχει ισορροπία Nash. Αν ο παίκτης A παίζει «top», τότε ο παίκτης B παίζει «left». Αλλά αν ο παίκτης B παίζει «left», τότε ο παίκτης A παίζει «bottom». Όμοια, αν ο παίκτης A παίζει «bottom», τότε ο παίκτης B παίζει «right». Αλλά αν παίκτης B παίζει «right», τότε ο A παίζει «top». Άρα το παίγνιο δεν καταλήγει σε ισορροπία Nash[40].

### 2.4.1.3 Βέλτιστη απόκριση

Ένα άλλο είδος λύσης στα παίγνια πολλαπλών παικτών είναι να επιλεχτεί η στρατηγική που οδηγεί σε ελάχιστο κόστος δοθέντων των στρατηγικών των αντιπάλων. Αυτή ακριβώς είναι η έννοια της βέλτιστης απόκρισης. Μαθηματικά μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$\alpha_i^* \in B_i(\alpha_{-i}^*) \text{ για κάθε } i \in N \text{ (Εξίσωση 2.15)}$$

με τη συνάρτηση  $B_i$  να ονομάζεται συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης για τον παίκτη  $i$  και δεδομένου του προφίλ στρατηγικών  $\alpha_{-i}$  αυτή η συνάρτηση είναι το σύνολο των στρατηγικών του παίκτη  $i$  για το οποίο ισχύει:

$$B_i(\alpha_{-i}) = \{\alpha_i \in A_i : u_i(\alpha_{-i}, \alpha_i) \geq u_i(\alpha_{-i}, \alpha_i')\} \quad \forall \alpha_i' \in A_i \text{ (Εξίσωση 2.16)}$$

Η ιδέα της βέλτιστης απόκρισης έχει τεράστια επίδραση στους αλγορίθμους εκμάθησης. Αν ένας παίκτης γνωρίζει τη στρατηγική που θα ακολουθήσουν οι υπόλοιποι, γιατί να μην ακολουθήσει το ελάχιστο κόστος ή τη μέγιστη απολαβή που μπορεί να έχει, δηλαδή να ακολουθήσει τη βέλτιστη απόκριση. Το ένα πρόβλημα είναι πως ο παίκτης θεωρεί ότι ξέρει τι θα κάνουν οι υπόλοιποι ενώ η πραγματικότητα μπορεί να είναι διαφορετική και μπορεί να εκτεθεί σε κινδύνους. Το δεύτερο πρόβλημα είναι ότι η προσέγγιση της «βέλτιστης απόκρισης» μπορεί να είναι αρκετά μη παραγωγική στα επαναλαμβανόμενα παίγνια όταν ταυτόχρονα και οι υπόλοιποι παίκτες μαθαίνουν και προσαρμόζονται[57].

#### 2.4.1.4 Βελτιστοποίηση κατά Pareto

Όταν υπάρχουν περισσότερα από ένα σημεία ισορροπίας σε ένα παίγνιο είναι φυσικό να εξεταστεί αν κάποια έχουν καλύτερες επιδόσεις από άλλα και αν τελικά υπάρχει κάποιο βέλτιστο. Καθώς η θεωρία παιγνίων επιλύει προβλήματα βελτιστοποίησης πολλών αντικειμενικών συναρτήσεων, δεν είναι εύκολο να καθοριστεί η βελτιστότητα. Για να καθοριστεί η βελτιστότητα, μια εκδοχή είναι να συγκριθεί το άθροισμα με βάρη των ατομικών ανταμοιβών που μειώνει το πολυδιαστατικό πρόβλημα σε πρόβλημα μιας διάστασης. Μια πιο δημοφιλής εναλλακτική είναι η βελτιστοποίηση κατά Pareto στην οποία κανένας παίκτης δεν μπορεί να βελτιώσει την ανταμοιβή του (ή να μειώσει το κόστος του), χωρίς να οδηγήσει σε χειρότερη κατάσταση κάποιον άλλο παίκτη.

Η θεωρία του βέλτιστου κατά Pareto πήρε το όνομά της από τον Vilfredo Pareto ο οποίος τη διατύπωσε και αποτελεί ένα μέτρο της αποδοτικότητας. Το αποτέλεσμα του παιγνίου θεωρείται βέλτιστο κατά Pareto όταν δεν υπάρχει άλλη έκβαση που να καθιστά κάθε παίκτη το ίδιο ικανοποιημένο και τουλάχιστον έναν παίκτη σαφώς πιο ικανοποιημένο. Αυτό συνεπάγεται ότι μια βέλτιστη κατά Pareto έκβαση δεν μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω αν τουλάχιστον ένας παίκτης δεν ζημιωθεί[5].

Μαθηματικά μπορεί να διατυπωθεί ως εξής η βελτιστοποίηση κατά Pareto:

- **Ορισμός 2.15:** Έστω  $U \subseteq \mathbb{R}^N$  ένα σύνολο. Το  $\mathbf{u} \in U$  καλείται **αποδοτικό κατά Pareto** αν δεν υπάρχει  $\mathbf{u}' \in U$  για το οποίο  $u'_i > u_i$  για κάθε  $i \in N$ . Το  $\mathbf{u} \in U$  καλείται **αυστηρά αποδοτικό κατά Pareto** αν δεν υπάρχει  $\mathbf{u}' \in U$  για το οποίο  $u'_i \geq u_i$  για κάθε  $i \in N$  και  $u'_i > u_i$  για μερικά  $i \in N$ . Το σύνολο Pareto ορίζεται σαν το σύνολο όλων των  $\mathbf{u} \in U$  που είναι αποδοτικά κατά Pareto[10].

#### 2.4.2 Τεχνικές βελτιστοποίησης μη αποδοτικής ισορροπίας Nash

Συχνά μια ισορροπία Nash δεν είναι βέλτιστη κατά Pareto, που σημαίνει ότι οι ανταμοιβές των παικτών μπορούν όλες να αυξηθούν. Ένα ενδιαφέρον πρόβλημα είναι ο σχεδιασμός παιγνίων με βελτιωμένη αποδοτικότητα Nash και σε αυτό το πεδίο η «τιμολόγηση» και ο «σχεδιασμός μηχανισμών» βοηθούν.

##### 2.4.2.1 Τιμολόγηση

Από την πλευρά ενός σχεδιαστή δικτύου, αυτός θα ήθελε να ικανοποιήσει την κοινωνική ευημερία, η οποία ορίζεται σαν η μεγιστοποίηση του αθροίσματος των ανταμοιβών όλων των παικτών ή σαν η μεγιστοποίηση της ελάχιστης ανταμοιβής μεταξύ αυτών. Όμως, αυτό έρχεται σε αντίθεση με την εγωιστική φύση των παικτών, αν αυτοί δεν συνεργάζονται προς ένα κοινό σκοπό. Στα γνωστικά ραδιοσυστήματα που περιέχουν εγωιστές χρήστες οι οποίοι ανταγωνίζονται για τους φασματικούς πόρους, το «κοινωνικά βέλτιστο» συνήθως δεν επιτυγχάνεται στην ισορροπία Nash, καθώς οι εγωιστές χρήστες ενδιαφέρονται μόνο για ίδιον όφελος. Με τον όρο «κοινωνικά βέλτιστο» εννοείται η δυνατότητα της πλήρους γνώσης του συστήματος, σαν να υπήρχε μια κεντρική αρχή που την παρέχει.

Η **τιμή της αναρχίας** (Price of Anarchy) είναι ένα σημαντικό μέτρο με το οποίο μελετάμε τη βελτιστότητα της έκβασης ενός μη συνεργατικού παιγνίου. Είναι το κλάσμα μεταξύ του χειρότερου σημείου ισορροπίας Nash που εξάγεται από το παίγνιο και του «κοινωνικά βέλτιστου» σημείου που μπορεί να επιτευχθεί αν είναι διαθέσιμη μια κεντρική αρχή.

Μελετώντας τα όρια της τιμής της αναρχίας, μπορούμε να κατανοήσουμε καλύτερα την ισορροπία Nash των μη συνεργατικών παιγνίων στα γνωστικά ραδιοσυστήματα.

Για να βελτιωθεί η αποδοτικότητα της ισορροπίας Nash στα μη συνεργατικά παίγνια των γνωστικών ραδιοσυστημάτων, η τιμολόγηση μπορεί να εισαχθεί όταν σχεδιάζονται αυτά, καθώς οι εγωιστές παίκτες θα οδηγηθούν σε ένα πιο αποδοτικό σημείο λειτουργίας[58]. Διαισθητικά, η τιμολόγηση μπορεί να θεωρηθεί σαν το κόστος των υπηρεσιών ή πόρων που λαμβάνει ένας χρήστης δικτύου ή το κόστος της βλάβης που ένας χρήστης επιβάλλει στους άλλους σε όρους υποβάθμισης επίδοσης, μείωσης εσόδων ή παρεμβολής. Καθώς οι εγωιστές χρήστες βελτιώνουν μόνο τη δική τους επίδοση, η επιθετική συμπεριφορά τους μπορεί να υποβαθμίσει την ποιότητα των υπηρεσιών όλων των άλλων χρηστών του δικτύου και έτσι να προκαλέσει τη μείωση της επίδοσης του δικτύου. Υιοθετώντας έναν αποδοτικό μηχανισμό τιμολόγησης οι εγωιστές χρήστες θα ενημερωθούν για τη μη αποδοτική ισορροπία Nash και θα ενθαρρυνθούν στο να ανταγωνιστούν μετριοπαθώς και αποδοτικότερα, για να επιτύχουν μεγαλύτερο όφελος για όλους τους χρήστες.

#### 2.4.2.2 Σχεδιασμός μηχανισμών

Στο «σχεδιασμό μηχανισμών» η δομή του παιγνίου σχεδιάζεται από μια οντότητα που ονομάζεται **αρχή** και επιθυμεί να επιλέξει κάποιο μηχανισμό για τα προσωπικά του συμφέροντα. Όπως συμβαίνει στις δημοπρασίες, οι παίκτες, που ονομάζονται **πράκτορες**, διατηρούν πληροφόρηση που δεν τη γνωρίζουν οι υπόλοιποι και η αρχή ρωτά τους πράκτορες κάποια **μηνύματα**, όπως οι προσφορές στη δημοπρασία, για να εκμαιεύσει την προσωπική πληροφόρηση. Έτσι πρόκειται για παίγνιο μη πλήρους πληροφόρησης στο οποίο η προσωπική πληροφορία κάθε πράκτορα, γνωστή ως **τύπος**, συμβολίζεται με  $\theta_i$ , μια τιμή που λαμβάνεται από ένα σύνολο  $\Theta_i$  για κάθε  $i \in N$ . Στη βάση των μηνυμάτων από τους πράκτορες, η αρχή λαμβάνει μια απόφαση διανομής  $d \in D$ , με  $D$  το σύνολο όλων των πιθανών αποφάσεων για το πώς θα επιτευχθεί η διανομή των πόρων. Καθώς οι πράκτορες δεν είναι απαραίτητως τίμιοι, πρέπει να ορισθούν σκοπιμότητες μέσω των χρηματικών κερδών, γνωστών ως **εμβάσματα**. Κατόπιν η συνάρτηση χρησιμότητας ενός πράκτορα είναι το όφελος της επιλογής  $d$  μαζί με το έμβασμα,  $u_i = v_i(d, \theta_i) + t_i$ , που μπορεί να οδηγήσει τους πράκτορες, παρά τις σκοπιμότητες, να αποκαλύψουν την πληροφόρηση αληθώς[10]. Περιληπτικά, η βασική ιδέα του σχεδιασμού μηχανισμών είναι ότι οι περιορισμοί ως προς τους πόρους και τις σκοπιμότητες εξετάζονται ισότιμα σε ένα πρόβλημα περιορισμένων πόρων με ιδιωτική πληροφόρηση[59]. Για τη θεωρία του «σχεδιασμού μηχανισμών» (Mechanism Design Theory) οι Leonid Hurwicz, Eric Maskin και Roger Myerson λάβανε το βραβείο Νόμπελ το 2007.

#### 2.4.3 Μικτή στρατηγική

Ενώ στην αμιγή στρατηγική ορίζεται μια συγκεκριμένη κίνηση ή δράση που ο παίκτης θα ακολουθήσει σε κάθε πιθανή εφικτή κατάσταση του παιγνίου, τέτοιες κινήσεις μπορεί να μην είναι τυχαίες ή να λαμβάνονται μέσω μιας κατανομής όπως συμβαίνει στις μικτές στρατηγικές[60]. Γενικά, μικτή στρατηγική είναι μια κατανομή πιθανότητας που εκχωρεί σε κάθε διαθέσιμη δράση μια πιθανότητα ώστε να επιλεγεί. Η αμιγής στρατηγική είναι αυτή στην οποία μόνο μια δράση έχει πιθανότητα 100% να συμβεί.

Αναλυτικότερα, **μικτή στρατηγική** ονομάζεται η στρατηγική που περιέχει πιθανές κινήσεις και μια κατανομή πιθανότητας (συλλογή από βάρη) που ανταποκρίνεται στο πόσο συχνά κάθε κίνηση πρόκειται να παιχτεί. Ένας παίκτης θα χρησιμοποιήσει μια μικτή στρατηγική μόνο αν είναι αδιάφορος μεταξύ πολλών καθαρών στρατηγικών. Επιπλέον, αν ο αντίπαλος μπορεί να επωφεληθεί από τη γνώση της επόμενης κίνησης ενός παίκτη, η μικτή στρατηγική προτιμάται αφού είναι επιθυμητό να παραμείνει ο αντίπαλος σε άγνοια.

**Θεώρημα 2.2:** Κάθε πεπερασμένο στρατηγικό παίγνιο έχει μια μικτή ισορροπία Nash.

Μια ερμηνεία που δόθηκε το 1973 από τον John Harsanyi[61] αναφέρει ότι η ισορροπία μικτής στρατηγικής ενός παιγνίου με τέλεια πληροφόρηση, μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα οριακό σημείο μιας διαδοχής ισορροπιών καθαρών στρατηγικών παιγνίων με ατελή πληροφόρηση. Ειδικότερα, ξεκινώντας από ένα παίγνιο με τέλεια πληροφόρηση κάποιος μπορεί να αποκτήσει μια οικογένεια παιγνίων ατελούς πληροφόρησης, θεωρώντας ότι υπάρχουν μικρές τυχαίες μεταβολές στις ανταμοιβές των παικτών και ότι κάθε παίκτης δεν είναι πλήρως πληροφορημένος για τις συναρτήσεις των ανταμοιβών των άλλων παικτών. Ο Harsanyi έδειξε ότι η συχνότητα με την οποία οι διάφορες καθαρές στρατηγικές επιλέγονται σε αυτά τα μεταβαλλόμενα παίγνια πλησιάζει τη συχνότητα με την οποία επιλέγονται στην ισορροπία μικτής στρατηγικής του αρχικού παιγνίου καθώς το πλάτος της μεταβολής γίνεται πολύ μικρό.

**Παράδειγμα 2.9:** Μικτή στρατηγική για το παίγνιο «Πέτρα-Ψαλίδι-Χαρτί»

	Rock	Scissors	Paper	25-50-25 Mix
Rock	0	1	-1	0.25
Scissors	-1	0	1	0
Paper	1	-1	0	-0.25
50-25-25 mix	0	0.25	-0.25	0.0625

Πίνακας 2-7: Μικτή στρατηγική για το παίγνιο "Πέτρα-Ψαλίδι-Χαρτί"

Έστω ότι παίζεται το παιχνίδι «Πέτρα-Ψαλίδι-Χαρτί» με πιθανότητες για κάθε δράση 50%, 25% και 25% αντίστοιχα, οποίες παρουσιάζονται στην τελευταία γραμμή του Πίνακα 2-7. Πριν παιχτεί το παιχνίδι ο παίκτης διαλέγει, τυχαία, βασισμένος σε αυτές τις πιθανότητες ποια καθαρή στρατηγική να χρησιμοποιήσει. Αν ο πρώτος παίκτης ακολουθήσει τη μικτή στρατηγική και ο δεύτερος επιλέξει Πέτρα, τότε με πιθανότητα 50% θα υπάρξει ισοπαλία Πέτρα-Πέτρα, με πιθανότητα 25% θα νικήσει ο δεύτερος παίκτης, αφού η επιλογή θα είναι Ψαλίδι-Πέτρα και με 25% θα νικήσει ο πρώτος παίκτης αφού η επιλογή θα είναι Χαρτί-Πέτρα. Έτσι, η προσδοκώμενη ανταμοιβή του πρώτου παίκτη είναι  $50\% \times 0 + 25\% \times (-1) + 25\% \times 1 = 0$ . Επομένως οι τιμές στην τέταρτη γραμμή του πίνακα είναι οι προσδοκώμενες τιμές των τιμών που βρίσκονται στις υπόλοιπες γραμμές και στην ίδια στήλη, χρησιμοποιώντας τις πιθανότητες της μικτής στρατηγικής. Αντίστοιχα με τον παραπάνω υπολογισμό η δεύτερη τιμή της τέταρτης γραμμής προκύπτει από τη σχέση  $50\% \times 1 + 25\% \times 0 + 25\% \times (-1) = 0.25$  και η τρίτη τιμή από τη σχέση  $50\% \times (-1) + 25\% \times 1 + 25\% \times 0 = -0.25$ . Ακόμα και αν η μικτή στρατηγική δεν κυριαρχεί σε καμία από τις καθαρές στρατηγικές, αυτή μπορεί να είναι ελκυστική σε έναν παίκτη που

στοχεύει στη στρατηγική μεγίστου-ελαχίστου, αφού εγγυάται μια ανταμοιβή -0.25 που είναι μεγαλύτερη από την -1 των άλλων περιπτώσεων.

Επίσης, μπορεί και ο δεύτερος παίκτης να συμμετέχει σε μικτή στρατηγική και αυτό παρουσιάζεται στην τελευταία στήλη του πίνακα, όπου για κάθε δράση χρησιμοποιούνται οι πιθανότητες 25%, 50% και 25% αντίστοιχα. Έτσι, ενδεικτικά, το τελευταίο στοιχείο της πρώτης γραμμής προκύπτει από τη σχέση  $25\% \times 0 + 50\% \times 1 + 25\% \times (-1) = 0.25$ . Επιπλέον, δίνεται η ανταμοιβή της 50-25-25 ως προς την 25-50-25 μικτή στρατηγική που υπολογίζεται από τις τιμές της τέταρτης σειράς του πίνακα με τη σχέση  $25\% \times 0 + 50\% \times 0.25 + 25\% \times (-0.25) = 0.0625$ . Παρατηρείται από το αποτέλεσμα ότι η μικτή στρατηγική με έμφαση στην επιλογή Πέτρα κερδίζει τη μικτή στρατηγική με έμφαση στην επιλογή Ψαλίδι.

## 2.5 Παίγνιο «διαπραγμάτευσης» μεταξύ αγοραστή και πωλητή

Στο παίγνιο «διαπραγμάτευσης» ή «bargain game», ένας ή περισσότεροι παίκτες κάνουν συμβιβασμούς. Το συγκεκριμένο παίγνιο είναι χρήσιμο όταν δυο ή περισσότεροι χρήστες πρέπει να καταλήξουν σε μια συμφωνία ως προς το πώς θα κατανεμηθούν οι πόροι. Το παίγνιο διαπραγμάτευσης δεν ορίζεται σαν ένα παίγνιο στο οποίο οι παίκτες ουσιαστικά συνεργάζονται, αλλά η συνεργασία επιβάλλεται εξωτερικά από ένα τρίτο μέρος. Κάθε χρήστης προτιμάει να φτάσει σε συμφωνία παρά το αντίθετο, μεγιστοποιώντας, όμως, τις δικές του προτιμήσεις. Υπάρχουν δυο ειδών «διαπραγματεύσεις». Η μια αναφέρεται ως αξιωματική προσέγγιση και χρησιμοποιείται στο πλαίσιο του συνεργατικού παιγνίου. Η λύση αυτού του είδους, γνωστή και ως Nash Bargaining Solution (NBS), ικανοποιεί ελκυστικά αξιώματα όπως τον ατομικό ορθολογισμό, την εφικτότητα, την κατά Pareto βελτιστότητα, την ανεξαρτησία από μη σχετικές εναλλακτικές (Independence of Irrelevant Alternatives-IIA), την ανεξαρτησία των γραμμικών μετασχηματισμών και τη συμμετρία. Η άλλη προσέγγιση αναφέρεται ως στρατηγική και αναπτύσσεται στο πλαίσιο της μη συνεργατικής θεωρίας παιγνίων. Για παράδειγμα, με τη σειρά, οι χρήστες κάνουν προσφορές και επαναπροσφορές μέχρι να υπάρξει συμφωνία. Η διαπραγμάτευση μπορεί να πραγματοποιηθεί υπό πλήρη γνώση του δικτύου, μονομερή ατελή πληροφόρηση (μόνο η πληροφορία του ενός χρήστη είναι άγνωστη στον άλλον) ή διμερή ατελή πληροφόρηση[62].

Στη συνέχεια παρατίθεται ο ορισμός για το πρόβλημα διαπραγμάτευσης μεταξύ  $N$  ατόμων. «Θεωρούμε  $\mathbf{N}=\{1,2,..N\}$  το σύνολο των παικτών και  $\mathbf{S}$  ένα κλειστό και κυρτό υποσύνολο του  $\mathfrak{R}^N$  που παριστά το σύνολο των εφικτών ανταμοιβών που οι παίκτες θα αποκτήσουν αν συνεργαστούν όλοι μαζί. Θεωρούμε πως  $u_{\min}^i$  είναι η ελάχιστη ανταμοιβή που προσδοκά ο παίκτης  $i$ , διαφορετικά δεν θα συνεργαστεί. Υποθέτουμε ότι το  $\{u_i \in \mathbf{S} \mid u_i \geq u_{\min}^i, \forall i \in \mathbf{N}\}$  είναι ένα μη κενό φραγμένο σύνολο. Ορίζουμε το  $\mathbf{u}_{\min}=(u_{\min}^1, \dots, u_{\min}^N)$  και το ζεύγος  $(\mathbf{S}, \mathbf{u}_{\min})$  καλείται πρόβλημα διαπραγμάτευσης  $N$  ατόμων». [63]

Μέσα στο εφικτό σύνολο  $\mathbf{S}$  η έννοια της βελτιστότητας κατά Pareto, που παρουσιάζεται κάτωθι, ορίζεται σαν ένα κριτήριο επιλογής για τις λύσεις της διαπραγμάτευσης.

«Το σημείο  $(u_1, \dots, u_N)$  ονομάζεται βέλτιστο κατά Pareto, αν και μόνο αν δεν υπάρχει άλλη κατανομή  $u'_i$ , τέτοια ώστε  $u'_i \geq u_i, \forall i$ , και  $\exists i$  ώστε  $u'_i > u_i$ , δηλαδή δεν υπάρχει άλλη

κατανομή που οδηγεί σε καλύτερη απόδοση για κάποιους χρήστες χωρίς να υποβαθμίζεται η απόδοση κάποιων άλλων χρηστών».

Όμως, δεδομένου ότι μπορεί να υπάρχει ένας άπειρος αριθμός βέλτιστων σημείων κατά Pareto, ένα άλλο κριτήριο επιλογής για το αποτέλεσμα μιας διαπραγμάτευσης είναι ο βαθμός της δικαιοσύνης αυτού. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται το κριτήριο δικαιοσύνης που αναφέρεται στη λύση της διαπραγμάτευσης Nash (Nash Bargaining Solution-NBS)[64]. Η βασική ιδέα είναι πως αφού έχουν εκχωρηθεί οι ελάχιστες απαιτήσεις που ικανοποιούν όλους τους χρήστες, οι υπόλοιποι πόροι κατανέμονται ανάλογα με τις συνθήκες των χρηστών. Υπάρχουν πολλές λύσεις για τη διαπραγμάτευση, ωστόσο η NBS παρέχει ένα μοναδικό και δίκαιο κατά Pareto βέλτιστο σημείο λειτουργίας υπό τις ακόλουθες συνθήκες[63]:

«Το σημείο  $\bar{\mathbf{u}} = \varphi(\mathbf{S}, \mathbf{u}_{\min})$  ονομάζεται λύση της διαπραγμάτευσης Nash (NBS) στο  $\mathbf{S}$ , δεδομένων των ελάχιστων απαιτήσεων  $\mathbf{u}_{\min}$ , αν ικανοποιούνται τα παρακάτω κριτήρια:

- 1) Ατομικός ορθολογισμός:  $\bar{u}_i \geq u_{\min}^i, \forall i$
- 2) Εφικτότητα:  $\bar{\mathbf{u}} \in \mathbf{S}$
- 3) Κατά Pareto βελτιστοποίηση: Για κάθε  $\hat{\mathbf{u}} \in \mathbf{S}$ , αν  $u_i \geq \bar{u}_i, \forall i$  τότε  $\hat{u}_i = \bar{u}_i, \forall i$ .
- 4) Ανεξαρτησία των μη σχετικών εναλλακτικών: Αν  $\bar{\mathbf{u}} \in \mathbf{S}' \subset \mathbf{S}, \bar{\mathbf{u}} = \varphi(\mathbf{S}, \mathbf{u}_{\min})$ , τότε  $\bar{\mathbf{u}} = \varphi(\mathbf{S}', \mathbf{u}_{\min})$ .
- 5) Ανεξαρτησία γραμμικών μετασχηματισμών: Για κάθε γραμμικό μετασχηματισμό  $\psi$  ισχύει ότι  $\psi(\varphi(\mathbf{S}, \mathbf{u}_{\min})) = \varphi(\psi(\mathbf{S}), \psi(\mathbf{u}_{\min}))$ .
- 6) Συμμετρία: Αν το  $\mathbf{S}$  είναι αμετάβλητο για όλες τις αλλαγές των πρακτόρων, δηλαδή ισχύει ότι  $\varphi_j(\mathbf{S}, \mathbf{u}_{\min}) = \varphi_{j'}(\mathbf{S}, \mathbf{u}_{\min}), \forall j, j'$  »

## 2.6 Παίγνιο συμμαχίας (coalition game)

Η συνεργατική θεωρία παιγνίων παρέχει αναλυτικά εργαλεία για τη μελέτη της συμπεριφοράς των λογικών παικτών όταν συνεργάζονται. Η συμμαχία (coalition) σημαίνει ότι το σύνολο των συνεργαζόμενων παικτών μπορεί να ενδυναμώσει τη θέση των παικτών στο παίγνιο[52]. Στο παίγνιο αυτό όλοι οι παίκτες δρουν συνασπισμένα, σαν μια μοναδική οντότητα. Η συμμαχία είναι ευσταθής αν και μόνο αν καμία άλλη συμμαχία δεν έχει τον σκοπό ή την ισχύ να τη διαταράξει. Τα παίγνια συμμαχίας μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες:

- Συμμαχικά (κανονικά) παίγνια: Σε αυτά όλες οι ομάδες παικτών ωφελούνται λιγότερο όταν δρουν μη συνεργατικά παρά όταν συμμετέχουν στο συνασπισμό.
- Παίγνια δημιουργίας συμμαχίας: Η δημιουργία μιας συμμαχίας επιφέρει πλεονεκτήματα στα μέλη του παιγνίου αλλά τα κέρδη είναι περιορισμένα από το κόστος της δημιουργίας της συμμαχίας.
- Συμμαχικά παίγνια με γράφους: Το συμμαχικό παίγνιο είναι σε μορφή γράφου και η διασύνδεση μεταξύ των παικτών επηρεάζει άμεσα τα χαρακτηριστικά όπως και το εξαγόμενο αποτέλεσμα του παιγνίου[65].

Τα παίγνια συνασπισμού μπορούν να οριστούν ως εξής: «Ένα σύνολο συνασπισμού  $S$  ορίζεται σαν ένα υποσύνολο του συνολικού αριθμού  $N$  των παικτών, δηλαδή  $S \subset N$ . Στο συνασπισμό οι χρήστες προσπαθούν να συνεργαστούν μεταξύ τους. Η συνασπισμένη μορφή ενός παιγνίου δίνεται από το ζεύγος  $(N, u)$  όπου το  $u$  είναι μια συνάρτηση πραγματικής τιμής, που ονομάζεται χαρακτηριστική συνάρτηση.  $u(S)$  είναι η τιμή για τη συνεργασία στο σύνολο  $S$  του συνασπισμού με τις ακόλουθες ιδιότητες:

1.  $u(\emptyset) = 0$ .
2. (υπερπροσθετικότητα) αν  $S$  και  $T$  είναι συνασπισμοί ξένοι μεταξύ τους ( $S \cap T = \emptyset$ ) τότε  $u(S) + u(T) \leq u(S \cup T)$ ». [5]



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΙΑΜΟΙΡΑΣΜΟΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Στην οικονομική θεωρία το εμπόριο ορίζεται ως η διαδικασία της ανταλλαγής αγαθών ή υπηρεσιών στο πλαίσιο μιας αγοράς. Η ανταλλαγή αυτή μπορεί να είναι άμεση μεταξύ αγαθών και υπηρεσιών (αντιπραγματισμός) ή χρησιμοποιώντας κάποιο μέσο ανταλλαγής όπως οι χρηματικές μονάδες. Στο εμπόριο φάσματος υπάρχουν δυο οντότητες, ο πωλητής φάσματος (spectrum seller ή PU) και ο αγοραστής φάσματος (spectrum buyer, SU και χρήστης-ενοικιαστής, όσον αφορά τα μοντέλα αποκλειστικής, διαμοιραζόμενης και κοινής χρήσης, αντίστοιχα). Έτσι, στο μοντέλο ανταλλαγής πόρων, οι SUs παρέχουν τηλεπικοινωνιακούς πόρους για τη μετάδοση δεδομένων των PUs με αντάλλαγμα τη χρήση του φάσματος από τους πρώτους. Αντίθετα, στο μοντέλο εικονικής χρηματικής ανταλλαγής, οι SUs πληρώνουν τους PUs με εικονικά χρήματα για τη χρήση του φάσματος [62].

Ενώ η δυναμική πρόσβαση στο φάσμα ενθαρρύνει τις λειτουργίες του δικτύου που αφορούν την ανίχνευση του φάσματος στο φυσικό και στο MAC επίπεδο, καθώς και στο γνωστικό MAC και σε υψηλότερα επίπεδα, το εμπόριο φάσματος μπορεί να θεωρηθεί ως ένα από τα συστατικά εκείνα που αφορούν την οικονομική πλευρά της δυναμικής πρόσβασης. Το εμπόριο αυτό καθορίζει τη δομή της αγοράς και πώλησης του ραδιοπόρου και μπορεί να είναι είτε άμεσο, μεταξύ ενός πωλητή και ενός αγοραστή, είτε μέσω ενός μεσάζοντα. Η τιμολόγηση είναι ένα κύριο στοιχείο της εμπορίας του φάσματος και καθορίζει την τιμή του φάσματος μεταξύ πωλητή και αγοραστή. Ακόμα, ο ιδιοκτήτης φάσματος παρουσιάζει τη δυνατότητα αγοράς αυτού και αφού καθοριστούν τα πλεονεκτήματα της αγοράς του φάσματος, αυτό πωλείται σε άλλους χρήστες.

Η απόφαση για το εμπόριο φάσματος (τιμή και μέγεθος του διαμοιραζόμενου φάσματος) μπορούν να καθοριστούν με άμεσο ή έμμεσο τρόπο. Για παράδειγμα, η διαπραγμάτευση μεταξύ ιδιοκτήτη και χρήστη φάσματος στο μοντέλο αποκλειστικής χρήσης γίνεται με έμμεσο τρόπο πριν τη διανομή και την πρόσβαση στο φάσμα. Σε αντίθεση, η διαπραγμάτευση μεταξύ πρωτευόντων και δευτερευόντων χρηστών, στο μοντέλο διαμοιραζόμενης χρήσης, μπορεί να πραγματοποιηθεί με άμεσο τρόπο σε πραγματικό χρόνο. Πάντως, η δυνατότητα διαπραγμάτευσης για το εμπόριο φάσματος από τα πρωτόκολλα στα επίπεδα MAC και δικτύου απαιτείται για να διευκολυνθεί η φασματική πρόσβαση και η δυναμική κατανομή φάσματος[66].

### 3.1 Οικονομικές θεωρίες για τη δυναμική πρόσβαση στο φάσμα

Για τη μαθηματική διατύπωση των οικονομικών όρων που εμφανίζονται στη συνέχεια, θα χρησιμοποιηθούν τα σύμβολα  $p$  και  $q$  που αναπαριστούν τα μεγέθη των τιμών και των ποσοτήτων, αντίστοιχα. Σε μια δεδομένη αγορά, τα μεγέθη  $p$  και  $q$  είναι αλληλένδετα και η σχέση τους μπορεί να απεικονιστεί μέσω των καμπυλών προσφοράς και ζήτησης. Παραδείγματος χάρη σε μια δεδομένη τιμή αγοράς  $p$  η ποσότητα του αγαθού που επιθυμούν οι αγοραστές να αγοράσουν είναι  $q = D(p)$ , ενώ η ποσότητα που οι πωλητές επιθυμούν να πουλήσουν είναι  $q = S(p)$ . Οι συναρτήσεις  $D(\bullet)$  και  $S(\bullet)$  είναι γνωστές ως συναρτήσεις ζήτησης και προσφοράς αντίστοιχα. Ακόμα, αν η ποσότητα  $q$  είναι σταθερή στην αγορά, η τιμή που οι αγοραστές επιθυμούν να πληρώσουν καθορίζεται υπολογίζοντας

την αντίστροφη συνάρτηση  $p = D^{-1}(q)$  και ομοίως η τιμή στην οποία πρέπει να πουλήσουν οι πωλητές δίνεται από την αντίστροφη συνάρτηση  $p = S^{-1}(q)$ . Συχνά η συνάρτηση ζήτησης είναι φθίνουσα ως προς το  $p$  ενώ η συνάρτηση προσφοράς αύξουσα.

### 3.1.1 Μονοπώλιο

Η απλούστερη δομή του φασματικού εμπορίου εμφανίζεται όταν υπάρχει μόνο ένας πωλητής-εταιρεία στο σύστημα, υπάρχει δηλαδή μονοπώλιο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, αυτός μεγιστοποιεί τα κέρδη βασιζόμενος στη ζήτηση των αγοραστών και βελτιστοποιώντας το φασματικό εμπόριο. Η δομή της αγοράς μπορεί να είναι είτε οδηγούμενη από τον πωλητή, είτε οδηγούμενη από τον αγοραστή. Στην πρώτη περίπτωση, ο πωλητής καθορίζει την τιμή και ανακοινώνει την πληροφορία για το διαθέσιμο φάσμα. Ο αγοραστής καθορίζει τη φασματική ζήτηση και προχωρά στην αγορά. Αυτά τα βήματα μπορούν να γίνουν είτε στιγμιαία είτε επαναλαμβανόμενα. Στην πρώτη περίπτωση, αφού ο αγοραστής κάνει αίτηση για το φάσμα και πληρώσει, τότε η διαδικασία σταματά άμεσα. Στην τελευταία περίπτωση, ο αγοραστής και ο πωλητής διαπραγματεύονται την τιμή και η αίτηση φάσματος γίνεται επαναληπτικά μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή λύση και για τους δυο. Εναλλακτικά, η αγορά μπορεί να είναι οδηγούμενη από τον αγοραστή ο οποίος προτείνει την τιμή και καθορίζει το αιτούμενο φάσμα. Κατόπιν, ο πωλητής διαλέγει τον αγοραστή που του δίνει την καλύτερη προσφορά και κατανέμει το φάσμα αντίστοιχα. Αυτό αποκαλείται δημοπρασία [66][40]. Υποθέτοντας ότι το κόστος που σχετίζεται με την ποσότητα  $q$  είναι  $C(q)$  η εταιρεία-πωλητής μεγιστοποιεί το κέρδος, το οποίο δίνεται από τη διαφορά εσόδων μείον κόστους

$$u(q) = qD^{-1}(q) - C(q) \text{ (Εξίσωση 3.1)}$$

με την εφαρμογή της συνθήκης για την πρώτη παράγωγο που ακολουθεί [10]

$$\frac{\partial u(q)}{\partial q} = D^{-1}(q) + q \frac{\partial D^{-1}(q)}{\partial q} - \frac{\partial C(q)}{\partial q} = 0 \text{ (Εξίσωση 3.2)}$$

### 3.1.2 Ολιγοπώλιο

Όταν η αγορά είναι πλήρως ανταγωνιστική, η ισορροπία  $(p^*, q^*)$  επιτυγχάνεται μέσω της τομής των καμπυλών προσφοράς και ζήτησης και έτσι προκύπτει η σχέση:

$$q^* = D(p^*) \text{ και } q^* = S(p^*) \text{ (Εξίσωση 3.3)}$$

Η δομή της αγοράς αποτελείται από πολλαπλούς (μικρό αριθμό) πωλητές που προσφέρουν ραδιοφάσμα. Οι πωλητές ανταγωνίζονται μεταξύ τους ώστε να αυξήσουν τα κέρδη τους. Αυτοί ελέγχουν την ποσότητα της προμήθειας και/ή την τιμή. Καθώς υπάρχει ανταγωνισμός μεταξύ των πωλητών το κέρδος από την πώληση φάσματος είναι μικρότερο από την περίπτωση του μονοπωλίου.

Στα γνωστικά ραδιοσυστήματα, οι πωλητές είναι οι πρωτεύοντες χρήστες ή οι πρωτεύοντες πάροχοι υπηρεσιών. Αυτοί ανταγωνίζονται για να μεγιστοποιήσουν τα κέρδη τους από την πώληση του φάσματος σε δευτερεύοντες χρήστες ή δευτερεύοντες παρόχους. Το κέρδος ενός πρωτεύοντα παρόχου υπηρεσιών εξαρτάται όχι μόνο από το κόστος του διαμοιρασμού

του φάσματος με τους δευτερεύοντες αλλά και από τη στρατηγική που θα ακολουθήσουν οι άλλοι πρωτεύοντες πάροχοι υπηρεσιών. Επίσης, η πώληση φάσματος εξαρτάται και από την επίδοση που παρουσιάζει ως προς τη διάδοση και την ανεκτικότητα του σε συνθήκες παρεμβολής. Για παράδειγμα μια φασματική μπάντα σε χαμηλότερο εύρος συχνοτήτων μπορεί να έχει καλύτερα χαρακτηριστικά διάδοσης σε σχέση με μια άλλη που ανήκει σε υψηλότερο εύρος μετάδοσης.

Η θεωρία των μη συνεργατικών παιγνίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αναλυθεί και να προβλεφθεί η συμπεριφορά των πωλητών στην ολιγοπωλιακή αγορά. Ένα μη συνεργατικό παίγνιο συντίθεται από τους παίκτες, τις στρατηγικές τους και τις ανταμοιβές των παικτών. Στην ολιγοπωλιακή αγορά, οι παίκτες αντιστοιχούν στις εταιρείες, η στρατηγική κάθε εταιρείας προσαρμόζεται στην παρεχόμενη προσφορά και στην προσφερόμενη τιμή και η ανταμοιβή της εταιρείας εκφράζεται μέσω του κέρδους [5]. Τρία κλασικά ολιγοπωλιακά μοντέλα που αναλύονται μέσω της θεωρίας παιγνίων είναι τα εξής:

- Μοντέλο Cournot: Ο ανταγωνισμός έγκειται στην ποσότητα του εμπορεύματος. Οι εταιρείες αποφασίζουν για την παρεχόμενη ποσότητα ταυτόχρονα. Όσον αφορά το σύνολο της παρεχόμενης ποσότητας οι πελάτες δρουν ανάλογα με την τιμή που είναι διατεθειμένοι να πληρώσουν. Η παρεχόμενη ποσότητα μιας εταιρείας μπορεί να επηρεάσει την τιμή ενός προϊόντος στην αγορά και κατ' επέκταση το κέρδος των άλλων εταιρειών. Στην περίπτωση της εμπορίας φάσματος στα γνωστικά ραδιοσυστήματα, το μοντέλο Cournot χρησιμοποιείται στην περίπτωση που πολλαπλοί δευτερεύοντες χρήστες μοιράζονται το φάσμα με έναν πρωτεύοντα χρήστη και σκοπός είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους των δευτερευόντων χρηστών. Οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να γνωρίζουν τις στρατηγικές και τις ανταμοιβές των άλλων δευτερευόντων χρηστών και αποτελούν τους καταναλωτές του φάσματος που προσφέρεται από τους πρωτεύοντες χρήστες. Οι δευτερεύοντες χρήστες επιλέγουν τις στρατηγικές τους ταυτόχρονα βασιζόμενοι στις τιμές που τίθενται από τους πρωτεύοντες χρήστες και η απόφαση του κάθε χρήστη επηρεάζεται από τις στρατηγικές των άλλων χρηστών. Η λύση του μοντέλου Cournot είναι η ισορροπία Nash[43].

Θεωρώντας ότι υπάρχουν δυο ολιγοπωλιακές εταιρείες, βέβαια το σενάριο μπορεί να γενικευθεί σε πολλές εταιρείες, που επιλέγουν τις παρεχόμενες ποσότητες  $q_1$  και  $q_2$  ανεξάρτητα και ταυτόχρονα, η δράση κάθε εταιρείας επηρεάζει άμεσα τα κέρδη της άλλης δεδομένου ότι η τιμή της αγοράς εξαρτάται από τη συνολική ποσότητα. Η τιμή της αγοράς καθορίζεται από την αντίστροφη συνάρτηση ζήτησης  $p = D^{-1}(q_1 + q_2)$ . Υποθέτουμε ότι το κόστος που σχετίζεται με την παραγωγή  $q_i$  είναι  $C_i(q_i)$ ,  $i=1,2$ , για τις δυο εταιρείες. Η συνάρτηση χρησιμότητας κάθε εταιρείας είναι τα έσοδα μείον το κόστος και δίνεται από τη σχέση

$$u_i(q_i) = q_i D^{-1}(q_1 + q_2) - C_i(q_i), i=1,2 \text{ (Εξίσωση 3.4)}$$

Η ισορροπία του παιγνίου που δίνεται από το ζεύγος  $(q_1^*, q_2^*)$  είναι η λύση του συστήματος των παρακάτω εξισώσεων που προέρχονται από τις παραγώγους πρώτης τάξης:

$$\frac{\partial u_1(q_1)}{\partial q_1} = D^{-1}(q_1 + q_2) + q_1 \frac{\partial D^{-1}(q_1 + q_2)}{\partial q_1} - \frac{\partial C_1(q_1)}{\partial q_1} = 0$$

$$\frac{\partial u_2(q_2)}{\partial q_2} = D^{-1}(q_1 + q_2) + q_2 \frac{\partial D^{-1}(q_1 + q_2)}{\partial q_2} - \frac{\partial C_2(q_2)}{\partial q_2} = 0$$

(Εξίσωση 3.5)

- Μοντέλο Bertrand: Η εταιρεία μπορεί αντί να προσαρμόσει την προσφερόμενη ποσότητα, να αλλάξει την προσφερόμενη τιμή. Στη δεδομένη περίπτωση, η εταιρεία πρώτα επιλέγει τη τιμή του εμπορεύματος και την ανακοινώνει στον πελάτη. Στη συνέχεια, ο πελάτης αποκρίνεται ανάλογα της ζήτησής του για το εμπόρευμα. Η εταιρεία μπορεί να επιλέξει την τιμή έτσι ώστε το κέρδος της να μεγιστοποιηθεί δοθείσας της τιμής που έχουν επιλέξει οι υπόλοιπες εταιρείες. Αυτός ο ανταγωνισμός στην τιμολόγηση αναφέρεται ως παίγνιο Bertrand. Στο εμπόριο φάσματος οι πάροχοι υπηρεσιών-ΡUs είναι οι εταιρείες, οι καταναλωτές είναι οι δευτερεύοντες χρήστες και το μέγεθος του φάσματος μπορεί να αλλάζει ανάλογα με την τιμή που τίθεται από τους πρωτεύοντες χρήστες. Όταν οι πάροχοι υπηρεσιών ανακοινώνουν τις τιμές τους ταυτόχρονα (ατελής πληροφόρηση) η ισορροπία Nash αποτελεί τη λύση. Η αλληλεπίδραση στο παίγνιο Stackelberg είναι πιο δυναμική λόγω του χρόνου προσαρμογής της στρατηγικής σε σχέση με το παίγνιο Bertrand. Αν υποθεθεί τέλεια πληροφόρηση και όλες οι εταιρείες αποφασίζουν για τις τιμές τους ταυτόχρονα τότε το μοντέλο Stackelberg καταλήγει στο μοντέλο Bertrand [67]. Γενικά, η λύση στο μοντέλο Bertrand εξαρτάται από το πόσο εύκολα μπορεί να υποκατασταθεί ένα εμπόρευμα. Αν τα εμπορεύματα από διαφορετικές εταιρείες είναι ταυτόσημα, τότε το ένα αποτελεί υποκατάστατο του άλλου, διαφορετικά μπορεί να είναι μερικώς ή καθόλου υποκατάστατα μεταξύ τους.

Στην περίπτωση των ομοιογενών εμπορευμάτων ο πελάτης μπορεί να επιλέξει να αγοράσει το εμπόρευμα από οποιαδήποτε εταιρεία και συγκεκριμένα από αυτή που το προσφέρει στη χαμηλότερη τιμή. Στην περίπτωση των ομοιογενών εμπορευμάτων υπάρχει μια μοναδική ισορροπία Nash στην οποία οι τιμές που χρεώνονται από τις εταιρείες είναι ταυτόσημες. Συγκεκριμένα στην ισορροπία αυτή η τιμή είναι ίση με το κόστος παραγωγής. Η ερμηνεία της λύσης είναι η ακόλουθη: δεδομένης οποιασδήποτε αρχικής τιμής, αν μια εταιρεία μειώσει την τιμή η αγορά θα κινηθεί προς αυτή την εταιρεία, οπότε οι άλλες εταιρείες θα έχουν μηδενικό κέρδος και θα προσπαθήσουν να μειώσουν τις τιμές τους για να αποκτήσουν θετικό κέρδος. Στην περίπτωση αυτή οποιαδήποτε τιμή που είναι μεγαλύτερη από το κόστος παραγωγής δεν ανήκει στην ισορροπία Nash αφού μια εταιρεία μπορεί να έχει μεγαλύτερο κέρδος μειώνοντας την τιμή.

Όταν τα εμπορεύματα είναι διαφορετικά, οι συναρτήσεις ζήτησης για τα διαφορετικά προϊόντα των διαφορετικών εταιρειών είναι διαφορετικές και εξαρτώνται από τις τιμές που έχουν θέσει οι εταιρείες στα εμπορεύματά τους που μπορούν να αντικατασταθούν. Επίσης, ανάλογα με το επίπεδο της υποκατάστασης, αν η τιμή μιας εταιρείας αλλάξει, η αγορά θα επιλέξει να αγοράσει από αυτή (αν η τιμή είναι χαμηλότερη) ή από άλλες εταιρείες (αν η τιμή είναι υψηλότερη) όπως και στην περίπτωση των ομοιογενών προϊόντων[5].

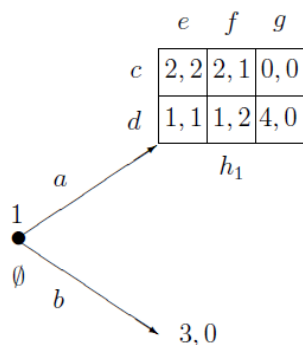
Θεωρώντας ότι υπάρχουν δυο ολιγοπωλιακές εταιρείες αυτές αποφασίζουν τις δράσεις τους ανεξάρτητα και ταυτόχρονα, αλλά οι αποφάσεις τους αφορούν πλέον τις τιμές  $p_1$  και  $p_2$  και η παραγωγικότητά τους είναι απεριόριστη. Υποθέτοντας ότι κάθε εταιρεία παράγει ένα μερικώς διαφοροποιημένο προϊόν, η συνάρτηση ζήτησης του προϊόντος 1 είναι  $D_1(p_1, p_2)$  που είναι μια φθίνουσα συνάρτηση του  $p_1$  και συχνά μια αύξουσα συνάρτηση του  $p_2$ . Όμοια καθορίζεται η συνάρτηση  $D_2(p_1, p_2)$ . Η τιμή ισορροπίας μπορεί να υπολογιστεί από το σύστημα των εξισώσεων που προέρχονται από τις παραγωγούς πρώτης τάξης και μεγιστοποιούν το κέρδος που δίνεται από τη σχέση

$$u_i(p_i) = p_i D_i(p_1, p_2) - C_i(D_i(p_1, p_2)), \quad i=1,2 \text{ (Εξίσωση 3.6)}$$

- Μοντέλο Stackelberg: Στο μοντέλο αυτό οι εταιρείες ανταγωνίζονται μεταξύ τους ως προς την προσφερόμενη ποσότητα ή τιμή. Αποτελεί ένα στρατηγικό παίγνιο «αρχηγού-ακολουθού», στο οποίο υπάρχει τουλάχιστον ένας παίκτης αρχηγός που μπορεί να αποφασίσει και να θέσει τη στρατηγική στον καθορισμό της τιμής πριν τους παίκτες ακολούθους. Οι παίκτες μετέχουν σε ανταγωνισμό Stackelberg αν κάποιος από αυτούς έχει κίνητρο να κινηθεί πρώτος. Οι ακόλουθοι μπορούν να παρατηρήσουν τη στρατηγική που επιλέγεται από τον αρχηγό και να προσαρμόσουν τις αποφάσεις τους. Ο αρχηγός μπορεί να επιλέξει μια στρατηγική που μεγιστοποιεί το κέρδος, δοθέντων των επιλεγμένων βέλτιστων αποκρίσεων (best responses) των ακολούθων. Η λύση στο παίγνιο αυτό καλείται ισορροπία Stackelberg και υπολογίζεται μέσω της τεχνικής που ονομάζεται «προς τα πίσω επαγωγή» ή backward induction.

Η τεχνική αυτή παρουσιάζει ένα πρότυπο συλλογιστικής, στην οποία κάθε παίκτης σε κάθε στάδιο του παιχνιδιού γνωρίζει τις μελλοντικές συμπεριφορές και τις πεποιθήσεις των αντιπάλων του και όχι τις επιλογές που έγιναν στο παρελθόν. Έτσι, θεωρεί δεδομένες τις παρελθοντικές επιλογές αλλά δεν εξάγει συμπεράσματα από αυτές. Η προς τα πίσω επαγωγή ξεκινά στο τελευταίο στάδιο ενός παιγνίου και προβλέποντας τι μπορεί να κάνει ο τελευταίος παίκτης σε ένα παίγνιο δυο παικτών σε αυτό το σημείο, καθορίζει μέσα από ποιές κινήσεις, πιθανώς, κατέληξε το παίγνιο στην τελική κατάσταση. Η τεχνική αυτή αναφέρθηκε για πρώτη φορά το 1944 από τους John von Neumann και Oskar Morgenstern [35].

Στη συνέχεια ακολουθεί ένα παράδειγμα παιγνίου και περιγράφεται σύντομα η τεχνική της backward induction.



Σχήμα 3.1: Σενάριο για backward induction

Στην αρχή του παιχνιδιού ο παίκτης 1 διαλέγει ανάμεσα στα *a* και *b*. Αν επιλέξει *b*, το παιχνίδι ολοκληρώνεται και οι χρησιμότητες των παικτών είναι για τον πρώτο 3 και για το δεύτερο 0. Αν επιλέξει *a*, το παιχνίδι προχωρά στο σύνολο  $h_1$  όπου οι παίκτες 1 και 2 ταυτόχρονα επιλέγουν από τα σύνολα  $\{c,d\}$  και  $\{e,f,g\}$ , αντίστοιχα. Αν ο παίκτης 1 πιστεύει πως ο παίκτης 2 λειτουργεί με τη λογική, τότε προσμένει ότι ο 2 δεν θα επιλέξει το *g* που του δίνει μηδενική χρησιμότητα και έτσι θα αναγκαστεί ο 1 να επιλέξει το *b* στην αρχή, αφού μέσω αυτού έχει χρησιμότητα 3, ενώ ακολουθώντας το *a* η μέγιστη χρησιμότητα είναι το 2 επιλέγοντας ο παίκτης 2 οποιαδήποτε από τα *e* και *f*.

Στην περίπτωση που το παιχνίδι, για οποιοδήποτε λόγο, καταλήξει τελικά στο  $h_1$ , σύμφωνα με την backward induction ο παίκτης 2, παίρνοντας ως δεδομένη την παρελθοντική επιλογή *a* θεωρεί, λογικώς, πως ο 1 πιστεύει ότι δε θα επιλεγεί το *g* αφού ο 2 έχει μηδενική χρησιμότητα. Έτσι, ο παίκτης 2 προσδοκά πως ο παίκτης 1 θα επιλέξει το *c* που του εξασφαλίζει μεγαλύτερη χρησιμότητα από το *d* και εν συνεχεία ο 2 θα καταλήξει στη στρατηγική *e*[68].

Στο γνωστικό ραδιο-περιβάλλον, ο ανταγωνισμός «αρχηγού-ακολουθού» Stackelberg χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει το πρόβλημα της βέλτιστης τιμολόγησης και διαμοίρασμού του φάσματος όταν η ζήτηση των δευτερευόντων χρηστών για εύρος ζώνης είναι ελαστική.

Στο μοντέλο Stackelberg, θεωρώντας δυο ολιγοπωλιακές εταιρείες, επιλέγονται οι ποσότητες  $q_1$  και  $q_2$  όπως στο μοντέλο Cournot, αλλά αυτές αποφασίζονται διαδοχικά και όχι ταυτόχρονα. Αν θεωρηθεί η εταιρεία 1 σαν αρχηγός και η εταιρεία 2 σαν ακόλουθος τότε η δεύτερη δρα, αφού η πρώτη έχει ανακοινώσει την ποσότητα  $q_1$  και συνεπώς η βέλτιστη απόκριση για την εταιρεία 2 δίνεται από την εξίσωση

$$\frac{\partial u_2(q_2)}{\partial q_2} = D^{-1}(q_1 + q_2) + q_2 \frac{\partial D^{-1}(q_1 + q_2)}{\partial q_2} - \frac{\partial C_2(q_2)}{\partial q_2} = 0 \quad (\text{Εξίσωση 3.7})$$

η οποία αποτελεί συνάρτηση του  $q_1$ . Για να τονισθεί πως η βέλτιστη απόκριση για την εταιρεία 2 αποτελεί συνάρτηση του  $q_1$  χρησιμοποιείται ο συμβολισμός  $q_2^*(q_1)$ . Γνωρίζοντας πως η εταιρεία 2 θα επιλέξει την ποσότητα  $q_2^*(q_1)$ , η εταιρεία 1 μπορεί να μεγιστοποιήσει το κέρδος της θέτοντας το  $q_1$  όπως προκύπτει από την εξίσωση

$$\frac{\partial u_1(q_1)}{\partial q_1} = \frac{\partial(q_1 D^{-1}(q_1 + q_2^*(q_1)) - C_1(q_1))}{\partial q_1} = 0 \text{ (Εξίσωση 3.8)}$$

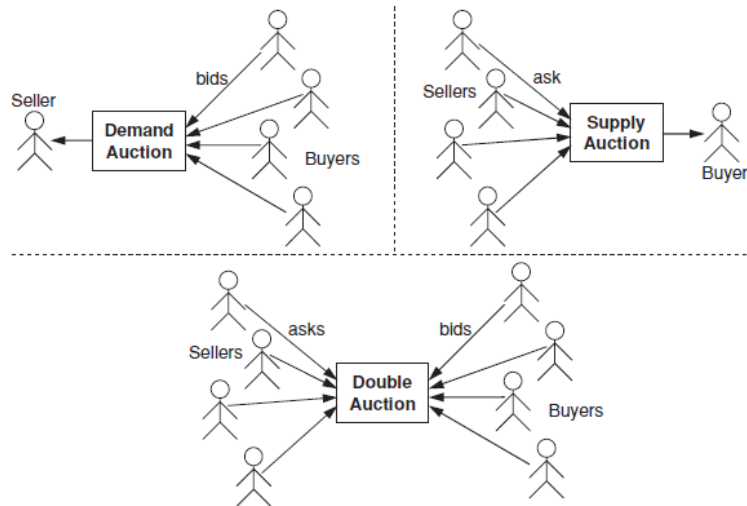
### 3.1.3 Θεωρία δημοπρασιών

Τα μέλη της αγοράς των δημοπρασιών είναι τα εξής:

- Ο πωλητής, που αποτελεί μια οντότητα της αγοράς και επιθυμεί να πουλήσει το εμπόρευμα. Ο πωλητής προσφέρει την τιμή (ζητούμενη) και την ποσότητα του εμπορεύματος προς καθορισμό μέσω της διαδικασίας της δημοπρασίας.
- Ο αγοραστής είναι η οντότητα που επιθυμεί την αγορά του εμπορεύματος. Αυτός υποβάλλει μια προσφορά ως προς την τιμή και την ποσότητα που θέλει να αποκτήσει μέσω της διαδικασίας της δημοπρασίας.
- Η εμπορική/καθαρή τιμή είναι αυτή που τελικά αποκτά το εμπόρευμα μέσα από τη δημοπρασία. Η εμπορική τιμή πρέπει να ικανοποιεί τη ζητούμενη και την προσφερόμενη τιμή που ανακοινώνουν ο πωλητής και ο αγοραστής αντίστοιχα, δηλαδή πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση από τη ζητούμενη τιμή αλλά μικρότερη ή ίση από την προσφερόμενη τιμή. [5]

Οι δημοπρασίες χρησιμοποιούνται γιατί ο πωλητής είναι αβέβαιος για την αξία που προσδίδουν στο προϊόν του αυτοί στους οποίους επιθυμεί να το πουλήσει. Τελικώς, το προϊόν αποκτάται από αυτόν που θα υποβάλλει τη μέγιστη προσφορά. Αν ο πωλητής γνώριζε ακριβώς τις αξίες, θα μπορούσε να παραχωρήσει το εμπόρευμα σε αυτόν που κατέθετε τη μεγαλύτερη προσφορά ή σε τιμή λίγο μικρότερη από αυτή που θα ήταν πρόθυμος να πληρώσει. Η αβεβαιότητα ως προς τις αξίες τόσο από την πλευρά των πωλητών, όσο και των αγοραστών αποτελεί το χαρακτηριστικό των δημοπρασιών. Σε ένα παίγνιο-θεωρητικό μοντέλο δημοπρασιών, το σύνολο των δράσεων κάθε παίκτη είναι ένα σύνολο από συναρτήσεις προσφορών ή προτεινόμενων τιμών. Κάθε συνάρτηση προσφοράς απεικονίζει την αξία (αν πρόκειται για αγοραστή) ή το κόστος (αν πρόκειται για πωλητή) του κάθε παίκτη ως προς την προσφερόμενη τιμή [67].

Οι δημοπρασίες μπορούν να χωριστούν στις δημοπρασίες προσφοράς, ζήτησης και τις διπλές δημοπρασίες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Τα τρία είδη των δημοπρασιών

Στις δημοπρασίες προσφοράς πολλαπλοί πωλητές προσφέρουν τα εμπορεύματά τους σε έναν αγοραστή. Στις δημοπρασίες ζήτησης πολλαπλοί αγοραστές καταθέτουν τις προσφορές τους για ένα εμπόρευμα το οποίο πωλείται από έναν πωλητή. Στις διπλές δημοπρασίες πολλαπλοί αγοραστές καταθέτουν τις προσφορές τους για να αγοράσουν εμπορεύματα από πολλαπλούς πωλητές.

### Μονομερής δημοπρασία

Στη μονομερή δημοπρασία υπάρχει ένας δημοπράτης που μπορεί να είναι είτε πωλητής, είτε αγοραστής στην περίπτωση που είναι δημοπρασία προσφοράς ή ζήτησης, αντίστοιχα. Αυτοί που μετέχουν στη δημοπρασία υποβάλλουν τις προσφορές τους στο δημοπράτη. Κατόπιν, ο δημοπράτης αποφασίζει αν θα πουλήσει ή θα αγοράσει αντίστοιχα, ανάλογα με τις προσφορές. Τα κύρια είδη της μονομερούς δημοπρασίας είναι η δημοπρασία αυξανόμενης τιμής (England auction), η δημοπρασία μειούμενης τιμής (Dutch auction), η δημοπρασία πρώτης τιμής σφραγισμένων προσφορών (ή απλώς δημοπρασία πρώτης τιμής) και η δημοπρασία δεύτερης τιμής σφραγισμένων προσφορών (Vickrey auction).

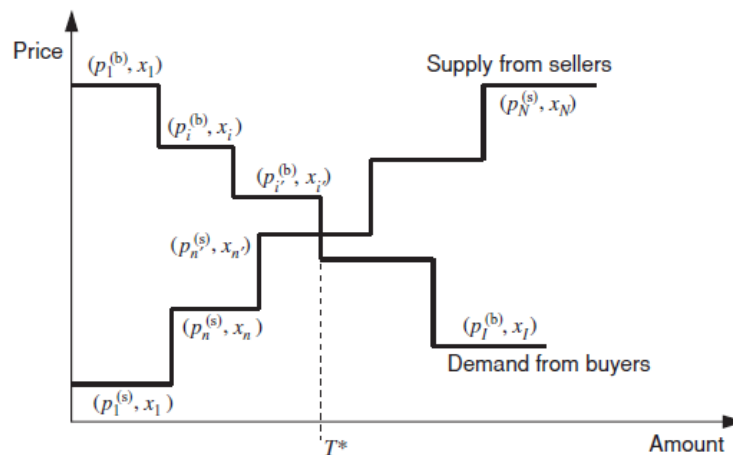
- Στη δημοπρασία αυξανόμενης τιμής ή Αγγλική, ο δημοπράτης ξεκινά θέτοντας την τιμή σε χαμηλό επίπεδο και την αυξάνει σε μικρές ποσότητες μέχρις ότου παραμείνουν δυο πλειοδότες. Σε κάθε φάση της διαδικασίας, οι πλειοδότες καταθέτουν μια προσφορά που είναι μεγαλύτερη από την τιμή που ανακοινώνει ο δημοπράτης και η διαδικασία σταματά όταν υπάρξει μόνο ένας ενδιαφερόμενος πλειοδότης, ο οποίος πληρώνει στο δημοπράτη μια ποσότητα ίση με την τιμή στην οποία εγκατέλειψε ο προτελευταίος δημοπράτης.
- Στη δημοπρασία μειούμενης τιμής ή Ολλανδική, τίθεται μια μέγιστη τιμή τέτοια ώστε κανένας από τους πλειοδότες να μην ενδιαφερθεί για την αγορά του αντικείμενου. Κατόπιν υποβάλλονται προσφορές που είναι χαμηλότερες από αυτή του δημοπράτη και ο πρώτος πλειοδότης που αποδέχεται την τιμή κερδίζει τη δημοπρασία. Αντίθετα με την Αγγλική, στην Ολλανδική δημοπρασία δε χρειάζεται να αποκαλύπτονται πληροφορίες για τους πλειοδότες παρά μόνο ο νικητής πλειοδότης και η τιμή που πρέπει να πληρώσει. Μάλιστα, χρησιμοποιείται συχνά σε περιπτώσεις όπου τα αντικείμενα πρέπει να πουληθούν γρήγορα.



- Στη δημοπρασία πρώτης τιμής σφραγισμένων προσφορών, όλοι οι πλειοδότες ανεξάρτητα υποβάλλουν σφραγισμένες προσφορές μέσα σε φακέλους. Ο δημοπράτης ανοίγει τις προσφορές και καθορίζει τον νικητή πλειοδότη, δηλαδή αυτόν που έχει καταθέσει την υψηλότερη προσφορά και εν συνεχεία αυτός πληρώνει την τιμή που κατέθεσε.
- Η δημοπρασία δεύτερης τιμής σφραγισμένων προσφορών, διαφέρει από τη δημοπρασία πρώτης τιμής μόνο στο γεγονός ότι ο νικητής πλειοδότης πρέπει να πληρώσει την τιμή που κατέθεσε ο πλειοδότης με την δεύτερη καλύτερη προσφορά.[69]

### Διπλή δημοπρασία

Σε μια διπλή δημοπρασία[70] υπάρχουν  $I$  αγοραστές και  $N$  πωλητές. Κάθε αγοραστής  $i$  θέλει να αγοράσει  $x_i$  τεμάχια και κάθε πωλητής  $n$  θέλει να πουλήσει  $y_n$  τεμάχια. Η πληροφορία για τα  $x_i$  και  $y_n$  είναι διαθέσιμη δημόσια. Στη διπλή δημοπρασία, ένας αγοραστής  $i$  αναγγέλλει μια τιμή  $p_i^{(b)}$  (προσφερόμενη τιμή) για κάθε μονάδα εμπορεύματος, ενώ ο πωλητής  $n$  αναγγέλλει μια τιμή  $p_n^{(s)}$  (ζητούμενη τιμή). Χωρίς βλάβη της γενικότητας, μπορεί να υποτεθεί ότι  $p_1^{(b)} > p_2^{(b)} > \dots > p_I^{(b)}$  και  $p_1^{(s)} < p_2^{(s)} < \dots < p_N^{(s)}$ . Κάθε πωλητής ή αγοραστής μπορεί να θέσει διαφορετικές τιμές για διαφορετικά προϊόντα, όπου ο αγοραστής και ο πωλητής αγοράζει και πουλά κάθε αντικείμενο ξεχωριστά. Για να καθοριστεί η εμπορική τιμή στη διπλή δημοπρασία, οι απαιτούμενες ποσότητες από όλους τους αγοραστές τοποθετούνται κατά αύξουσα σειρά τιμής και οι προσφερόμενες ποσότητες από τους πωλητές κατά φθίνουσα σειρά τιμής. Ακολουθεί το Σχήμα 3.3 το οποίο συνοψίζει τα παραπάνω.



Σχήμα 3.3: Παράδειγμα ζήτησης και προσφοράς στη διπλή δημοπρασία

Στο σημείο  $T^*$  οι καμπύλες της συνολικής προσφοράς και ζήτησης τέμνονται και επομένως οι  $n'$  πωλητές θα πουλήσουν  $T^*$  τεμάχια σε  $i'$  αγοραστές. Υπάρχουν δυο περιπτώσεις που μπορεί να καθορίσουν την τιμή και την ποσότητα στο σημείο  $T^*$ .

- Περίπτωση 1: Οι προσφερόμενες και οι ζητούμενες τιμές ικανοποιούν την ανισότητα  $p_i^{(b)} \geq p_n^{(s)} \geq p_{i+1}^{(b)}$  και η συνολική προσφορά και ζήτηση ικανοποιούν την ανισότητα

$\sum_{n=1}^{n'-1} y_n \leq \sum_{i=1}^{i'} x_i \leq \sum_{n=1}^{n'} y_n$ . Σε αυτή την περίπτωση οι πωλητές  $n = \{1, \dots, n'\}$  πουλούν τα τεμάχια  $y_n$  σε τιμή  $p_n^{(s)}$  και οι αγοραστές  $i = \{1, \dots, i'\}$  αγοράζουν στην τιμή  $p_i^{(b)}$ . Η ποσότητα που αγοράζει ο κάθε αγοραστής είναι

$$\left\lfloor x_i - \frac{\sum_{j=1}^{i-1} x_j - \sum_{j=1}^{n'-1} y_j}{i' - 1} \right\rfloor.$$

- Περίπτωση 2: Οι προσφερόμενες και οι ζητούμενες τιμές ικανοποιούν την ανισότητα  $p_{n'+1}^{(s)} \geq p_{i'}^{(b)} \geq p_{n'}^{(s)}$  και η συνολική προσφορά και ζήτηση ικανοποιούν την ανισότητα

$\sum_{i=1}^{i-1} x_i \leq \sum_{n=1}^{n'} y_n \leq \sum_{i=1}^{i'} x_i$ . Σε αυτή την περίπτωση οι πωλητές  $n = \{1, \dots, n'\}$  πουλούν τα τεμάχια  $y_n$  σε τιμή  $p_n^{(s)}$  και οι αγοραστές  $i = \{1, \dots, i'\}$  αγοράζουν στην τιμή  $p_i^{(b)}$ . Η ποσότητα που αγοράζει ο κάθε αγοραστής είναι

$$\left\lfloor y_n - \frac{\sum_{j=1}^{n'-1} y_j - \sum_{j=1}^{i-1} x_j}{n' - 1} \right\rfloor. [5]$$

### 3.1.4 Θεωρία χρησιμότητας

Γενικά, η χρησιμότητα αποτελεί μια εκχώρηση τιμών (αριθμών) στην τρέχουσα λειτουργική κατάσταση, ώστε όσο περισσότερο το γνωστικό σύστημα προσεγγίζει την ικανοποίηση του στόχου να αυξάνεται η τιμή που εκχωρείται στη συγκεκριμένη λειτουργική κατάσταση. Η συνάρτηση χρησιμότητας ενσωματώνει έναν αριθμό μετρικών απόδοσης, που εξαρτώνται από το περιβάλλον και μπορεί να αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου. Η επιλογή των κατάλληλων συναρτήσεων χρησιμότητας μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργία του δικτύου.

Σε ορισμένες γνωστικές εφαρμογές μπορεί να υπάρχει κάποιος απλός περιορισμός που οδηγεί σε περιγραφή του στόχου με συνάρτηση χρησιμότητας που έχει απλή μορφή. Αυτή μπορεί να είναι μονότονη, μη μονότονη (κοίλη-κυρτή) ή άλλης μορφής. Βέβαια, όταν ο στόχος χαρακτηρίζεται από πολλαπλούς ή ανταγωνιστικούς περιορισμούς η συνάρτηση χρησιμότητας μπορεί να γίνει πιο περίπλοκη[71].

Η έννοια της χρησιμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ποσοτικοποιήσει την ικανοποίηση μια γνωστικής οντότητας. Στην οικονομική θεωρία, η χρησιμότητα εκφράζει την αντίληψη που έχει ο πελάτης για το αν αισθάνεται χαρά ή ικανοποίηση. Το 1870, ο William S. Jevons και ο Leon Walras εισήγαγαν τη μετρούμενη χρησιμότητα. Ενώ, ο William S. Jevons χρησιμοποίησε τη χρησιμότητα για να αναπαραστήσει την ικανοποίηση από την ανταλλαγή των αγαθών και υπηρεσιών, ο Leon Walras χρησιμοποίησε τη χρησιμότητα για την ανάλυση των καμπυλών ζήτησης. Στη μοντέρνα οικονομική θεωρία, η χρησιμότητα εκφράζει τα προσωπικά αισθήματα των καταναλωτών που ανακύπτουν από την κατανάλωση των αγαθών και υπηρεσιών και ταυτόχρονα επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την κατανάλωση των διαφόρων εμπορευμάτων.

Η κύρια έννοια της χρησιμότητας είναι η προτίμηση, η οποία καταδεικνύει την επιθυμία του καταναλωτή ανάμεσα σε διαφορετικές επιλογές, όμως η προτίμηση δεν μπορεί να ποσοτικοποιήσει πόσο περισσότερο ο καταναλωτής προτιμά ένα εμπόρευμα από ένα άλλο.

Αυτού του είδους η χρησιμότητα ονομάζεται ταξική (ordinal) και δεν έχει κάποιο αριθμητικό νόημα, ενώ αυτή που έχει αριθμητικό νόημα ονομάζεται αριθμητική (cardinal). Όσο περισσότερο καταναλώνεται ένα προϊόν τόσο αυξάνεται η cardinal χρησιμότητα αυτού. Βασιζόμενοι στη μετρούμενη χρησιμότητα, ένας λογικός καταναλωτής πάντα προσπαθεί να τη μεγιστοποιήσει λαμβάνοντας τη βέλτιστη απόφαση. Όμως, άλλοι παράγοντες όπως οι τιμές των εμπορευμάτων και το επίπεδο του εισοδήματος των καταναλωτών μπορεί να επηρεάσουν την απόφαση που θα οδηγήσει στη μεγιστοποίηση της χρησιμότητας. Θεωρώντας ένα δεδομένο επίπεδο εισοδήματος λιγότερες μονάδες εμπορεύματος μπορούν να αγοραστούν αν η τιμή είναι υψηλότερη. Έτσι, η τιμή και το επίπεδο εισοδήματος μπορούν να περιορίσουν την κατανάλωση ενός καταναλωτή.

### Εφαρμογή της χρησιμότητας στα ασύρματα δίκτυα

Η έννοια της χρησιμότητας χρησιμοποιείται ευρέως στα ασύρματα δίκτυα για την επίλυση του προβλήματος της διαχείρισης των ραδιοπόρων. Δεδομένου ότι η συνάρτηση χρησιμότητας, μπορεί να παρέχει σε ένα αφαιρετικό επίπεδο, την επίδοση για την ποιότητα της υπηρεσίας-QoS (όπως ρυθμαπόδοση, SIR, καθυστέρηση), αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη μοντελοποίηση της κατανομής των ραδιοπόρων. Βασιζόμενες στις συναρτήσεις χρησιμότητας έχουν αναπτυχθεί δυο προσεγγίσεις για την κατανομή των ραδιοπόρων, η κλασική βελτιστοποίηση και η θεωρία παιγνίων.

Στην προσέγγιση κλασικής βελτιστοποίησης μια μοναδική αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται με πολλαπλούς περιορισμούς. Αυτή μπορεί να είναι, για παράδειγμα, η μεγιστοποίηση της χρησιμότητας των χρηστών με περιορισμό ως προς τους πόρους, όπως για παράδειγμα περιορισμένη χωρητικότητα ζεύξης. Εναλλακτικά, ο σκοπός μπορεί να είναι η μεγιστοποίηση της χρήσης των πόρων ενώ η χρησιμότητα των χρηστών διατηρείται πάνω από ένα συγκεκριμένο ελάχιστο επίπεδο.

Από την άλλη πλευρά η θεωρία παιγνίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατανομή των πόρων σε περιβάλλοντα που αποτελούνται από πολλαπλές οντότητες. Αυτές οι οντότητες μπορεί να έχουν συγκρουόμενα συμφέροντα. Η χρησιμότητα μπορεί να περιγράψει τις ανταμοιβές κάθε οντότητας που συμμετέχει στο παίγνιο. Ο σκοπός της θεωρίας παιγνίων είναι να παρέχει «ευσταθείς» λύσεις στην ισορροπία με την ταυτόχρονη παρουσία πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων, μια για κάθε οντότητα. Η ευστάθεια στη λύση εξασφαλίζει πως όλες οι οντότητες είναι ικανοποιημένες και καμία δεν επιθυμεί να αποχωρήσει από αυτή [5].

Διαφορετικές συναρτήσεις χρησιμότητας υπάρχουν για την ποσοτικοποίηση του επιπέδου της ικανοποίησης σχετικά με τις επιδόσεις της ποιότητας υπηρεσίας στα ασύρματα δίκτυα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν αυτές που περιλαμβάνουν το ρυθμό μετάδοσης. Αυτός αποτελεί μια σημαντική μετρική της QoS επίδοσης τόσο στα ασύρματα, όσο και στα ενσύρματα δίκτυα. Το πρόβλημα μεγιστοποίησης της χρησιμοποίησης του δικτύου μπορεί να δομηθεί όπως παρακάτω [72]. Ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο έχει πολλαπλές ζεύξεις και κάθε ζεύξη έχει χωρητικότητα  $C$ . Ακόμα, υπάρχουν πολλαπλές πηγές κίνησης και ο ρυθμός μετάδοσης κάθε πηγής είναι  $r$ . Η χρησιμότητα που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης είναι  $U(r)$ . Κάθε ζεύξη μπορεί να μοιραστεί μεταξύ πολλαπλών πηγών. Ο σκοπός της βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση της χρησιμότητας ενώ, παράλληλα, ο ρυθμός μετάδοσης που κατανέμεται σε κάθε ζεύξη είναι μικρότερος ή ίσος με τη

χωρητικότητα. Στην περίπτωση αυτή η συνάρτηση χρησιμότητας πρέπει να είναι κοίλη. Διάφορες συναρτήσεις χρησιμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ποσοτικοποιήσουν την ικανοποίηση του χρήστη ως προς το ρυθμό μετάδοσης σε ένα ασύρματο σύστημα[73] :

- Η εκθετική συνάρτηση χρησιμότητας δίνεται από τη σχέση

$$U(r) = A + B(r + C)^D \text{ (Εξίσωση 3.9)}$$

όπου  $r$  είναι ο ρυθμός μετάδοσης,  $D < 1$ , και  $B$  και  $A$  είναι σταθερές.

- Η λογαριθμική συνάρτηση χρησιμότητας δίνεται από τη σχέση

$$U(r) = A + B \log(r + C) \text{ (Εξίσωση 3.10)}$$

- Η συνάρτηση χρησιμότητας για την ισχύ δίνεται από τη σχέση

$$U(r) = A + B \times C^r \text{ (Εξίσωση 3.11)}$$

όπου  $0 < C < 1$ .

Οι παραπάνω συναρτήσεις χρησιμότητας θεωρήθηκαν για το ρυθμό μετάδοσης καθώς η ικανοποίηση των χρηστών, ιδιαίτερα για ελαστικές εφαρμογές, κοραίνεται όταν ο ρυθμός μετάδοσης είναι υψηλός. Παρατηρήθηκε πως τα εμπειρικά δεδομένα που προέρχονται από τον ερευνητικό τομέα ταιριάζουν στις συγκεκριμένες συναρτήσεις χρησιμότητας αρκετά καλά[73].

### 3.2 Επισκόπηση σχετικής βιβλιογραφίας

Στο [74], οι συγγραφείς προτείνουν έναν ενεργειακά αποδοτικό μηχανισμό διαμοιρασμού του φάσματος βασισμένο στην αναμετάδοση μέσω δυο ανεξάρτητων μονοπατιών. Υπάρχει μια πρωτεύουσα ζεύξη και δευτερεύοντες χρήστες που δρουν σαν αναμεταδότες για τους πρωτεύοντες με αντάλλαγμα την πρόσβαση στο φάσμα. Σύμφωνα με την αναμετάδοση μέσω δυο ανεξάρτητων μονοπατιών (Two-Path Successive Relaying-TPSR), δυο half-duplex αναμεταδότες προωθούν το πρωτεύον σήμα στον προορισμό και έτσι μειώνεται ο χρόνος μετάδοσης και η καταναλισκόμενη ενέργεια του πρωτεύοντα χρήστη. Συνεπώς στον υπολειπόμενο χρόνο μεταδίδουν οι δευτερεύοντες χρήστες. Προκειμένου να καθοριστεί ο βέλτιστος χρόνος και η κατανομή της ισχύος, χρησιμοποιείται μια συνάρτηση χρησιμότητας που αντανακλά την αντιστάθμιση μεταξύ του ρυθμού μετάδοσης και της κατανάλωσης ενέργειας. Ακόμα, προτείνεται ένας κατανεμημένος αλγόριθμος επιλογής για την εύρεση των δυο δευτερευόντων κόμβων που μεγιστοποιούν τη χρησιμότητα και θα λειτουργήσουν σαν αναμεταδότες για το πρωτεύον σύστημα. Ο TPSR μηχανισμός διαμοιρασμού του φάσματος επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα από το συμβατικό σχήμα της αποκωδικοποίησης και προώθησης (decode and forward) όσον αφορά το ρυθμό μετάδοσης που επιτυγχάνεται για όλο το δίκτυο και την ταυτόχρονη εξοικονόμηση ενέργειας για τον πρωτεύοντα χρήστη.

Στο [75], οι συγγραφείς περιγράφουν ένα πρωτεύον και ένα κυψελωτό δευτερεύον δίκτυο τα οποία συνυπάρχουν και προτείνουν τη συνεργασία μεταξύ των δυο δικτύων, όπου οι δευτερεύοντες χρήστες λειτουργούν σαν αναμεταδότες για τους πρωτεύοντες. Μάλιστα, αυτά αποτελούν δίκτυα με υποδομή όπου τα δεδομένα μεταδίδονται μεταξύ των τελικών χρηστών και των αντιστοίχων σημείων πρόσβασης (Access Points-AP). Ειδικότερα, το πρωτεύον AP αποφασίζει τη στρατηγική για την επιλογή των αναμεταδοτών και τη φασματική τιμή στη μονάδα του χρόνου και κατόπιν το δευτερεύον AP αποφασίζει πόσο

χρόνο θα επικοινωνήσει από το πρωτεύον δίκτυο, για να έχει πρόσβαση στο φάσμα. Η διαδοχή στη διαδικασία απόφασης της στρατηγικής που θα ακολουθηθεί, μοντελοποιείται μέσω του παιγνίου Stackelberg, όπου το πρωτεύον δίκτυο έχει το ρόλο του αρχηγού και το δευτερεύον δίκτυο του ακολούθου. Στο μοντέλο με τους πολλαπλούς PUs και SUs, που αναλύεται, αποδεικνύεται ότι υπάρχει μοναδική ισορροπία Nash, η οποία παρέχει τη βέλτιστη στρατηγική για την επιλογή των αναμεταδοτών, την κατανομή του χρόνου πρόσβασης στο φάσμα και τη φασματική τιμή που τίθεται για τα δυο δίκτυα. Τέλος, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φανερώνουν πως τα δυο δίκτυα επιτυγχάνουν μεγαλύτερη χρησιμότητα όσον αφορά το ρυθμό μετάδοσης και το κέρδος στο πλαίσιο της συνεργατικής μετάδοσης.

Στο [76], οι συγγραφείς μελετάνε ένα σενάριο στο οποίο υπάρχει ένα ζεύγος πρωτεύοντος πομπού και δέκτη που κατέχει φάσμα και μπορεί να το επικοινωνήσει σε ένα δευτερεύον δίκτυο με αντάλλαγμα τη συνεργασία (αναμετάδοση) σε ένα πλαίσιο κεντρικοποιημένης χωροχρονικής κωδικοποίησης (Distributed Space-Time Coding-DSTC). Στο δευτερεύον δίκτυο κάθε πομπός κατέχει πληροφορία για μετάδοση προς ένα δεδομένο δευτερεύοντα δέκτη (κανάλι παρεμβολής). Στο χρονικό διάστημα που είναι διαθέσιμο στους δευτερεύοντες χρήστες, το υποσύνολο των επιλεγμένων δευτερευόντων εκπομπών ανταγωνίζεται για τη μετάδοση στους αντίστοιχους δέκτες χρησιμοποιώντας αποκεντρωμένο έλεγχο ισχύος. Οι δευτερεύοντες χρήστες προσπαθούν να μεγιστοποιήσουν μια συνάρτηση χρησιμότητας, η οποία αντισταθμίζει τα κόστη μεταξύ της μεταδιδόμενης ισχύος που χρησιμοποιούν προς όφελος της μετάδοσης των πρωτευόντων χρηστών και του βαθμού QoS που επιτυγχάνουν. Με τη σειρά τους, οι πρωτεύοντες χρήστες επιθυμούν τη βελτιστοποίηση της στρατηγικής τους όσον αφορά την αντιστάθμιση του χρόνου που επικοινωνιάζουν στους δευτερεύοντες χρήστες και του οφέλους από την αναμετάδοση της πρωτεύουσας πληροφορίας. Συνεπώς, στο περιγραφόμενο σενάριο, υπάρχει μια ιεραρχική δομή στην οποία οι πρωτεύοντες χρήστες επιθυμούν να μεγιστοποιήσουν το βαθμό QoS ως προς το ρυθμό μετάδοσης ή την πιθανότητα αποκοπής, βασιζόμενοι στη γνώση της επίδρασης που θα έχει η απόφασή τους στη συμπεριφορά του δευτερεύοντος δικτύου. Το σενάριο αυτό αναπτύσσεται στο πλαίσιο του παιγνίου Stackelberg και μελετώνται τόσο η περίπτωση της γνώσης της στιγμιαίας κατάστασης του καναλιού, όσο και η πιο πρακτική περίπτωση της μακροχρόνιας γνώσης της κατάστασης του καναλιού. Στη δεύτερη εκδοχή, η πρωτεύουσα ζεύξη γνωρίζει τα στατιστικά μεγέθη των διαλείψεων των καναλιών ολόκληρου του συστήματος, ενώ οι δευτερεύοντες κόμβοι είναι ενήμεροι για τα στατιστικά των διαλείψεων στο δευτερεύον δίκτυο. Μάλιστα, θεωρείται πως τα στατιστικά των διαλείψεων παραμένουν σταθερά για μεγάλο αριθμό μεταδιδόμενων συμβόλων μετατρέποντας, έτσι, την εκτίμηση του καναλιού σε μια εφικτή διαδικασία. Επομένως οι συγγραφείς μελετούν το διαμοιρασμό του φάσματος, όχι μόνο ως προς τις αμοιβές και τα κόστη, αλλά και τη βελτιστοποίηση της ποιότητας υπηρεσίας των πρωτευόντων χρηστών μέσω της συνεργασίας με τα δευτερεύοντα τερματικά.

Στο [77], οι συγγραφείς προτείνουν ένα μηχανισμό πρόσβασης στο φάσμα βασισμένο στην έννοια της αγοράς. Η αγορά αυτή περιλαμβάνει πολλαπλούς πρωτεύοντες χρήστες που ο καθένας πουλάει το προσωρινά αχρησιμοποίητο φάσμα του σε δευτερεύοντες χρήστες. Προτείνεται ένας μηχανισμός διαμοιρασμού φάσματος βασισμένος στην τιμολόγηση ο οποίος ενθαρρύνει τους δευτερεύοντες χρήστες να κάνουν χρήση του καναλιού με τυχαίο και κατανομημένο τρόπο. Με αυτόν τον τρόπο, μετριάζεται η πολυπλοκότητα και η χρονική επιβάρυνση σε σχέση με τον κεντρικοποιημένο τρόπο. Αναπτύσσεται ένα παίγνιο

Stackelberg 3 σταδίων στο οποίο οι πρωτεύοντες χρήστες ανταγωνίζονται όσον αφορά τις τιμές για τη φασματική πρόσβαση και τις προσφερόμενες φασματικές ευκαιρίες. Μάλιστα, μελετάται η περίπτωση που οι πρωτεύοντες χρήστες είναι ομοιογενείς, δηλαδή οι στρατηγικές τους περιγράφονται από το ίδιο είδος συνάρτησης χρησιμότητας. Στο πρώτο στάδιο οι πρωτεύοντες χρήστες καθορίζουν, ταυτόχρονα, τις διαθέσιμες φασματικές ευκαιρίες και σε δεύτερο στάδιο ανακοινώνουν, ταυτόχρονα, τις τιμές στους δευτερεύοντες χρήστες. Στο τρίτο στάδιο κάθε δευτερεύων χρήστης επιλέγει την προσφορά μόνο εκείνου του πρωτεύοντα χρήστη που του εξασφαλίζει μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσής του. Μάλιστα τα σημεία ισορροπίας Nash στο συγκεκριμένο παίγνιο υπάρχουν και εξαρτώνται από παραμέτρους του συστήματος όπως τον αριθμό των πρωτευόντων χρηστών, το επίπεδο χρησιμότητας αυτών, τον προϋπολογισμό των δευτερευόντων χρηστών και την ελαστικότητα της φασματικής ζήτησης. Αν ο αριθμός των πρωτευόντων χρηστών είναι μεγαλύτερος από ένα κατώφλι τότε υπάρχουν άπειρα σημεία ισορροπίας του παιγνίου, όπου η τιμή ισορροπίας μειώνεται στην ελάχιστη τιμή, στην οποία μπορεί να περικοπεί το κέρδος των πρωτευόντων χρηστών. Αν ο αριθμός των πρωτευόντων χρηστών είναι μικρότερος από το κατώφλι τότε υπάρχει μοναδική ισορροπία στο παίγνιο. Ο μηχανισμός αυτός, που είναι βασισμένος στην τιμολόγηση, μπορεί να προκαλέσει μικρότερη χρονική επιβάρυνση συγκρινόμενος με ένα μηχανισμό βασισμένο στη δημοπρασία. Τέλος, προτείνεται επαναληπτικός αλγόριθμος για την εξεύρεση της ισορροπίας.

Στο [78], οι συγγραφείς προτείνουν μια συνεργατική μέθοδο ανίχνευσης φάσματος ώστε να βελτιωθεί η ανιχνευτική επίδοση των γνωστικών χρηστών, ιδιαιτέρως όταν λειτουργούν σε κανάλι που αντιμετωπίζει σοβαρές διαλείψεις. Στο σχήμα αυτό οι χρήστες με αποδεκτό λαμβανόμενο SNR επιτρέπεται να οδηγούν την ανιχνευτική διαδικασία του δικτύου και να μοιράζονται τις παρατηρήσεις τους με αυτούς που αντιμετωπίζουν ισχυρές διαλείψεις. Καθώς οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να θεωρηθούν είτε αρχηγοί, είτε ακόλουθοι, αναλόγως του λαμβανόμενου SNR από των πρωτεύοντα εκπομπό, η ανιχνευτική διαδικασία μπορεί να μοντελοποιηθεί μέσω του παιγνίου Stackelberg. Το αποτέλεσμα της φασματικής ανίχνευσης του δικτύου εξάγεται από τους δευτερεύοντες κόμβους-αρχηγούς, που αποτελούν τους πιο αξιόπιστους κόμβους, οι οποίοι μπορούν να ωφελήσουν τους δευτερεύοντες κόμβους με χαμηλά λαμβανόμενο SNR. Οι δευτερεύοντες χρήστες-αρχηγοί εκπέμπουν την πληροφορία ανίχνευσης στους ακόλουθους και στη συνέχεια οι τελευταίοι λαμβάνουν δράση. Συνεπώς, η πιθανότητα σωστής ανίχνευσης σε ολόκληρο το δίκτυο αυξάνεται αφού συμμετέχουν χρήστες που λαμβάνουν με αποδεκτό τρόπο το πρωτεύον σήμα. Ακόμα, παρουσιάζονται τα μειονεκτήματα της συμβατικής κεντρικοποιημένης ή αποκεντρωμένης φασματικής ανίχνευσης. Τέλος, με τον προτεινόμενο μηχανισμό βελτιώνεται η μέση πιθανότητα ανίχνευσης ολόκληρου του δικτύου σε σύγκριση με τη μη συνεργατική περίπτωση, ιδιαίτερα όταν περισσότεροι δευτερεύοντες χρήστες υποφέρουν από διαλείψεις.

Στο [79], οι συγγραφείς αναπτύσσουν την πρώτη αναλυτική μελέτη για τη βέλτιστη επένδυση και τις αποφάσεις τιμολόγησης ενός γνωστικού κινητού εικονικού χειριστή δικτύου (Cognitive Mobile Virtual Network Operator- C-MVNO) υπό την αβεβαιότητα για τη φασματική προσφορά. Ακόμα, η μελέτη περιλαμβάνει εκτός από το C-MVNO και δευτερεύοντες, μη αδειοδοτημένους χρήστες. Ο C-MVNO, συγκρινόμενος με τον παραδοσιακό MVNO που αποκτά φάσμα μέσω μακροχρόνιων συμβάσεων επικοινωνίας, μπορεί να κατέχει φάσμα για σύντομο χρονικό διάστημα ανιχνεύοντας τις «φασματικές

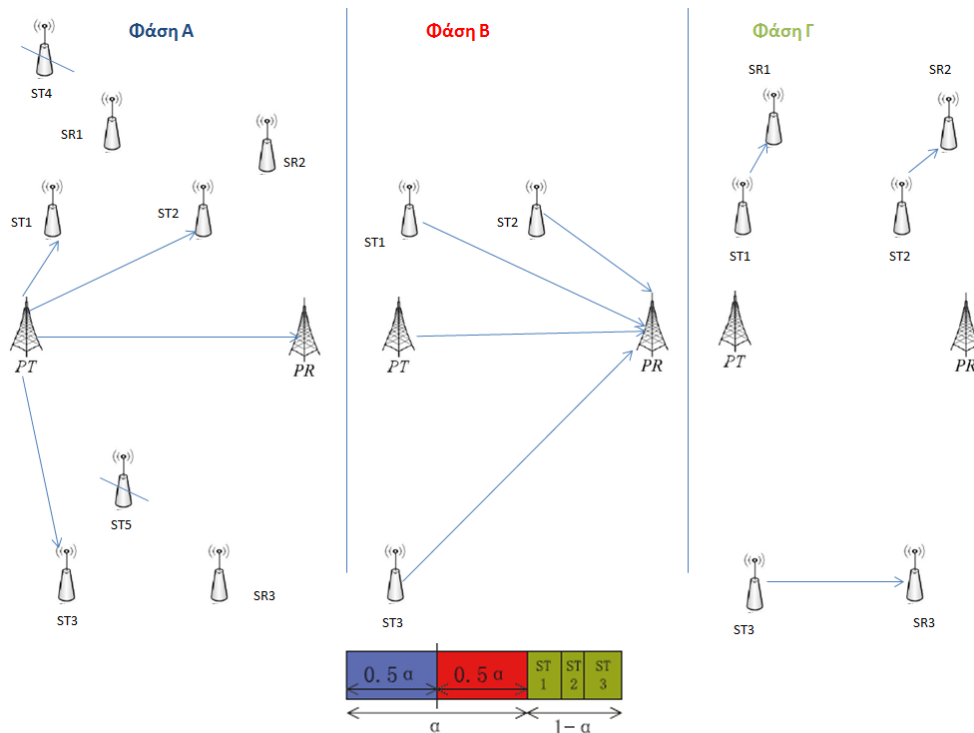
τρύπες» των αδειοδοτημένων ζωνών και επικοινωνιάζοντάς τες από τον φασματικό κάτοχο. Έτσι, ο C-MVNO μπορεί να προβεί σε ευέλικτες επενδύσεις και αποφάσεις τιμολόγησης ώστε να ικανοποιεί τις τρέχουσες απαιτήσεις των δευτερευόντων, μη αδειοδοτημένων χρηστών. Επίσης, αυτός πρέπει να καθορίσει τις βέλτιστες ποσότητες της ανίχνευσης και της επικοινωνίας φάσματος λαμβάνοντας υπόψη την αντιστάθμιση μεταξύ του κόστους και της αβεβαιότητας. Επιπλέον, πρέπει να καθορίσει τη βέλτιστη τιμή πώλησης του φάσματος στους δευτερεύοντες χρήστες θεωρώντας την ανομοιογένεια των χρηστών τόσο στα επίπεδα ισχύος μετάδοσης, όσο και στα κέρδη των καναλιών. Η μοντελοποίηση και η ανάλυση των αποφάσεων και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ του C-MVNO και των δευτερευόντων χρηστών γίνεται μέσω ενός παιγνίου Stackelberg 4 σταδίων. Σύμφωνα με αυτό, ο χειριστής φάσματος (φασματικός μεσίτης), ως αρχηγός, αποφασίζει την ποσότητα ανίχνευσης στο πρώτο στάδιο και την ποσότητα επικοινωνίας στο δεύτερο στάδιο. Στο τρίτο στάδιο ανακοινώνεται η τιμή επικοινωνίας στους δευτερεύοντες χρήστες και στο τέταρτο στάδιο οι τελευταίοι αποφασίζουν το φασματικό τμήμα που θα επικοινωνιάσουν ώστε να μεγιστοποιήσουν τις προσωπικές τους αμοιβές. Καθώς η ανίχνευση είναι φθηνότερη από την επικοινωνία είναι επωφελές για το χειριστή πρώτα να ανιχνεύει και κατόπιν να επικοινωνιάζει μόνο το επιπλέον φάσμα, αν το αποτέλεσμα της ανίχνευσης δεν είναι επαρκές. Έτσι, μεγιστοποιείται το κέρδος του χειριστή.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΙΓΝΙΟΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΓΙΑ ΤΟ ΔΙΑΜΟΙΡΑΣΜΟ ΕΥΡΟΥΣ ΖΩΝΗΣ ΣΕ ΓΝΩΣΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται διεξοδικά το σχήμα διαμοιρασμού εύρους ζώνης σε γνωστικά ραδιοσυστήματα που παρουσιάζεται στο [80]. Στο συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιείται η θεωρία παιγνίων και συγκεκριμένα τα παίγνια Stackelberg προκειμένου να βρεθεί ο βέλτιστος διαμοιρασμός εύρους ζώνης. Επιπλέον, το σχήμα που αναπτύσσεται περιλαμβάνει τόσο την περίπτωση ύπαρξης μοναδικού PU και πολλαπλών SUs, όσο και την ύπαρξη πολλαπλών PUs μαζί με πολλαπλούς SUs. Στη συνέχεια, περιγράφεται αρχικά το γενικό μοντέλο που χρησιμοποιείται και παρουσιάζονται οι συναρτήσεις χρησιμότητας που λαμβάνονται υπόψη. Έπειτα, παρουσιάζονται οι αναλυτικές σχέσεις για τις βέλτιστες χρησιμότητες τόσο των SUs, όσο και του PU για το σενάριο με έναν μοναδικό PU. Επίσης, περιγράφεται πως το περιγραφόμενο παίγνιο αποτελεί ένα παίγνιο Stackelberg και αποδεικνύεται η μοναδικότητα της ισορροπίας Nash. Αντίστοιχα μελετάται και το σενάριο ύπαρξης πολλαπλών PUs. Τέλος παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης, μελετώντας τη συμπεριφορά των προτεινόμενων αλγορίθμων για διάφορες παραμέτρους.

### 4.1 Μοντέλο συστήματος και συνάρτηση χρησιμότητας

#### 4.1.1 Μοντέλο συστήματος



Σχήμα 4.1: Εποπτική αναπαράσταση του μοντέλου του συστήματος



Το μοντέλο του συστήματος με έναν πρωτεύοντα και πολλαπλούς δευτερεύοντες χρήστες παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. Στο μοντέλο αυτό, κάθε πλαίσιο διαιρείται σε δυο τμήματα: το τμήμα  $\alpha$  του πλαισίου εκχωρείται στον πρωτεύοντα χρήστη για τη μετάδοση των δεδομένων του και το υπόλοιπο  $(1-\alpha)$  τμήμα του πλαισίου εκχωρείται για τη μετάδοση των δευτερευόντων χρηστών. Στο αρχικό τμήμα  $\alpha$ , που αποτελεί το συνεργατικό στάδιο, το πρώτο  $\frac{1}{2}\alpha$  μέρος αυτού χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων από τον πρωτεύοντα πομπό (Primary Transmitter-PT) στον πρωτεύοντα δέκτη (Primary Receiver-PR) και στους δευτερεύοντες πομπούς (Secondary Transmitters-STs) και το υπόλοιπο  $\frac{1}{2}\alpha$  τμήμα του πλαισίου χρησιμοποιείται από τους PT και STs για να μεταδώσουν δεδομένα στον PR. Στο υπολειπόμενο  $1-\alpha$  τμήμα του πλαισίου, που αποτελεί το στάδιο επικοινωνίας, οι επιλεγμένοι SUs αποκτούν πρόσβαση στο κανάλι με τη μέθοδο της χρονικής πολυπλεξίας (Time-Division Multiplexing Access-TDMA). Ο χρόνος πρόσβασης κάθε SU, που ορίζεται ως  $t_i$ , είναι ανάλογος της συνεισφοράς αυτού,  $c_i$ , στο συνεργατικό στάδιο. Μάλιστα, το μέγεθος  $t_i$  ορίζεται ως εξής:

$$t_i = (1 - \alpha) \frac{c_i}{\sum_{j \in S} c_j} \quad (\text{Εξίσωση 4.1})$$

όπου με  $S$  παριστάνεται το σύνολο των δευτερευόντων χρηστών που επιλέγονται ως αναμεταδότες από τον πρωτεύοντα χρήστη. Επίσης, θεωρείται ότι τα κανάλια μεταξύ δυο οποιωνδήποτε κόμβων (PTs και PRs, STs και SRs και STs και PRs) μοντελοποιούνται σαν ανεξάρτητες, μιγαδικές, τυχαίες, Γκαουσιανές μεταβλητές που μεταβάλλονται μόνο μεταξύ των πλαισίων και όχι μέσα στο ίδιο πλαίσιο. Ειδικότερα, οι συνθήκες που επικρατούν στα κανάλια ακολουθούν το Nakagami- $m$  μοντέλο διαλείψεων. Σύμφωνα με αυτό η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των κερδών ισχύος των καναλιών δίνεται από τη σχέση

$$f_j(G_j) = \frac{m_j^{m_j} G_j^{m_j-1}}{\Gamma(m_j)} e^{-m_j G_j}, \quad \text{όπου } \Gamma(\cdot) \text{ είναι η συνάρτηση Γάμμα και η παράμετρος } m_j$$

δηλώνει το λόγο της ισχύος του σήματος Line of Sight (LoS) προς την πολυδιαδρομική συνιστώσα. Πιο συγκεκριμένα, η παράμετρος αυτή μοντελοποιεί το βαθμό εξασθένησης του σήματος με  $m_j = 1$  να οδηγεί σε κατανομή Rayleigh,  $m_j = 0.5$  να αντανακλά πιο σοβαρές συνθήκες εξασθένησης και  $m_j > 1$  να αναφέρεται σε προσεγγίσεις λογαριθμοκανονικών καναλιών.

Στο περιγραφόμενο σενάριο, για την επίτευξη της συνεργασίας μεταξύ του PU και των SUs χρησιμοποιείται το συνεργατικό πρωτόκολλο ενίσχυσης και μετάδοσης (amplify-and-forward). Ο σηματοθορυβικός λόγος, SNR, στον PR λόγω της απευθείας μετάδοσης του PT συμβολίζεται με  $\Gamma_p$  και ορίζεται ως εξής:

$$\Gamma_p = \frac{P_o G_p}{\sigma^2} \quad (\text{Εξίσωση 4.2})$$

Με  $P_o$  παριστάνεται η ισχύς του PT που χρησιμοποιεί για τη μετάδοσή του,  $G_p$  είναι το κέρδος καναλιού για τη ζεύξη PT-PR και  $\sigma^2$  είναι η διασπορά του θορύβου.

Στη συνέχεια, μελετάται η συνεισφορά των SUs στη μετάδοση του PU. Αν υποθεθεί ότι κάποιος δευτερεύων πομπός (ST<sub>i</sub>) έχει επιλεγθεί ως αναμεταδότης και οριστεί με  $X$  το μεταδιδόμενο από τον PT σήμα, με  $Y_i$  το λαμβανόμενο σήμα στον ST<sub>i</sub> και με  $Z_i$  το λαμβανόμενο σήμα στον PR από τον ST<sub>i</sub>, τότε προκύπτουν τα εξής:

$$Y_i = \sqrt{P_o G_{P,i}} X + \eta_{P,i} \quad (\text{Εξίσωση 4.3})$$

$$Z_i = \sqrt{P_i G_{i,P}} \frac{Y_i}{|Y_i|} + \eta_{i,P} \quad (\text{Εξίσωση 4.4})$$

Με  $P_i$  ορίζεται η ισχύς που χρησιμοποιεί ο ST<sub>i</sub> στο στάδιο της συνεργασίας,  $G_{P,i}$  είναι το κέρδος καναλιού για τη ζεύξη PT - ST<sub>i</sub> και  $G_{i,P}$  είναι το κέρδος καναλιού για τη ζεύξη ST<sub>i</sub>- PR. Ακόμα, τα μεγέθη  $\eta_{P,i}$  και  $\eta_{i,P}$  περιγράφουν τον Γκαουσιανό θόρυβο στις μεταδόσεις του PT στον ST<sub>i</sub> και του ST<sub>i</sub> στον PR, αντίστοιχα και ακολουθούν την κανονική κατανομή με μηδενική μέση τιμή και διασπορά  $\sigma^2$ , δηλαδή  $\eta_{P,i}, \eta_{i,P} \sim N(0, \sigma^2)$ .

Αντικαθιστώντας την (Εξίσωση 4.3) στην (Εξίσωση 4.4) προκύπτει ότι

$$Z_i = \frac{\sqrt{P_i G_{i,P}} (\sqrt{P_o G_{P,i}} X + \eta_{P,i})}{\sqrt{P_o G_{P,i} + \sigma^2}} + \eta_{i,P} \quad (\text{Εξίσωση 4.5})$$

Έτσι, το λαμβανόμενο SNR στον PR, που προκαλείται από τη μετάδοση του αναμεταδότη ST<sub>i</sub>, παίρνει τη μορφή

$$\Gamma_i = \frac{P_i P_o G_{i,P} G_{P,i}}{\sigma^2 (P_i G_{i,P} + P_o G_{P,i} + \sigma^2)} \quad (\text{Εξίσωση 4.6})$$

Υποθέτοντας πως η συνεισφορά του κάθε SU στο συνεργατικό στάδιο είναι ανάλογη με το επίπεδο της λαμβανομένης ισχύος που καταλήγει από τον συγκεκριμένο δευτερεύοντα χρήστη στον PR, προκύπτει με το συνδυασμό των (Εξίσωση 4.1) και (Εξίσωση 4.6), η ακόλουθη σχέση:

$$t_i = (1 - \alpha) \frac{P_i G_{i,P} G_{P,i}}{\sum_{j \in S} (P_j G_{j,P} G_{P,j})} \quad (\text{Εξίσωση 4.7})$$

Μέσω των (Εξίσωση 4.5) και (Εξίσωση 4.6), ο ρυθμός μετάδοσης του PU με τη βοήθεια των αναμεταδοτών, χρησιμοποιώντας το συνδυασμό μεγίστου λόγου (MRC), προκύπτει

$$R_p = W \log_2 (1 + \Gamma_p + \sum_{i \in S} \Gamma_i) = W \log_2 \left( 1 + \frac{P_o G_P}{\sigma^2} + \sum_{i \in S} \frac{P_i P_o G_{i,P} G_{P,i}}{\sigma^2 (P_i G_{i,P} + P_o G_{P,i} + \sigma^2)} \right)$$

(Εξίσωση 4.8)

Επιπλέον σύμφωνα με το θεώρημα Shannon-Hartley ο ρυθμός μετάδοσης για κάθε δευτερεύοντα χρήστη δίνεται ως εξής:

$$R_i = W \log_2 \left( 1 + \frac{P_S G_i}{\sigma^2} \right) \text{ (Εξίσωση 4.9)}$$

Με  $W$  ορίζεται το εύρος ζώνης του καναλιού,  $G_i$  είναι το κέρδος καναλιού για τη ζεύξη ST- $SR_i$  και  $P_S$  είναι η ισχύς των δευτερευόντων χρηστών για τη μετάδοση των δεδομένων τους. Για απλότητα το  $W$  τίθεται ίσο με μονάδα στους παρακάτω υπολογισμούς.

#### 4.1.2 Συναρτήσεις χρησιμότητας

Καθώς ο μοναδικός στόχος του PU είναι η μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης, η συνάρτηση χρησιμότητας περιγράφεται ως εξής:

$$U_p = \alpha \cdot R_p \text{ (Εξίσωση 4.10)}$$

όπου με  $\alpha$  συμβολίζεται το τμήμα του πλαισίου που διατηρεί ο PU για τη μετάδοση των δεδομένων του και  $R_p$  είναι ο ρυθμός μετάδοσης που επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των δευτερευόντων χρηστών.

Δεδομένου ότι η στρατηγική του PU είναι να επιλέξει μια τιμή για το  $\alpha$  και το σύνολο,  $S$ , των δευτερευόντων χρηστών που θα χρησιμοποιηθούν ως αναμεταδότες, αυτή η τιμή του  $\alpha$  πρέπει να επιλεγεί κατάλληλα. Αν το  $\alpha$  τεθεί πολύ μεγάλο, τότε ο εναπομείναντας χρόνος για τη μετάδοση των SUs θα είναι πολύ μικρός και οι τελευταίοι μπορεί να κάνουν λιγότερη προσπάθεια για συνεργασία. Αντιθέτως, αν η τιμή του  $\alpha$  είναι πολύ μικρή, τότε η χρησιμότητα του PU θα παραμείνει σε χαμηλό επίπεδο. Επομένως, υπάρχει αντιστάθμιση όσον αφορά την τιμή του  $\alpha$  και το πρόβλημα βελτιστοποίησης για τον πρωτεύοντα χρήστη μπορεί να δομηθεί ως εξής:

$$\max_{\alpha} U_p = \alpha R_p(\alpha) \text{ με } 0 \leq \alpha \leq 1 \text{ (Εξίσωση 4.11)}$$

Οι SUs πρέπει να λάβουν υπόψη τους εκτός από το ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να επιτευχθεί και το ενεργειακό κόστος της βοήθειάς τους στη μετάδοση του πρωτεύοντα χρήστη. Συνεπώς, στόχος κάθε SU είναι η μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσής του, καταναλώνοντας παράλληλα λογική ποσότητα ενέργειας. Επομένως, η χρησιμότητα κάθε SU ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ του ρυθμού μετάδοσης που επιτυγχάνεται και της καταναλισκόμενης ενέργειας κατά τη φάση της αναμετάδοσης.

$$U_i = w_i t_i R_i - \frac{1}{2} \alpha P_i = w_i (1 - \alpha) \frac{P_i G_{i,P} G_{P,i}}{\sum_{j \in S} (P_j G_{j,P} G_{P,j})} R_i - \frac{1}{2} \alpha P_i \text{ (Εξίσωση 4.12)}$$

Με  $w_i$  ορίζεται η ισοδύναμη χρησιμότητα ανά μονάδα ρυθμού μετάδοσης για τον  $i$ -οστό SU,  $t_i$  είναι ο χρόνος πρόσβασης του  $i$ -οστού SU σύμφωνα με την (Εξίσωση 4.7) και  $\frac{1}{2} \alpha P_i$  είναι η συνολική ενέργεια του  $i$ -οστού SU που προσφέρεται για τη μετάδοση του PU. Καθώς η

στρατηγική κάθε SU είναι η επιλογή κατάλληλης τιμής για το  $P_i$ , ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης για κάθε  $ST_i$  μπορεί να δομηθεί ως εξής:

$$\max_{P_i} U_i = (1 - \alpha) w_i \frac{P_i G_{i,P} G_{P,i}}{\sum_{j \in S} (P_j G_{j,P} G_{P,j})} R_i - \frac{1}{2} \alpha P_i \text{ με } P_i \geq 0 \text{ ( Εξίσωση 4.13)}$$

Πρέπει να σημειωθεί πως στο συγκεκριμένο μοντέλο αν κάποιος SU δεν επιθυμεί ή τελικά δεν καταφέρει να έχει φασματική πρόσβαση, τότε μπορεί εύκολα να αρνηθεί να βοηθήσει τον PU θέτοντας  $P_i = 0$ .

## 4.2 Παιγνιοθεωρητική ανάλυση δικτύων με ένα πρωτεύοντα χρήστη

Λαμβάνοντας υπόψη τις συναρτήσεις χρησιμότητας που παρουσιάστηκαν παραπάνω, η συνεργασία μεταξύ του PU και των SUs μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν ένα παίγνιο Stackelberg. Στη συνέχεια, αναλύεται το συγκεκριμένο παίγνιο για να αποκτηθούν οι λύσεις στην ισορροπία ενώ παράλληλα αποδεικνύεται η ύπαρξη και η μοναδικότητα της ισορροπίας.

### 4.2.1 Βέλτιστες στρατηγικές για τους δευτερεύοντες χρήστες

Δοθέντος του συνόλου των αναμεταδοτών,  $S$ , και του παράγοντα τεμαχισμού του πλαισίου,  $\alpha$ , που καθορίζεται από τον PU, το πρόβλημα για τους δευτερεύοντες χρήστες, που θα λειτουργήσουν ως αναμεταδότες, είναι η επιλογή ενός βέλτιστου συνεργατικού επιπέδου ισχύος για να μεγιστοποιήσουν τη χρησιμότητά τους. Έτσι, ένα μη συνεργατικό παίγνιο, όσον αφορά την ισχύ μεταξύ των SUs, μπορεί να έχει τη μορφή  $G = [S, \{\mathbf{P}_i\}, \{U_i(\cdot)\}]$ , όπου το σύνολο των παικτών είναι το σύνολο  $S$  των αναμεταδοτών, το σύνολο στρατηγικών του  $ST_i$  είναι το  $\mathbf{P}_i$  και η χρησιμότητα του  $ST_i$  είναι το  $U_i(\cdot)$ . Κάθε  $ST_i$  πρέπει να επιλέξει τη στρατηγική του μέσα από ένα σύνολο στρατηγικών, τέτοιο ώστε  $P_i \in \mathbf{P}_i$ . Το συνολικό στρατηγικό προφίλ,  $\mathbf{P} = (P_1, \dots, P_{|S|})$ , καθορίζεται από τις στρατηγικές όλων των παικτών. Για λόγους ευκολίας, το στρατηγικό προφίλ των υπολοίπων παικτών εκτός του  $ST_i$  ορίζεται ως εξής:  $\mathbf{P}_{-i} = (P_1, \dots, P_{i-1}, P_{i+1}, \dots, P_{|S|})$ . Όπως παρατηρείται, η χρησιμότητα του  $ST_i$  είναι μια συνάρτηση της στρατηγικής του και των στρατηγικών των άλλων παικτών και έχει τη μορφή  $U_i(\cdot) = U_i(P_i, \mathbf{P}_{-i})$ .

**Θεώρημα 4.1:** Υπάρχει ισορροπία Nash στο μη συνεργατικό παίγνιο ισχύος  $G = [S, \{\mathbf{P}_i\}, \{U_i(\cdot)\}]$ .

### Απόδειξη

Πρόταση: Η ισορροπία Nash υπάρχει στο παίγνιο  $G = [S, \{\mathbf{P}_i\}, \{U_i(\cdot)\}]$ , αν για κάθε  $i \in S$ :

1.  $\mathbf{P}_i$  είναι ένα μη κενό, κυρτό και συμπαγές υποσύνολο του Ευκλείδειου χώρου  $\mathbb{R}^N$ .
2.  $U_i(\mathbf{P})$  είναι συνεχής στο  $\mathbf{P}$  και κοίλη στο  $P_i$ .

Είναι εμφανές πως ο στρατηγικός χώρος  $\mathbf{T} = \{\mathbf{P}_1 \times \dots \times \mathbf{P}_{|S|}\}$  είναι ένα μη κενό, κυρτό και συμπαγές σύνολο του Ευκλείδειου χώρου  $\mathbb{R}^N$ . Από την (Εξίσωση 4.12) προκύπτει πως η  $U_i(\mathbf{P})$  είναι συνεχής στο  $\mathbf{P}$ . Έτσι, το μόνο που απομένει είναι η απόδειξη ότι η  $U_i(\mathbf{P})$  είναι κοίλη στο  $P_i$ . Υπολογίζοντας τη δεύτερη παράγωγο της  $U_i$  ως προς το  $P_i$  προκύπτει

$$\frac{\partial^2 U_i}{\partial P_i^2} = -2(1-\alpha)w_i \frac{G_{i,P}^2 G_{P,i}^2 \sum_{j \in S, j \neq i} (P_j G_{j,P} G_{P,j})}{\left( \sum_{j \in S} (P_j G_{j,P} G_{P,j}) \right)^3} R_i < 0 \text{ (Εξίσωση 4.14)}$$

Συνεπώς προκύπτει ότι πάντα η δεύτερη παράγωγος είναι αρνητική και άρα η  $U_i(\mathbf{P})$  είναι κοίλη στο  $P_i$ . Από τα παραπάνω συνάγεται ότι υπάρχει πάντα ισορροπία Nash στο μη συνεργατικό παίγνιο ισχύος μεταξύ των SUs.

Από την απόδειξη του παραπάνω θεωρήματος προέκυψε ότι η  $U_i(\mathbf{P})$  είναι κοίλη στο  $P_i$ . Έτσι, μπορεί να υπολογιστεί η συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης, θέτοντας την πρώτη παράγωγο της  $U_i$  ως προς το  $P_i$  ίση με 0, ενώ προκύπτει για κάθε SU που ανήκει στο σύνολο S ότι:

$$\frac{\partial U_i}{\partial P_i} = (1-\alpha)w_i \frac{G_{i,P} G_{P,i} A_i}{\left( \sum_{j \in S} (P_j G_{j,P} G_{P,j}) \right)^2} R_i - \frac{1}{2} \alpha = 0 \text{ (Εξίσωση 4.15)}$$

$$\text{με } A_i = \sum_{j \in S, j \neq i} (P_j G_{j,P} G_{P,j}).$$

Μέσω απλών υπολογισμών η βέλτιστη στρατηγική του  $ST_i$  συναρτήσεται των στρατηγικών των υπολοίπων STs είναι η εξής:

$$P_i = \left[ \frac{1}{G_{i,P} G_{P,i}} \left( \sqrt{2w_i \frac{(1-\alpha)}{\alpha} G_{i,P} G_{P,i} A_i R_i} - A_i \right) \right]^+ \text{ (Εξίσωση 4.16)}$$

Με  $[x]^+ = x$  αν  $x \geq 0$ , διαφορετικά  $[x]^+ = 0$ .

**Θεώρημα 4.2:** Η ισορροπία Nash του μη συνεργατικού παιγνίου ισχύος είναι μοναδική.

#### Απόδειξη

Στο **Θεώρημα 4.1** αποδείχτηκε ότι υπάρχει ισορροπία Nash στο μη συνεργατικό παίγνιο. Έτσι, η ισορροπία Nash  $\mathbf{P}$  πρέπει να ικανοποιεί το  $\mathbf{P} = \mathbf{I}(\mathbf{P}) = (I_1(\mathbf{P}), I_2(\mathbf{P}), \dots, I_N(\mathbf{P}))$ , όπου  $I_i(\mathbf{P})$  είναι η συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης του  $i$ -οστού SU δοθέντων των στρατηγικών  $\mathbf{P}_{-i}$  των υπολοίπων παικτών. Με άλλα λόγια, για κάθε ισορροπία Nash  $\mathbf{P} = (P_1, \dots, P_{|S|})$  πρέπει να ικανοποιούνται οι εξής συνθήκες:  $P_i = I_i(\mathbf{P}), \forall i \in S$ .

- **Ορισμός 4.1:** Η συνάρτηση  $\mathbf{I}(\mathbf{P})$  ονομάζεται τυπική αν για κάθε  $\mathbf{P} \geq 0$  ικανοποιούνται οι ακόλουθες ιδιότητες:
  1. Θετικότητα:  $\mathbf{I}(\mathbf{P}) > 0$ .
  2. Μονοτονία: Αν  $\mathbf{P} \geq \mathbf{P}'$ , τότε  $\mathbf{I}(\mathbf{P}) \geq \mathbf{I}(\mathbf{P}')$ .
  3. Κλιμάκωση: Για κάθε  $\beta > 1$  ισχύει  $\beta\mathbf{I}(\mathbf{P}) > \mathbf{I}(\beta\mathbf{P})$ .

Έτσι, αν  $\mathbf{I}(\mathbf{P})$  είναι μια τυπική συνάρτηση, τότε το σταθερό σημείο  $\mathbf{P} = \mathbf{I}(\mathbf{P})$  είναι μοναδικό, που σημαίνει ότι η ισορροπία Nash του μη συνεργατικού παιγνίου είναι μοναδική. Επιλέγοντας κατάλληλα τους αναμεταδότες SUs, ο περιορισμός στην (Εξίσωση 4.16) μπορεί να ικανοποιηθεί αφού

$$A < 2w_i \frac{(1-\alpha)}{\alpha} G_{i,p} G_{p,i} R_i \quad (\text{Εξίσωση 4.17})$$

Επομένως, η βέλτιστη απόκριση του  $i$ -οστού SU σύμφωνα με την (Εξίσωση 4.16) παίρνει τη μορφή

$$I_i(\mathbf{P}) = \frac{1}{G_{i,p} G_{p,i}} \left( \sqrt{2w_i \frac{(1-\alpha)}{\alpha} G_{i,p} G_{p,i} A R_i} - A \right) \quad (\text{Εξίσωση 4.18})$$

Από τις (Εξίσωση 4.17) και (Εξίσωση 4.18) προκύπτει ότι  $I_i(\mathbf{P}) > 0$  και έτσι αποδεικνύεται η θετικότητα.

Για τη μονοτονία, η  $I_i(\mathbf{P})$  είναι τετραγωνική ως προς το  $\sqrt{A}$  και αυξάνεται μονότονα αν  $A \leq w_i \frac{1-\alpha}{2\alpha} G_{i,p} G_{p,i} R_i$ .

Για την κλιμάκωση, για κάθε  $\beta > 1$  ισχύει ότι:

$$\begin{aligned} \beta\mathbf{I}(\mathbf{P}) - \mathbf{I}(\beta\mathbf{P}) &= \frac{\beta}{G_{i,p} G_{p,i}} \left( \sqrt{2w_i \frac{(1-\alpha)}{\alpha} G_{i,p} G_{p,i} A R_i} - A \right) - \frac{1}{G_{i,p} G_{p,i}} \left( \sqrt{2\beta w_i \frac{(1-\alpha)}{\alpha} G_{i,p} G_{p,i} A R_i} - \beta A \right) \\ &= \frac{\beta - \sqrt{\beta}}{G_{i,p} G_{p,i}} \left( \sqrt{2w_i \frac{(1-\alpha)}{\alpha} G_{i,p} G_{p,i} A R_i} \right) > 0 \end{aligned} \quad (\text{Εξίσωση 4.19})$$

Μέχρι στιγμής αποδείχτηκε η θετικότητα, η μονοτονία και η κλιμάκωση της  $\mathbf{I}(\mathbf{P})$  και επομένως αυτή αποτελεί μια τυπική συνάρτηση. Έτσι, η ισορροπία Nash του μη συνεργατικού παιγνίου επιλογής κατάλληλου επιπέδου ισχύος είναι μοναδική.

Εν συνεχεία υπολογίζεται η μοναδική ισορροπία Nash του μη συνεργατικού παιγνίου ισχύος. Ύστερα από απλούς μετασχηματισμούς στην (Εξίσωση 4.15) αυτή παίρνει τη μορφή

$$(1-\alpha)A_i - \frac{\alpha D^2}{2w_i G_{i,p} G_{p,i} R_i} = 0 \quad (\text{Εξίσωση 4.20})$$

$$\text{όπου } D = \sum_{j \in S} (P_j G_{j,p} G_{p,j}).$$

Αθροίζοντας την (Εξίσωση 4.20) για κάθε  $\forall i \in S$  προκύπτει

$$(N_0 - 1)(1 - \alpha)D - \sum_{j \in S} \left( \frac{\alpha}{2w_j G_{j,P} G_{P,j} R_j} \right) D^2 = 0 \text{ (Εξίσωση 4.21)}$$

όπου  $N_0$  είναι ο συνολικός αριθμός των αναμεταδοτών και ισχύει ότι  $N_0 = |S|$ .

Χρησιμοποιώντας το συμβολισμό  $B = \sum_{j \in S} \frac{1}{w_j G_{j,P} G_{P,j} R_j}$  και σημειώνοντας ότι  $D > 0$

προκύπτει

$$D = \frac{2(1 - \alpha)(N_0 - 1)}{\alpha B} \text{ (Εξίσωση 4.22)}$$

Αντικαθιστώντας την (Εξίσωση 4.22) στην (Εξίσωση 4.15) προκύπτει η βέλτιστη απόκριση του  $ST_i$ , δηλαδή η βέλτιστη ισχύς του  $ST_i$  στην κατάσταση μοναδικής ισορροπίας Nash.

$$P_i^* = \frac{2(1 - \alpha)(N_0 - 1)}{\alpha G_{i,P} G_{P,i} B^2} \left( B - \frac{N_0 - 1}{w_i G_{i,P} G_{P,i} R_i} \right) \text{ (Εξίσωση 4.23)}$$

Καθώς το επίπεδο ισχύος δεν μπορεί να είναι αρνητικό, τίθεται ο ακόλουθος περιορισμός

$$B > \frac{N_0 - 1}{w_i G_{i,P} G_{P,i} R_i}, \forall i \in S \text{ (Ανίσωση 4.24)}$$

Ο περιορισμός αυτός θα χρησιμοποιηθεί για την επιλογή του συνεργατικού συνόλου των αναμεταδοτών και ο PU θα επιλέξει τους αναμεταδότες μειώνοντας τους SUs που δεν ικανοποιούν τον παραπάνω περιορισμό έναν προς ένα. Ο λεπτομερής αλγόριθμος θα παρουσιαστεί στο σενάριο πολλαπλών PUs με το όνομα Αλγόριθμος B.

#### 4.2.2 Βέλτιστη στρατηγική για τον πρωτεύοντα χρήστη

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης για τον PU παρουσιάζεται στην (Εξίσωση 4.11). Αντικαθιστώντας την (Εξίσωση 4.23) στο  $U_p$  προκύπτει ότι

$$U_p = \alpha \log_2 \left( 1 + \frac{P_o G_P}{\sigma^2} + \sum_{i \in S} \frac{P_i^* P_o G_{i,P} G_{P,i}}{\sigma^2 (P_i^* G_{i,P} + P_o G_{P,i} + \sigma^2)} \right) \text{ με } 0 \leq \alpha \leq 1 \text{ (Εξίσωση 4.25)}$$

Σκοπός του PU είναι η μεγιστοποίηση της χρησιμότητάς του επιλέγοντας το βέλτιστο  $\alpha^*$ . Από τη συνθήκη βελτιστοποίησης πρώτης τάξεως προκύπτει ότι

$$\frac{\partial U_p}{\partial \alpha} = R_p(\alpha) + \alpha \frac{\partial R_p(\alpha)}{\partial \alpha} = 0 \text{ (Εξίσωση 4.26)}$$

Αντικαθιστώντας την (Εξίσωση 4.8) στην (Εξίσωση 4.26) αποκτάται η βέλτιστη τιμή  $\alpha^*$ :

$$\alpha^* = F^* \left( \{w_i\}, \{G_i\}, \{G_{i,P}\}, \{G_{P,i}\} \right) \text{ (Εξίσωση 4.27)}$$

όπου  $F^*(\cdot)$  είναι μια συνάρτηση τέτοια ώστε  $R_p(\alpha) + \alpha \frac{\partial R_p(\alpha)}{\partial \alpha} = 0$ .

Αν και είναι δύσκολο να γραφεί η αναλυτική μορφή του  $\alpha^*$ , μπορεί να εξαχθεί εύκολα η αριθμητική τιμή του επωφελομένου του ότι η  $U_p$  είναι κοίλη συνάρτηση, το οποίο θα δειχθεί στην επόμενη υποενότητα.

Από τις (Εξίσωση 4.23) και (Εξίσωση 4.27) συνάγεται ότι  $U_p(\alpha') \leq U_p(\alpha^*)$ ,  $\forall 0 \leq \alpha' \leq 1$  και  $U_i(P_1^*, \dots, P_i', \dots, P_{N_0}^*) \leq U_i(P_1^*, \dots, P_i^*, \dots, P_{N_0}^*)$ ,  $\forall P_i' \geq 0$ . Έτσι, οι λύσεις που περιγράφονται στις (Εξίσωση 4.23) και (Εξίσωση 4.27) δομούν μια ισορροπία Stackelberg που θα αποδειχθεί στην επόμενη υποενότητα.

### 4.2.3 Απόδειξη της ύπαρξης ισορροπίας

Στην υποενότητα αυτή θα αποδειχθεί ότι οι λύσεις στις (Εξίσωση 4.23) και (Εξίσωση 4.27) δομούν μια ισορροπία Stackelberg.

**Ιδιότητα 4.1:** Για  $\forall i \in S$ , το βέλτιστο επίπεδο ισχύος  $P_i^*$  μειώνεται ως προς  $\alpha$ .

Από την (Εξίσωση 4.23) μπορεί να γραφεί η πρώτη παράγωγος του  $P_i^*$  ως προς  $\alpha$  ως εξής:

$$\frac{\partial P_i^*}{\partial \alpha} = -\frac{2(N_0-1)}{\alpha^2 G_{i,P} G_{P,i} B^2} \left( B - \frac{N_0-1}{w_i G_{i,P} G_{P,i} R_i} \right) < 0 \text{ (Εξίσωση 4.28)}$$

Η παραπάνω εξίσωση φανερώνει πως, αν ο ΡΥ κατέχει περισσότερο χρόνο για την προσωπική του μετάδοση, που σημαίνει αύξηση του  $\alpha$ , οι επιλεγθέντες αναμεταδότες θα έχουν λιγότερο κίνητρο για να συμμετέχουν στην συνεργατική διαδικασία και έτσι θα μειώσουν το επίπεδο συνεργατικής ισχύος  $P_i$ .

**Ιδιότητα 4.2:** Η χρησιμότητα  $U_p$  του ΡΥ είναι κοίλη στο  $\alpha$ .

### Απόδειξη



Χρησιμοποιώντας τους συμβολισμούς  $M = 1 + \frac{P_o G_P}{\sigma^2}$ ,  $C_i = P_o G_{i,P} G_{P,i}$ ,  $D_i = \sigma^2 G_{i,P}$ ,

$$E_i = \sigma^2 (P_o G_{P,i} + \sigma^2) \text{ και } F_i = \frac{2(N_0 - 1) (B - (N_0 - 1) / (w_i G_{i,P} G_{P,i} R_i))}{G_{i,P} G_{P,i} B^2}, \text{ οι (Εξίσωση 4.8)}$$

και (Εξίσωση 4.28) μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$R_P = \log_2 \left( M + \sum_{i \in S} \frac{C_i P_i}{D_i P_i + E_i} \right) \text{ (Εξίσωση 4.29)}$$

και

$$\frac{\partial P_i^*}{\partial \alpha} = -\frac{F_i}{\alpha^2} \text{ (Εξίσωση 4.30)}$$

Αντικαθιστώντας την (Εξίσωση 4.29) και (Εξίσωση 4.30) στην (Εξίσωση 4.26) προκύπτει

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_P}{\partial \alpha} &= \log_2 \left( M + \sum_{i \in S} \frac{C_i P_i}{D_i P_i + E_i} \right) + \frac{\alpha}{\ln 2} \times \frac{1}{M + \sum_{i \in S} \frac{C_i P_i}{D_i P_i + E_i}} \sum_{i \in S} \frac{C_i E_i F_i}{(D_i P_i + E_i)^2} \left( -\frac{1}{\alpha^2} \right) \\ &= \log_2 \left( M + \sum_{i \in S} \frac{C_i P_i}{D_i P_i + E_i} \right) - \frac{\alpha}{\ln 2} \times \frac{1}{M + \sum_{i \in S} \frac{C_i P_i}{D_i P_i + E_i}} \sum_{i \in S} \frac{C_i E_i F_i}{(D_i P_i + E_i)^2} \\ &\text{(Εξίσωση 4.31)} \end{aligned}$$

Επιπλέον μπορεί να εξαχθεί η δεύτερη παράγωγος του  $U_P$  ως προς  $\alpha$  ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U_P}{\partial \alpha^2} &= -\frac{1}{\alpha^2 \ln 2} \frac{1}{M + \sum_{i \in S} \frac{C_i P_i}{D_i P_i + E_i}} \sum_{i \in S} \frac{C_i E_i F_i}{(D_i P_i + E_i)^2} + \frac{1}{\alpha^2 \ln 2} \frac{1}{M + \sum_{i \in S} \frac{C_i P_i}{D_i P_i + E_i}} \sum_{i \in S} \frac{C_i E_i F_i}{(D_i P_i + E_i)^2} \\ &\quad - \frac{1}{\alpha \ln 2} \frac{\left( \sum_{i \in S} \frac{C_i E_i F_i}{(D_i P_i + E_i)^2} \right)^2}{\alpha^2 \left( M + \sum_{i \in S} \frac{C_i P_i}{D_i P_i + E_i} \right)^2} - \frac{1}{\alpha \ln 2} \frac{\sum_{i \in S} \frac{2C_i D_i E_i F_i}{(D_i P_i + E_i)^3}}{\alpha^2 \left( M + \sum_{i \in S} \frac{C_i P_i}{D_i P_i + E_i} \right)} \\ &= -\frac{1}{\alpha \ln 2} \frac{\left( \sum_{i \in S} \frac{C_i E_i F_i}{(D_i P_i + E_i)^2} \right)^2}{\alpha^2 \left( M + \sum_{i \in S} \frac{C_i P_i}{D_i P_i + E_i} \right)^2} - \frac{1}{\alpha \ln 2} \frac{\sum_{i \in S} \frac{2C_i D_i E_i F_i}{(D_i P_i + E_i)^3}}{\alpha^2 \left( M + \sum_{i \in S} \frac{C_i P_i}{D_i P_i + E_i} \right)} \\ &\text{(Εξίσωση 4.32)} \end{aligned}$$

Δεδομένου ότι  $\alpha, P_i, M, C_i, D_i, E_i, F_i > 0$  προκύπτει ότι  $\frac{\partial^2 U_p}{\partial \alpha^2} < 0$  και έτσι η συνάρτηση χρησιμότητας  $U_p$  του ΡΥ είναι κοίλη στο  $\alpha$ .

**Θεώρημα 4.3:** Τα  $P_i, \forall i \in S$  και  $\alpha$  που δίνονται από τις (Εξίσωση 4.23) και (Εξίσωση 4.27), αντίστοιχα, αποτελούν μια ισορροπία Stackelberg για τη δομή του παιγνίου στο συγκεκριμένο μοντέλο.

#### Απόδειξη

Όταν ο ΡΥ εκπέμπει την παράμετρο  $\alpha$ , κάθε αναμεταδότης θα απαντήσει με μια τιμή συνεργατικής ισχύος  $P_i^*$ , όπως παρουσιάστηκε στην (Εξίσωση 4.23). Από τα **Θεώρημα 4.1** και **Θεώρημα 4.2**, αποδείχθηκε ότι το  $\{P_i^*\}$  είναι το μοναδικό σημείο ισορροπίας Nash για το μη συνεργατικό παίγνιο ισχύος, αφού για κάθε αναμεταδότη  $i \in S$  ισχύει ότι  $U_i(P_1^*, \dots, P_i', \dots, P_{N_o}^*) \leq U_i(P_1^*, \dots, P_i^*, \dots, P_{N_o}^*), \forall P_i' \geq 0$ . Ακόμα, λόγω της **Ιδιότητας 4.2** η συνάρτηση χρησιμότητας  $U_p$  του ΡΥ είναι κοίλη στο  $\alpha$ . Έτσι, ο ΡΥ μπορεί πάντα να καταλήξει σε ένα βέλτιστο  $\alpha^*$  τέτοιο ώστε  $U_p(\alpha') \leq U_p(\alpha^*), \forall \alpha' \in [0, 1]$ . Από τα παραπάνω συνάγεται ότι το  $P_i, \forall i \in S$  και το  $\alpha$ , που ορίζονται από τις (Εξίσωση 4.23) και (Εξίσωση 4.27) αποτελούν μια ισορροπία Stackelberg για το παίγνιο στο μελετηθέν μοντέλο.

**Θεώρημα 4.4:** Αν το  $S$  αποτελεί ένα κανονικό (regular) σύνολο αναμεταδοτών, αφού κάθε  $SU i \in S$  ικανοποιεί τους περιορισμούς στην (Ανίσωση 4.24), τότε κάθε υποσύνολο του  $S$  αποτελεί, επίσης, ένα κανονικό σύνολο αναμεταδοτών.

#### Απόδειξη

Έστω ότι ο αριθμός των SUs στο σύνολο  $S_1$  των αναμεταδοτών ορίζεται ως  $N_1$ . Χωρίς βλάβη της γενικότητας, υποτίθεται ότι μέγιστος αριθμός των SUs στο  $S_1$  είναι ο  $n_1$ . Ακόμα υποτίθεται ότι  $S'$  είναι ένα αυθαίρετο υποσύνολο του  $S_1$  και ο αριθμός των SUs στο  $S'$  είναι  $N'$ . Αφού το  $S_1$  είναι ένα κανονικό σύνολο, κάθε  $SU i \in S_1$  πρέπει να ικανοποιεί τον περιορισμό που τίθεται στην (Ανίσωση 4.24). Επομένως, μπορεί να γραφεί ο περιορισμός του  $SU_{n_1}$  ως ακολούθως:

$$\sum_{k \in S_1} \frac{1}{w_k G_{k,P} G_{P,k} R_k} > \frac{N_1 - 1}{w_{n_1} G_{n_1,P} G_{P,n_1} R_{n_1}} \quad (\text{Ανίσωση 4.33})$$

Επιπλέον ισχύει  $w_i G_{i,P} G_{P,i} R_i \geq w_{n_1} G_{n_1,P} G_{P,n_1} R_{n_1}$  για  $\forall i \in S_1$  και προκύπτει

$$\frac{N_1 - N'}{w_{n_1} G_{n_1,P} G_{P,n_1} R_{n_1}} \geq \sum_{k \in S_1, k \notin S'} \frac{1}{w_k G_{k,P} G_{P,k} R_k} \quad (\text{Ανίσωση 4.34})$$

Σημειώνοντας ότι  $\sum_{k \in S_1} \frac{1}{w_k G_{k,P} G_{P,k} R_k} = \sum_{k \in S'} \frac{1}{w_k G_{k,P} G_{P,k} R_k} + \sum_{k \in S_1, k \notin S'} \frac{1}{w_k G_{k,P} G_{P,k} R_k}$  και συνδυάζοντας τις (Ανίσωση 4.33) και (Ανίσωση 4.34) προκύπτει ότι

$$\sum_{k \in S'} \frac{1}{w_k G_{k,P} G_{P,k} R_k} > \frac{N' - 1}{w_{n_1} G_{n_1,P} G_{P,n_1} R_{n_1}} \quad (\text{Ανίσωση 4.35})$$

Επίσης, για  $\forall j \in S'$  ισχύει ότι  $\frac{1}{w_j G_{j,P} G_{P,j} R_j} \leq \frac{1}{w_{n_1} G_{n_1,P} G_{P,n_1} R_{n_1}}$  και τελικώς

$$\sum_{k \in S'} \frac{1}{w_k G_{k,P} G_{P,k} R_k} > \frac{N' - 1}{w_j G_{j,P} G_{P,j} R_j} \quad (\text{Ανίσωση 4.36})$$

που καταδεικνύει ότι το  $S'$  είναι ένα κανονικό σύνολο.

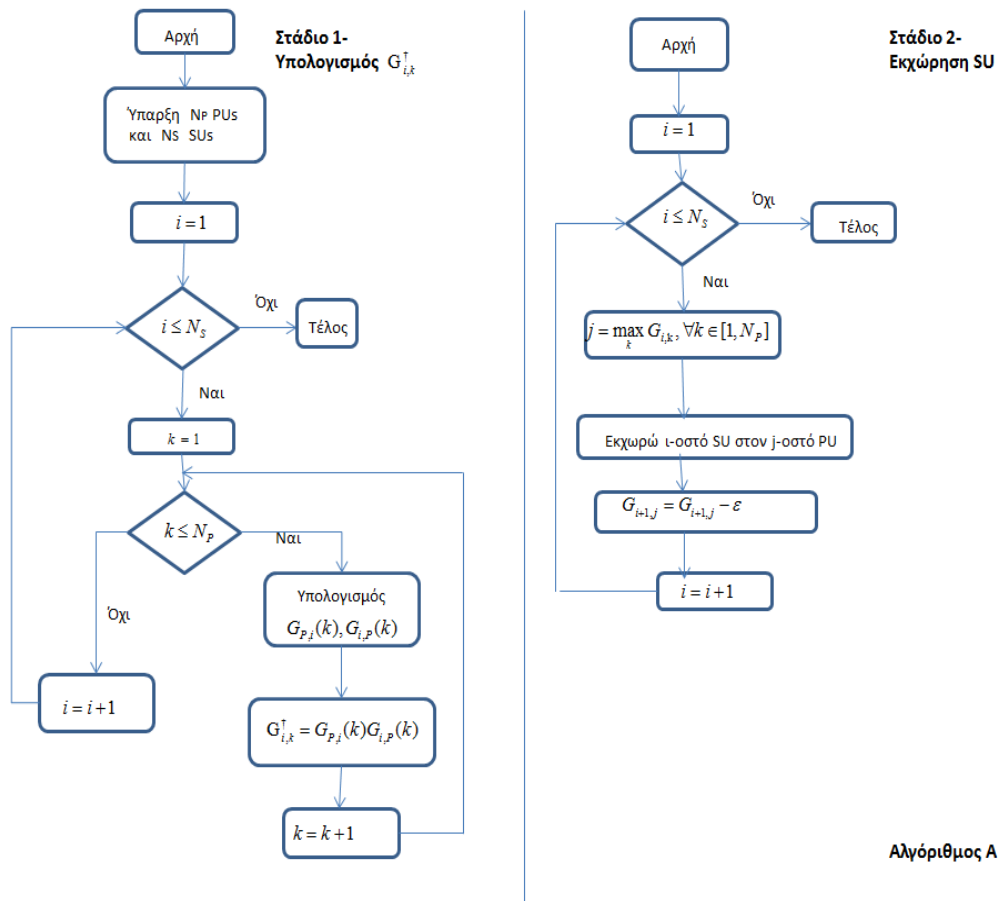
### 4.3 Παρουσίαση συνεργατικού μηχανισμού με πολλαπλούς πρωτεύοντες χρήστες

Στην υποενότητα αυτή αναπτύσσεται ο συνεργατικός μηχανισμός στο πιο πολύπλοκο σενάριο με πολλαπλούς πρωτεύοντες χρήστες. Στην περίπτωση αυτή χρειάζεται ένας συνεργατικός μηχανισμός στον οποίο κάθε PU μπορεί να βρει κατάλληλους SUs για να λειτουργήσουν ως αναμεταδότες. Για το δεδομένο μηχανισμό, αφενός πρέπει να μεγιστοποιηθεί η επίδοση ολόκληρου του δικτύου όσο είναι δυνατό και αφετέρου πρέπει να εγγυηθεί η δικαιοσύνη μεταξύ των PUs, ώστε να αποφευχθούν περιπτώσεις όπου ένας PU απασχολεί τους περισσότερους SUs αφήνοντας λίγους στους υπολοίπους PUs. Καθώς λαμβάνονται υπόψη τόσο η επίδοση, όσο και η δικαιοσύνη στα δίκτυα, η επιλογή αναμεταδοτών με τους πολλαπλούς PUs είναι αρκετά πολύπλοκη και είναι δύσκολη η εύρεση μιας βέλτιστης λύσης, για αυτό προτείνεται ένας ευρετικός αλγόριθμος για να λυθεί το πρόβλημα.

Συμβολίζοντας με  $N_P$  τον αριθμό των PUs, με  $N_S$  τον αριθμό των SUs στα δίκτυα πολλαπλών PUs, με  $G_{P,i}(k)$  το κέρδος καναλιού της ζεύξης  $PT_k-ST_i$  και με  $G_{i,P}(k)$  το κέρδος καναλιού της ζεύξης  $ST_i-PR_k$ , για κάθε κ-οστό PU και ι-οστό SU ορίζεται το μέγεθος  $G_{i,k}^\dagger = G_{P,i}(k)G_{i,P}(k)$ .

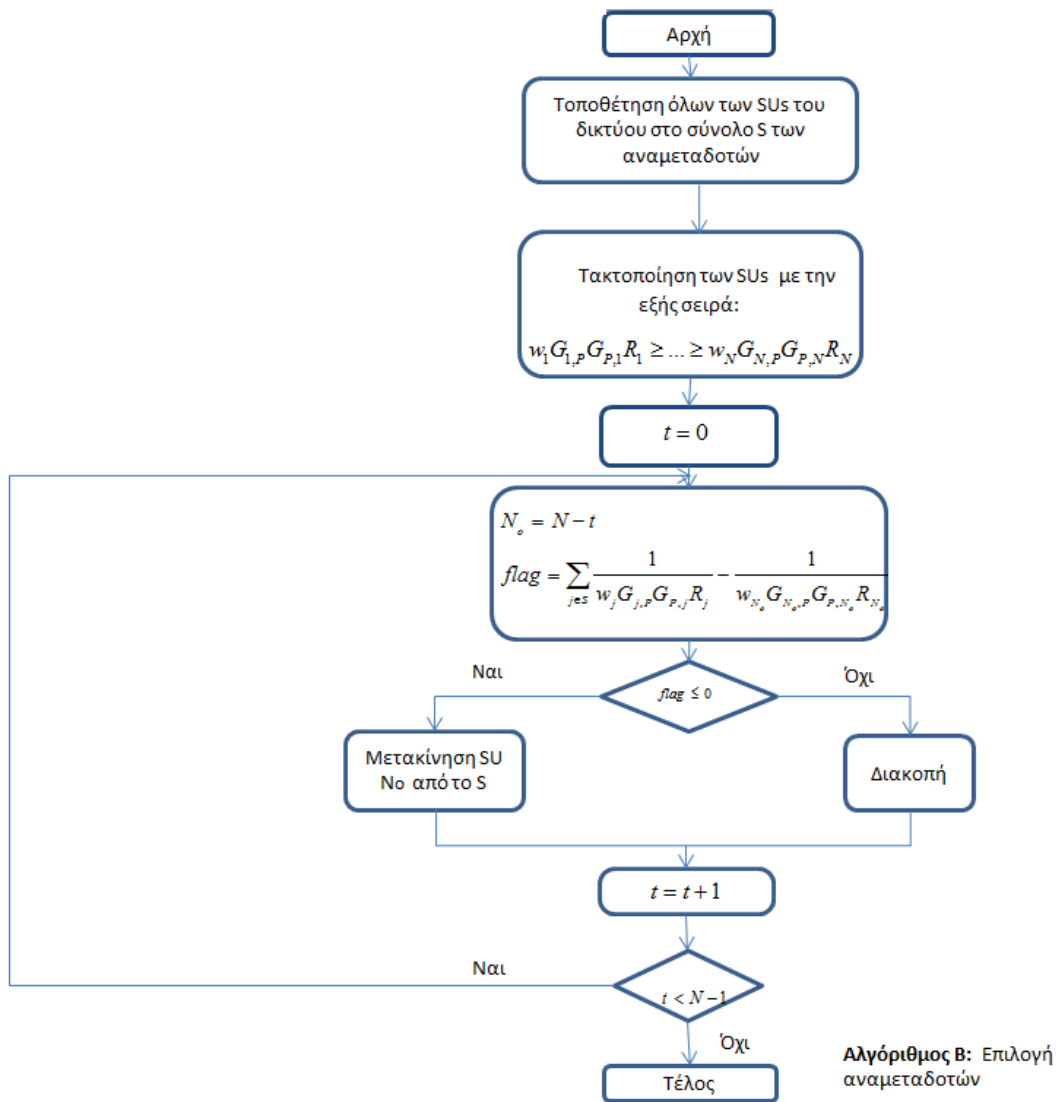
Για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις της επίδοσης και της δικαιοσύνης πρέπει να εκχωρηθούν οι SUs στους κατάλληλους PUs, έτσι ώστε οι SUs να συνεισφέρουν περισσότερο στη διαδικασία της συνεργασίας. Όταν η συνεισφορά του ι-οστού SU στον κ-οστό PU είναι θετική όσον αφορά το  $G_{i,k}^\dagger$ , τότε χρησιμοποιείται το  $G_{i,k}^\dagger$  σαν δείκτης εκχώρησης. Υπολογίζεται το  $G_{i,k}^\dagger$  με τη μεγαλύτερη τιμή και εκχωρείται ο ι-οστός SU στον κ-οστό PU και κατόπιν μειώνονται όλα τα  $G_{i,k}^\dagger$  που σχετίζονται με τον συγκεκριμένο PU κατά μια κατάλληλη τιμή  $\varepsilon$ , ώστε να μειωθεί η πιθανότητα όλοι οι SUs να εκχωρηθούν στον ίδιο PU. Η επιλογή της τιμής  $\varepsilon$  εξαρτάται από τις απαιτήσεις των σχεδιαστών του συστήματος. Για παράδειγμα αν η δικαιοσύνη είναι σε πρώτη προτεραιότητα το  $\varepsilon$  πρέπει να τεθεί μεγάλο

ώστε κάθε PU να μην απασχολεί SUs σε δυο συνεχείς γύρους εκχώρησης. Διαφορετικά η τιμή του  $\varepsilon$  πρέπει να είναι μικρότερη για εξισορρόπηση μεταξύ επίδοσης και δικαιοσύνης. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι όλοι οι SUs να εκχωρηθούν στους PUs. Η πραγματοποίηση της εκχώρησης των SUs αναπτύσσεται στον Αλγόριθμο Α που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.



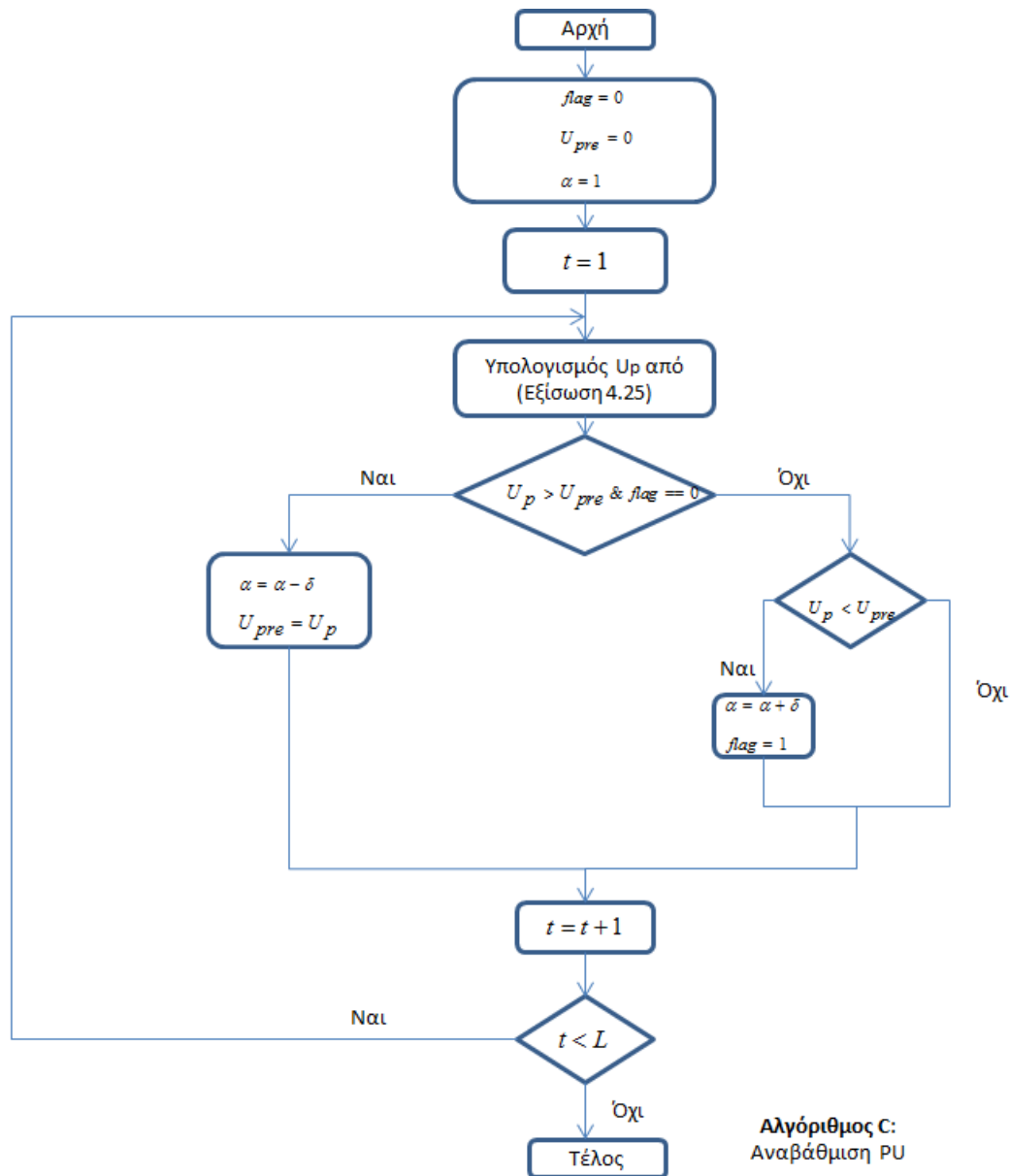
Σχήμα 4.2: Αλγόριθμος Α-Εκχώρηση SU

Καθώς οι SUs έχουν εκχωρηθεί κατάλληλα στους αντίστοιχους PUs ακολουθεί η επιλογή, από κάθε PU, ενός κατάλληλου συνόλου από τους SUs που έχουν εκχωρηθεί σε αυτόν, για να λειτουργήσουν σαν αναμεταδότες του συγκεκριμένου PU. Όπως έχει παρουσιαστεί και παραπάνω, κάθε PU επιλέγει σαν αναμεταδότες εκείνους τους SUs που ικανοποιούν την (Ανίσωση 4.24) και έτσι έχει αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος επιλογής αναμεταδοτών που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3 και ονομάζεται Αλγόριθμος Β. Σύμφωνα με αυτόν κάθε PU επιλέγει αναμεταδότες ελαττώνοντας τους SUs, που δεν ικανοποιούν την (Ανίσωση 4.24), έναν προς έναν.



Σχήμα 4.3: Αλγόριθμος Β- Επιλογή αναμεταδοτών

Τέλος, χρησιμοποιείται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος για την επίτευξη του βέλτιστου  $\alpha^*$ , για κάθε PU, στην ισορροπία Stackelberg. Από την **ιδιότητα 4.2** είναι γνωστό ότι η χρησιμότητα  $U_p$  του PU είναι κοίλη στο  $\alpha$ . Έτσι, μπορεί να αποκτηθεί το βέλτιστο  $\alpha^*$  με τη διαδοχική μείωση του  $\alpha$  από την αρχική τιμή 1. Η υλοποίηση αυτού γίνεται στον Αλγόριθμο C, που ονομάζεται αλγόριθμος αναβάθμισης και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Αλγόριθμος C-Αναβάθμιση PU

Σύμφωνα με τη συνεργατική διαδικασία που αναφέρεται νωρίτερα, προτείνεται ένα πρωτόκολλο που μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα πρακτικό σύστημα. Υποτίθεται ότι τα κανάλια είναι σταθερά και τα κέρδη των καναλιών ανιχνεύονται από το αντίστοιχο τερματικό: το  $G_{i,p}(k)$  ανιχνεύεται από το  $PR_k$ , το  $G_{p,i}(k)$  ανιχνεύεται από το  $ST_i$  και το  $G_i$  ανιχνεύεται από το  $SR_i$ . Μετά από την ανίχνευση του καναλιού, οι τιμές των  $G_{i,p}(k)$  και  $G_{p,i}(k)$  αναφέρονται στο συντονιστή και αυτός εκχωρεί τους SUs στους PUs. Μετά το στάδιο της εκχώρησης, οι SUs στέλνουν το κέρδος καναλιού και άλλες παραμέτρους στον PT. Με αυτή την πληροφορία, ο PU μπορεί να επιλέξει ένα κατάλληλο σύνολο από SUs ως τους συνεργατικούς αναμεταδότες του και να υπολογίσει το βέλτιστο  $\alpha^*$ . Ακόμη, κάθε PU

εκπέμπει την τιμή του  $B = \sum_{j \in S} \frac{1}{w_j G_{j,p} G_{p,j} R_j}$  σε όλους τους SUs, ώστε κάθε SU να μπορεί να υπολογίσει το βέλτιστο επίπεδο ισχύος του σύμφωνα με την ( Εξίσωση 4.23).

#### 4.4 Παρουσίαση-Σχολιασμός αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζονται και αναλύονται τα γραφήματα που προέκυψαν από την προσομοίωση των μοντέλων που αναπτύχθηκαν. Συγκεκριμένα οι προσομοιώσεις περιλαμβάνουν τόσο συστήματα με ένα πρωτεύοντα χρήστη, όσο και πολλαπλών πρωτευόντων χρηστών. Μάλιστα μας απασχολεί κυρίως ο υπολογισμός των συναρτήσεων χρησιμότητας των πρωτευόντων και δευτερευόντων χρηστών, αφού μέσω αυτών αντικατοπτρίζεται η συνολική επίδοση του προτεινόμενου μηχανισμού.

Συνοπτικά, η γενική πορεία που ακολουθείται για την εξαγωγή των γραφημάτων είναι η εξής:

1. Από ένα σύνολο SUs επιλέγονται από τον PU, σύμφωνα με τον αλγόριθμο επιλογής αναμεταδοτών, αυτοί που θα χρησιμοποιηθούν ως αναμεταδότες.
2. Ακολουθώντας τη μέθοδο backward induction αφού οριστεί μια αρχική τιμή για το  $\alpha$  και για τις ισχύεις  $P_i$  με τις οποίες συμμετέχουν οι δευτερεύοντες εκπομποί στη συνεργατική διαδικασία, υπολογίζεται το σημείο ισορροπίας Nash στο οποίο συγκλίνει το διάνυσμα  $P_i$  και δοθέντος αυτού και της τιμής του  $\alpha$  υπολογίζεται το  $U_p$  του πρωτεύοντα χρήστη.
3. Καθώς επιθυμούμε μεγιστοποίηση του  $U_p$  επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία ελαττώνοντας την τιμή του  $\alpha$  μέχρι να καταλήξουμε στο μέγιστο  $U_p$  που μπορεί να επιτευχθεί.
4. Τέλος, έχοντας τις τιμές του  $\alpha$  και του  $P_i$  που οδήγησαν στη μεγιστοποίηση του  $U_p$  υπολογίζουμε το  $U_i$  για τους δευτερεύοντες χρήστες.

##### 4.4.1 Προσομοίωση συστήματος με έναν πρωτεύοντα χρήστη

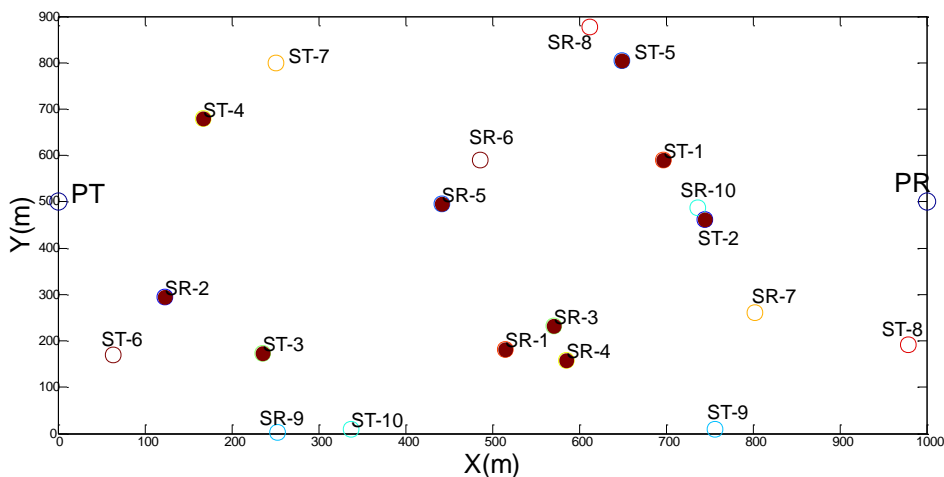
Στη συγκεκριμένη ενότητα έχει ληφθεί υπόψη ένα γεωμετρικό μοντέλο με έναν πρωτεύοντα χρήστη στο οποίο ο πρωτεύων πομπός (Primary Transmitter-PT) βρίσκεται στη θέση (0,500), ο πρωτεύοντας δέκτης (Primary Receiver-PR) βρίσκεται στη θέση (1000,500) και οι δευτερεύοντες πομποί (Secondary Transmitters-STs) βρίσκονται τυχαία τοποθετημένοι σε τετράγωνο με κέντρο στη θέση (500,500) και μήκος πλευράς  $D=1000\text{m}$ . Οι δευτερεύοντες δέκτες (Secondary Receivers-SRs) βρίσκονται τυχαία τοποθετημένοι στη γειτονιά των αντιστοίχων STs. Η ισχύς των SUs για την προσωπική τους μετάδοση,  $P_s$ , τίθεται ίση με 0.2W και το μέγεθος  $w_i$  τίθεται ίσο με 10 για όλους τους SUs. Η διασπορά του θορύβου είναι  $\sigma^2 = 10^{-6}$  και το βήμα ανανέωσης είναι  $\delta=10^{-4}$ .

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα της τυχαίας τοπολογίας του συστήματος με έναν πρωτεύοντα χρήστη και 10 SUs. Μάλιστα, τα ζεύγη ST-SR απεικονίζονται με την ίδια χρωματική απόχρωση και με ετικέτες που φανερώνουν τη χρησιμότητά τους ως προς τον PT και τα ζεύγη των αναμεταδοτών σημειώνονται με έντονο χρωματισμό. Έτσι, παραδείγματος χάρη ο αναμεταδοτής ST-1 έχει μεγαλύτερη χρησιμότητα από τον ST-2 καθώς βοηθά σε μεγαλύτερο βαθμό στη μετάδοση της πληροφορίας του PT αφού η ζεύξη PT1-ST1 και ST1-PR1 τυγχάνει ευνοϊκότερων συνθηκών, δηλαδή παρουσιάζει μεγαλύτερα κέρδη καναλιών. Με άλλα λόγια, χωρίς βλάβη της γενικότητας, η επιλογή των SUs ως αναμεταδοτών προκύπτει από την εξής σειρά:  $w_1 G_{1,P} G_{P,1} R_1 \geq w_2 G_{2,P} G_{P,2} R_2 \geq \dots \geq w_{10} G_{10,P} G_{P,10} R_{10}$  δεδομένου ότι ταυτόχρονα πληρούται το κριτήριο που τίθεται στον Αλγόριθμο Β. Στη συγκεκριμένη τοπολογία παρατηρούμε πως από τους 10 χρήστες οι 5 επιλέχθηκαν ως αναμεταδοτές. Ορίσαμε συντομογραφικά το μέγεθος  $w_i G_{i,P} G_{P,i} R_i$  ως  $wGGR$ . Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή των αναμεταδοτών, δηλαδή το μέγεθος  $wGGR$  που χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό των SUs, όπως η απόσταση μεταξύ STs και SRs και ο αριθμός των STs και θα μελετηθούν στη συνέχεια.

Πρέπει να τονισθεί ότι στο μοντέλο που προσομοιώθηκε και λάβαμε τα Σχήμα 4.5, Σχήμα 4.6 και Σχήμα 4.7 ελήφθησαν υπόψη τόσο οι απώλειες διαδρομής, όσο και το φαινόμενο των διαλείψεων. Δοθείσας της απόστασης  $d$  μεταξύ δυο οποιωνδήποτε κόμβων, το κέρδος καναλιού ( $G$ ) μεταξύ αυτών δίνεται από τη σχέση

$$G = k/d^n \quad (\text{Εξίσωση 4.37})$$

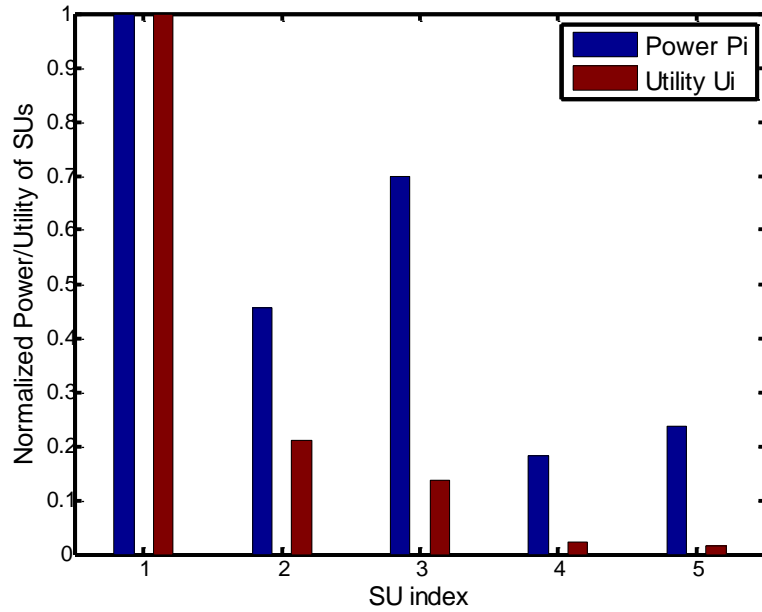
όπου  $n$  είναι ο συντελεστής απωλειών μετάδοσης και  $k$  είναι μια τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την Nakagami- $m$  κατανομή όπως περιγράφεται και στην αρχή του κεφαλαίου.



Σχήμα 4.5: Τυχαία τοπολογία του συστήματος με έναν PU

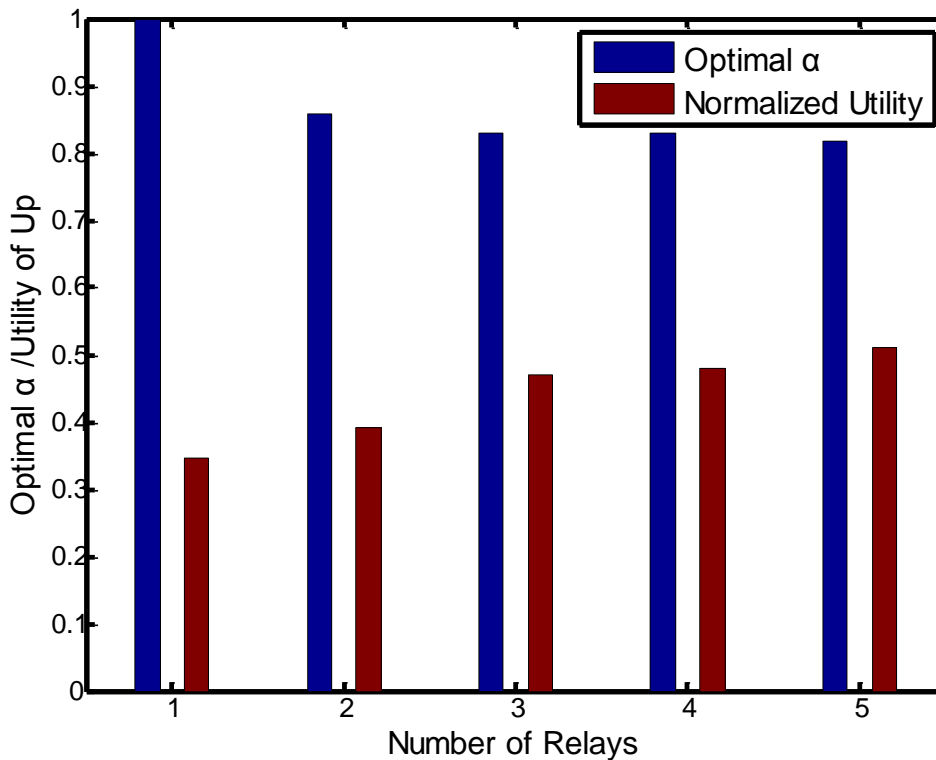


Στο Σχήμα 4.6 απεικονίζεται η κανονικοποιημένη ισχύς καθώς και η κανονικοποιημένη χρησιμότητα των δευτερευόντων χρηστών που έχουν επιλεγεί ως αναμεταδότες. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στον άξονα  $x$ , οι χρήστες ταξινομούνται με φθίνουσα σειρά της παραμέτρου  $wGGR$ . Όπως παρατηρείται από το σχήμα, οι SUs με μεγαλύτερη τιμή της παραμέτρου  $wGGR$  (οριζόμενο ως  $w_i G_{i,p} G_{p,i} R_i$ ) συνήθως προσφέρουν μεγαλύτερα επίπεδα συνεργατικής ισχύος  $P_i$  και αποκομίζουν μεγαλύτερη χρησιμότητα  $U_i$ . Από τις (Εξίσωση 4.7), (Εξίσωση 4.12) και (Εξίσωση 4.16) είναι εμφανές ότι οι SUs με μεγαλύτερο  $wGGR$  έχουν μεγαλύτερο κέρδος από τη συνεργασία τους με τον PU, αν θεωρηθεί ότι το κόστος ισχύος παραμένει σταθερό, με αποτέλεσμα να προσφέρουν περισσότερη ισχύ κατά τη φάση της συνεργασίας σε σχέση με τους άλλους SUs. Στο Σχήμα 4.6 αυτό δεν ισχύει στην περίπτωση των αναμεταδοτών 2 και 3, καθώς παρατηρούμε πως, ενώ το μέγεθος  $wGGR$  για τον αναμεταδότη 2 είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του αναμεταδότη 3, εντούτοις ο αναμεταδότης 3 μετέχει με πολύ μεγαλύτερη συνεργατική ισχύ από αυτή του αναμεταδότη 2. Αυτό συμβαίνει γιατί η ζεύξη  $ST_3 - SR_3$  παρουσιάζει ευνοϊκότερες συνθήκες για τη μετάδοση του  $ST_3$  σε σχέση με την αντίστοιχη του  $ST_2$ . Οι ευνοϊκότερες συνθήκες μεταφράζονται στο ότι ο ρυθμός μετάδοσης του  $ST_3$  είναι μεγαλύτερος από του  $ST_2$  και επομένως, πιστεύει ο πρώτος ότι θα επωφεληθεί από τη συνεργατική διαδικασία καθώς στη συνέχεια θα μεταδώσει την πληροφορία του με μεγάλο ρυθμό. Έτσι, ο αναμεταδότης 3 επιθυμεί να μετέχει με μεγάλο επίπεδο συνεργατικής ισχύος  $P_i$ , ώστε να εξασφαλίσει από τον PU μεγαλύτερη χρονοθυρίδα για την προσωπική του μετάδοση. Το γεγονός ότι η χρησιμότητα του αναμεταδότη 3 παραμένει σε χαμηλό επίπεδο δηλώνει ότι η συμμετοχή του στη συνεργασία δεν ωφελεί τόσο πολύ τον PU και τελικά αυτός δεν συνεισφέρει σε μεγάλο βαθμό στη μετάδοση ώστε να αποκτήσει και μεγαλύτερη χρησιμότητα. Με άλλα λόγια, αυτός επιθυμεί αλλά οι συνθήκες μετάδοσης της ζεύξης του ή ο ρυθμός μετάδοσης που παρέχει δεν του επιτρέπουν να κατέχει πιο ενεργή συμμετοχή. Οι υπόλοιποι αναμεταδότες μη δείχνοντας ενδιαφέρον για συνεργασία με τον PU συμμετέχουν με πολύ μικρά επίπεδα συνεργατικής ισχύος και λαμβάνουν πολύ μικρή τιμή χρησιμότητας. Επίσης, είναι λογικό οι SUs που δεν επιλέγονται ως αναμεταδότες να μη προσφέρουν ισχύ με αποτέλεσμα να έχουν μηδενική χρησιμότητα και δεν παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Παρουσίαση της βέλτιστης στρατηγικής και της χρησιμότητας των SUs στο σύστημα με έναν πρωτεύοντα χρήστη

Στο Σχήμα 4.7 απεικονίζονται η βέλτιστη στρατηγική  $\alpha^*$  καθώς και η χρησιμότητα του PU ως προς τον αριθμό των αναμεταδοτών. Από το σχήμα αυτό, παρατηρείται ότι η αύξηση του αριθμού των αναμεταδοτών προκαλεί αύξηση στη χρησιμότητα του PU και μείωση του βέλτιστου  $\alpha^*$ . Η παρατήρηση αυτή είναι εύλογη διότι αν αυξηθεί ο αριθμός των αναμεταδοτών τότε ο μεταξύ τους ανταγωνισμός γίνεται πιο έντονος, με αποτέλεσμα οι SUs να επιθυμούν να προσφέρουν υψηλότερη ισχύ για τη συνεργασία τους με τον PU, κάτι το οποίο είναι επωφελές για τη μετάδοση του PU. Μάλιστα, ο PU επιθυμεί να αυξάνει το χρόνο της δευτερεύουσας μετάδοσης για να γίνεται ακόμα πιο «σκληρός» ανταγωνισμός με μεγαλύτερα οφέλη για τον ίδιο. Επίσης παρατηρείται πως όταν υπάρχει μόνο ένας αναμεταδότης, το βέλτιστο  $\alpha^*$  είναι ίσο με 1. Αυτό σημαίνει ότι σε αυτήν την περίπτωση, ο PU θα διατηρήσει ολόκληρο το χρονικό πλαίσιο για την προσωπική του μετάδοση. Αυτό συμβαίνει γιατί ο μοναδικός αναμεταδότης δεν έχει κίνητρο για να συνεργαστεί αφού δεν υπάρχει ανταγωνισμός στην πρόσβαση του καναλιού. Σύμφωνα με την (Εξίσωση 4.12) η χρησιμότητα του μοναδικού αναμεταδότη είναι  $U_i = w_i(1-\alpha) - \frac{1}{2}\alpha P_i$ , η οποία μειώνεται μονότονα με το  $P_i$  και έτσι για να μεγιστοποιήσει τη χρησιμότητά του ο μοναδικός αναμεταδότης πρέπει να θέσει  $P_i = 0$ . Για το λόγο αυτό, ο PU δεν διατίθεται να μοιράσει τμήμα του χρονικού πλαισίου στο μοναδικό αναμεταδότη.



Σχήμα 4.7: Χρησιμότητα του PU και βέλτιστο  $\alpha$  σε σύστημα με έναν πρωτεύοντα χρήστη και διαφορετικό αριθμό αναμεταδοτών

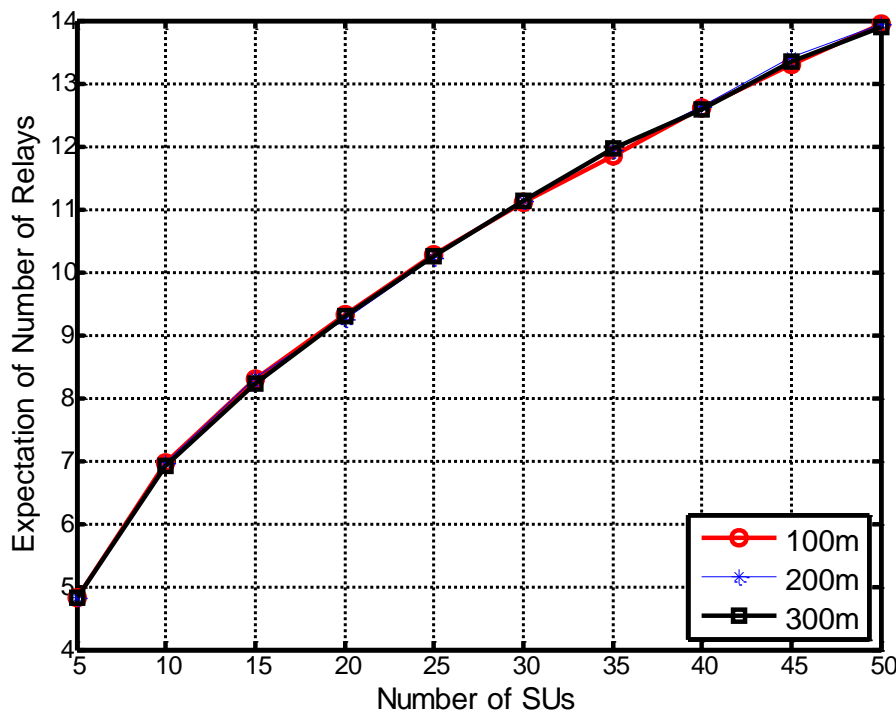
#### 4.4.2 Επίδραση του διαφορετικού αριθμού δευτερευόντων χρηστών στο σύστημα με ένα πρωτεύοντα χρήστη και τυχαία τοπολογία

Στην ενότητα αυτή εστιάζουμε τόσο στη μεταβολή του αριθμού των SUs, όσο και στη μεταβολή της απόστασης μεταξύ των STs και των SRs καθώς και στην επίδραση της παραμέτρου  $m$  της κατανομής Nakagami- $m$ . Στα Σχήμα 4.8, Σχήμα 4.9 και Σχήμα 4.10 ο αριθμός των SUs μεταβάλλεται από 5 μέχρι 50 και οι αποστάσεις μεταξύ των STs και SRs από 100m μέχρι 300m. Ακόμα για τα κέρδη καναλιών θεωρήθηκε ότι υπάρχουν μόνο απώλειες

μετάδοσης και όχι διαλείψεις, δηλαδή ισχύει ότι  $G \sim \frac{1}{d^n}$ .

Στο Σχήμα 4.8 απεικονίζεται ο αναμενόμενος αριθμός των αναμεταδοτών ως προς τον αριθμό των SUs για τρεις διαφορετικές αποστάσεις  $d=100, 200$  και  $300m$  μεταξύ των STs και SRs. Όπως παρατηρείται, ο εκτιμώμενος αριθμός των αναμεταδοτών αυξάνεται με την αύξηση των διαθέσιμων SUs και είναι σχεδόν ανεξάρτητος της απόστασης μεταξύ των STs και SRs. Το πρώτο σκέλος εξηγείται αφού με περισσότερους SUs στο σύστημα θα υπάρχουν περισσότεροι κατάλληλοι SUs για να επιλέξει ο PU και με τη σειρά του ο τελευταίος θα μπορεί να επιλέξει περισσότερους αναμεταδοτές. Όσον αφορά το δεύτερο σκέλος, αφού η απόσταση μεταξύ ST και SR επηρεάζει μόνο τη μετάδοση των SUs, αυτή θα έχει μικρή επίδραση στον εκτιμώμενο αριθμό των αναμεταδοτών που θα επιλεγούν από τον PU. Επομένως, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι αν και στο κριτήριο επιλογής των αναμεταδοτών

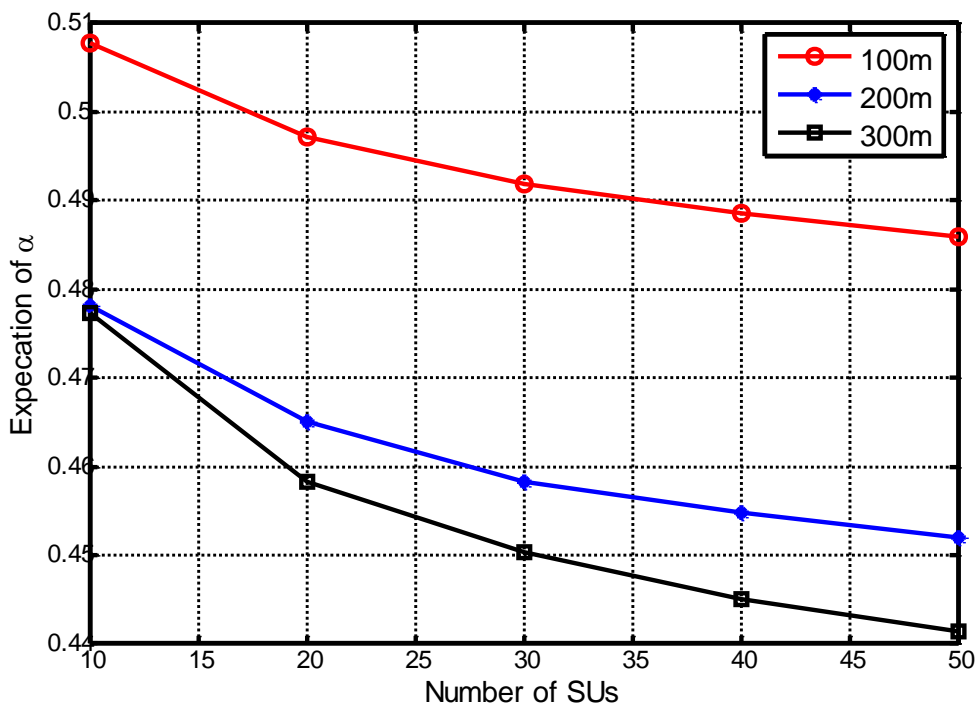
μετέχει το μέγεθος  $R$ , οι συνθήκες των ζεύξεων PT-ST και ST-PR έχουν μεγαλύτερη σημασία για τον PU σε σχέση με το απόλυτο μέγεθος του ρυθμού μετάδοσης του SU.



Σχήμα 4.8: Εκτίμηση αποτελεσμάτων 4000 επαναλήψεων με διαφορετικό αριθμό SUs και διαφορετική απόσταση μεταξύ STs και SRs: εκτίμηση αριθμού αναμεταδοτών

Στο Σχήμα 4.9 απεικονίζεται η εκτίμηση του  $\alpha$  με την αύξηση του αριθμού των δευτερευόντων χρηστών SUs για τρεις διαφορετικές αποστάσεις  $d=100,200$  και  $300m$  μεταξύ των STs και SRs. Καταδεικνύεται πως αν ο αριθμός των SUs είναι σταθερός, το εκτιμώμενο  $\alpha$  μειώνεται με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των STs και SRs. Με άλλα λόγια, ο PU διαθέτει μικρότερο χρονικό διάστημα στη μετάδοση των SUs όταν οι αποστάσεις μεταξύ των STs και SRs μειώνονται. Αυτό είναι εύλογο γιατί όταν οι αποστάσεις μεταξύ των STs και SRs μειώνονται, οι συνθήκες του καναλιού των SUs θα είναι καλύτερες και προκειμένου να μεταδώσουν, επιθυμούν να βοηθήσουν περισσότερο στη μετάδοση του PU για να τους παραχωρηθεί περισσότερος χρόνος πρόσβασης στο κανάλι. Έτσι, ο ανταγωνισμός μεταξύ των SUs γίνεται πιο έντονος και αυτό είναι ωφέλιμο για τον PU. Καθώς αυξάνονται, όμως, οι αποστάσεις μεταξύ των STs και SRs, αυτοί ενδιαφέρονται λιγότερο για τη συμμετοχή στη συνεργασία και προκειμένου ο ανταγωνισμός να καταστεί εξίσου έντονος ο PU θα πρέπει να μειώσει περισσότερο την τιμή του  $\alpha$ , ώστε οι SUs που κερδίζουν στον ανταγωνισμό να λαμβάνουν και μεγαλύτερες χρονοθυρίδες μετάδοσης. Ακόμα, αν οι αποστάσεις μεταξύ των STs και SRs είναι σταθερές, η εκτίμηση του  $\alpha$  μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των SUs, που σημαίνει ότι ο PU θα αφιερώνει περισσότερο χρόνο στους αναμεταδοτές. Αυτό οφείλεται στο ότι θα πρέπει να αυξήσει τις χρονοθυρίδες για τη μετάδοση των SUs αφού αυξάνεται και ο αριθμός αυτών, ώστε να έχουν κίνητρο να ανταγωνιστούν. Παρατηρείται επίσης ότι ο ρυθμός μείωσης του  $\alpha$  μειώνεται όταν ο αριθμός των SUs γίνεται αρκετά μεγάλος, συγκεκριμένα μεγαλύτερος του 20. Αυτό συμβαίνει γιατί όταν ο αριθμός των SUs αυξάνεται, ο PU έχει περισσότερους κατάλληλους SUs να επιλέξει σαν αναμεταδοτές και

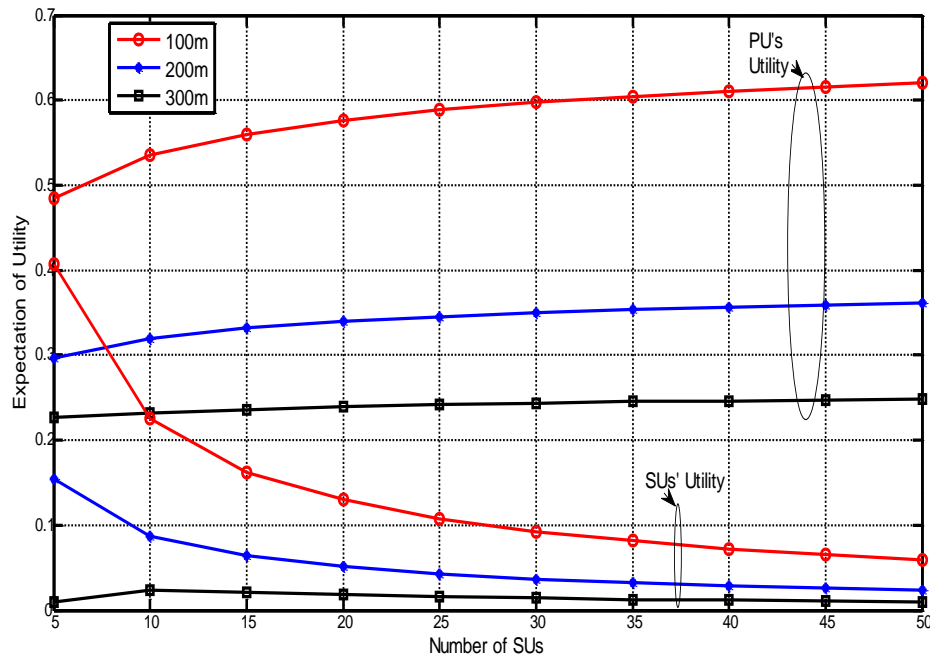
τελικά όπως δείχνει και το Σχήμα 4.8 επιλέγει περισσότερους αναμεταδότες. Αυτό το γεγονός οδηγεί στην αύξηση ολόκληρου του χρονικού διαστήματος που αντιστοιχεί στη μετάδοση των SUs. Από την άλλη πλευρά, καθώς οι SUs είναι περισσότερο ανταγωνιστικοί, το αυξανόμενο ποσοστό της διάρκειας μετάδοσης των SUs δεν μπορεί να ακολουθήσει το αυξανόμενο ποσοστό του αριθμού των αναμεταδοτών που φαίνεται στο Σχήμα 4.8 και έτσι κάθε αναμεταδότης θα κατέχει μικρότερη χρονοθυρίδα μετάδοσης. Δηλαδή, ακόμα και αν οι SUs αυξάνονταν επ' άοριστον ο PU δε θα μπορούσε να μειώνει το  $\alpha$  μέχρι να φτάσει θεωρητικά στη μηδενική τιμή γιατί τότε δε θα υπάρχει χρόνος για την προσωπική μετάδοσή του, οπότε περιορίζεται το πόσο μπορεί να αυξήσει την τιμή που αφιερώνει στη μετάδοση των αναμεταδοτών.



Σχήμα 4.9: Εκτίμηση αποτελεσμάτων 4000 επαναλήψεων με διαφορετικό αριθμό SUs και διαφορετική απόσταση μεταξύ STs και SRs: εκτίμηση του  $\alpha^*$

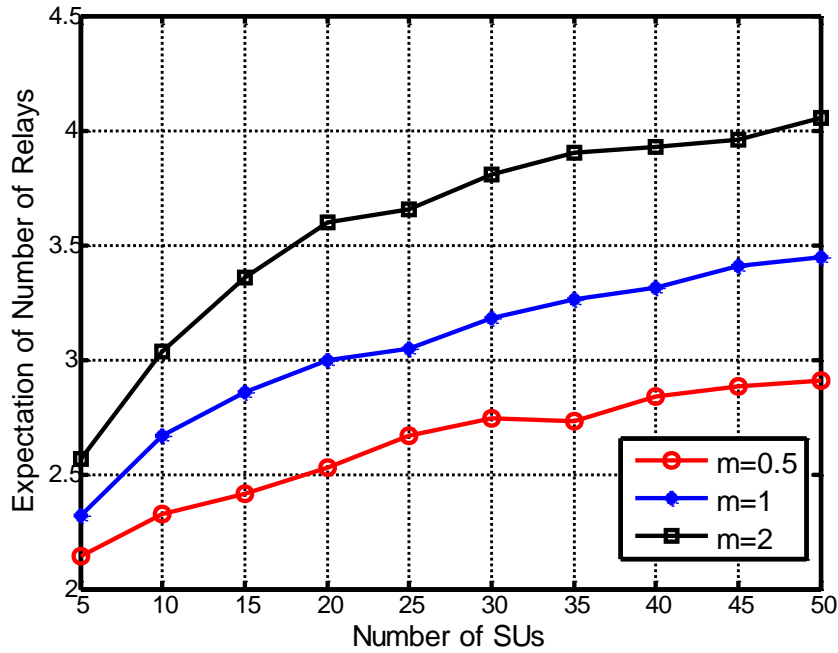
Το Σχήμα 4.10 απεικονίζει την εκτίμηση των χρησιμοτήτων των SUs και του PU ως προς τον αριθμό των SUs για διαφορετικές αποστάσεις  $d=100,200$  και  $300m$  μεταξύ των STs και SRs. Από τις δυο ομάδες καμπυλών προκύπτει ότι η εκτιμώμενη χρησιμότητα των SUs μειώνεται με την αύξηση του αριθμού τους και αυξάνεται με τη μείωση των μεταξύ τους αποστάσεων, ενώ τα αντίθετα συμβαίνουν στη μεταβολή της χρησιμότητας του PU. Αυτό το γεγονός μπορεί να εξηγηθεί καθώς, με σταθερές τις αποστάσεις ST-SR, αν ο αριθμός των SUs αυξηθεί, ο ανταγωνισμός θα γίνει πιο έντονος και οι SUs θα καταβάλουν μεγαλύτερη προσπάθεια για να αποκτήσουν ευκαιρία μετάδοσης που θα οδηγήσει σε μείωση της χρησιμότητάς τους. Η χρησιμότητα του PU θα αυξηθεί με την αύξηση του αριθμού των SUs αφού θα αυξηθούν οι αναμεταδότες, ο μεταξύ τους ανταγωνισμός θα γίνει εντονότερος και αυτοί θα προσφέρουν περισσότερη συνεργατική ισχύ για να αποκτήσουν χρονοθυρίδα μετάδοσης. Έτσι, επωφελείται ο PU και αυξάνεται η χρησιμότητά του. Λόγω αυτού για σταθερή απόσταση ST-SR η  $U_p$  παρουσιάζει ανοδική πορεία. Αν οι αποστάσεις μεταξύ των

STs και SRs ελαττωθούν, που σημαίνει ότι οι SUs έχουν καλύτερες συνθήκες καναλιού ώστε να αποκτήσουν μεγαλύτερη χρησιμότητα, οι SUs θα είναι περισσότερο πρόθυμοι να συνεργαστούν με τον PU και ο PU θα έχει μεγαλύτερο κέρδος από τη συνεργατική διαδικασία. Για αυτό, ενδεικτικά, η  $U_p$  στα 100m, με σταθερό αριθμό SUs, είναι μεγαλύτερη από τη  $U_p$  στα 200m.



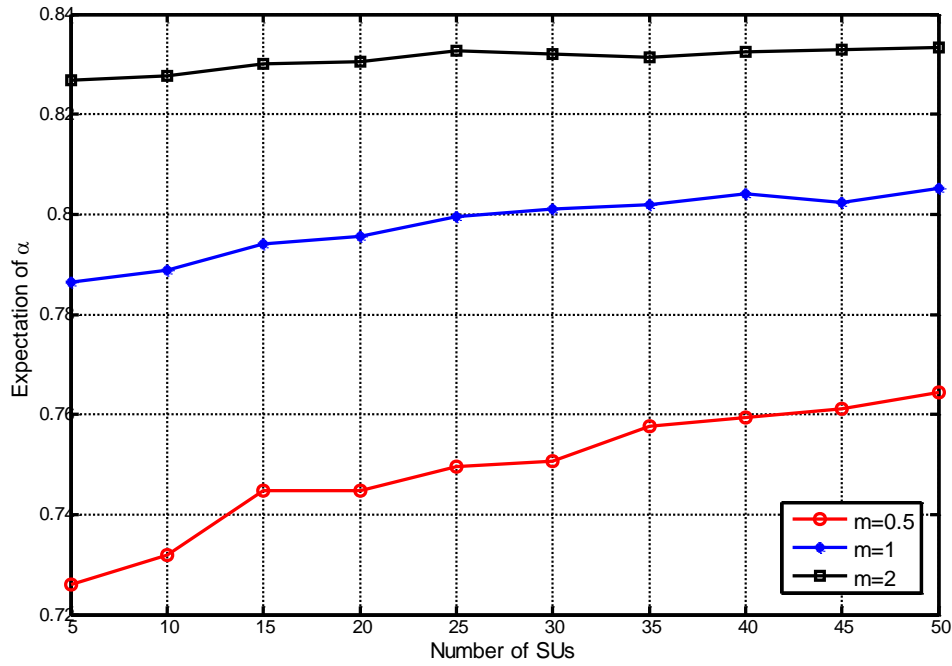
**Σχήμα 4.10:** Εκτίμηση αποτελεσμάτων 4000 επαναλήψεων με διαφορετικό αριθμό SUs και διαφορετική απόσταση μεταξύ STs και SRs: εκτίμηση των χρησιμότητων του PU και των SUs

Στα Σχήμα 4.11, Σχήμα 4.12 και Σχήμα 4.13 που ακολουθούν οι αποστάσεις ST-SR λαμβάνονται 100m, ο αριθμός των SUs μεταβάλλεται από 5 μέχρι 50 ενώ θεωρείται ότι οι διαλείψεις ακολουθούν την κατανομή Nakagami- $m$  τάξης. Γενικά, ισχύει πως όσο το  $m$  μειώνεται οι διαλείψεις γίνονται ισχυρότερες και άρα οι συνθήκες της ζεύξης δυσχεραίνουν. Στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζεται η εκτιμώμενη τιμή των αναμεταδοτών με αύξηση των SUs για τιμές της παραμέτρου  $m=0.5, 1$  και  $2$ . Καταδεικνύεται ότι ο εκτιμώμενος αριθμός των αναμεταδοτών αυξάνεται με την αύξηση των SUs για σταθερό  $m$ , ενώ για σταθερό αριθμό SUs ο αριθμός των αναμεταδοτών μειώνεται με τη μείωση του  $m$ . Το πρώτο σκέλος εξηγείται καθώς αφού οι SUs είναι περισσότεροι αυτό θα οδηγήσει στην επιλογή περισσότερων αναμεταδοτών από τον PU. Όσον αφορά το δεύτερο σκέλος, καθώς οι συνθήκες χειροτερεύουν σε όλες τις ζεύξεις και κυρίως στις PT-STs και STs-PR, τα κέρδη των ζεύξεων θα ελαττωθούν και επομένως λιγότεροι SUs θα επιλεγούν ως αναμεταδοτές για σταθερό αριθμό SUs, αφού δε θα πληρούν το κριτήριο του Αλγορίθμου B. Έτσι, όσο μειώνεται το  $m$  οι αναμεταδοτές θα γίνουν όλο και λιγότεροι. Ακόμα, είναι φανερό πως καθώς οι συνθήκες βελτιώνονται ο ρυθμός αύξησης των αναμεταδοτών αυξάνει, αφού όλο και περισσότεροι SUs πληρούν το κριτήριο του Αλγορίθμου B και επιλέγονται ως αναμεταδοτές.



Σχήμα 4.11: Εκτίμηση αποτελεσμάτων 4000 επαναλήψεων με διαφορετικό αριθμό SUs και διαφορετική παράμετρο  $m$ : εκτίμηση αριθμού αναμεταδοτών

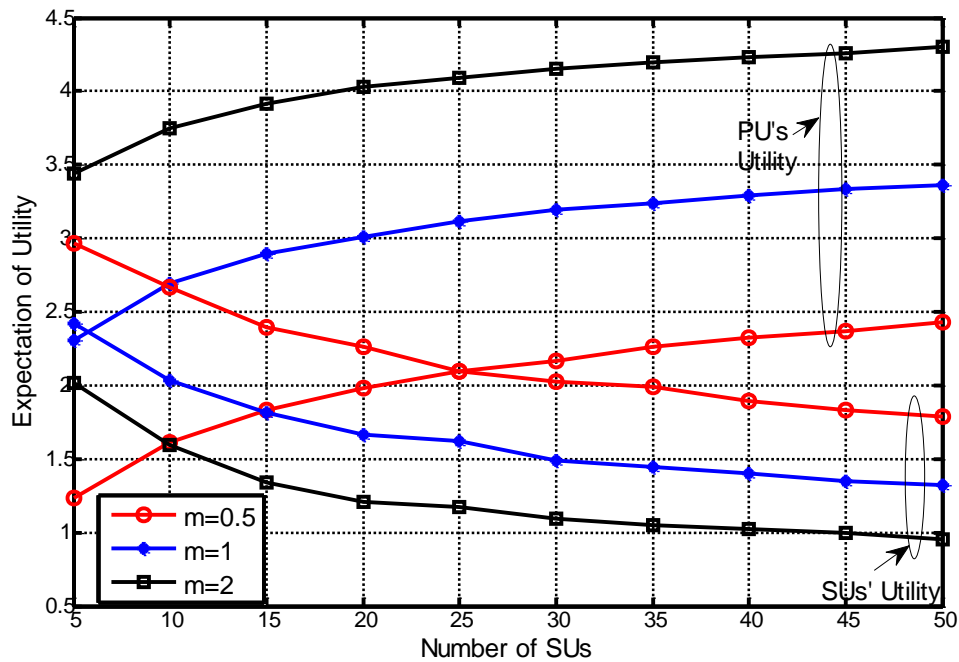
Στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζεται η εκτίμηση της βέλτιστης τιμής του  $\alpha$  με την αύξηση του αριθμού των χρηστών, για τρεις τιμές της παραμέτρου  $m$  της κατανομής Nakagami. Καταρχήν παρατηρούμε πως αυξάνοντας τους SUs και για σταθερό  $m$  ο PU παρέχει μικρότερο διάστημα στους δευτερεύοντες χρήστες. Αυτό σημαίνει ότι θέλει να τους απωθήσει από τον έντονο ανταγωνισμό, ίσως γιατί ένας μεγαλύτερος αριθμός από SUs που επιθυμούν να συνεργαστούν δεν προσφέρει στον PU μεγαλύτερη ωφέλεια. Ακόμα, η προσδοκώμενη τιμή του  $\alpha$  μειώνεται με τη επιδείνωση των διαλείψεων και αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι ο PU επιθυμεί να συνεργαστεί για μεγαλύτερη χρονική διάρκεια για να βοηθηθεί στη μετάδοση του σήματός του στο δυσχερές περιβάλλον. Για να επιτευχθεί αυτό, όμως, πρέπει να ανταγωνιστούν περισσότεροι SUs, ώστε να πληρεί μεγαλύτερο μέρος αυτών το κριτήριο του Αλγορίθμου Β και έτσι, θέτει ο PU ως κίνητρο το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα που παρέχει στη μετάδοση των αναμεταδοτών. Τέλος, παρατηρούμε ότι καθώς το περιβάλλον βελτιώνεται, ο ρυθμός αύξησης του  $\alpha$  σε κάθε καμπύλη σταθερού  $m$  ελαττώνεται και για  $m=2$  τείνει να είναι μηδενικός. Αυτό ίσως οφείλεται στο ότι αφού βελτιώνονται οι συνθήκες, ο PU θα ωφεληθεί περισσότερο από τη συνεργασία με τους SUs και έτσι προβαίνει σε όλο και μικρότερη αύξηση του  $\alpha$  για να αυξήσει τον ανταγωνισμό των SUs και να αποκτήσει τελικά περισσότερους αναμεταδοτές.



**Σχήμα 4.12:** Εκτίμηση αποτελεσμάτων 4000 επαναλήψεων με διαφορετικό αριθμό SUs και διαφορετική παράμετρο  $m$ : εκτίμηση του  $\alpha^*$

Το Σχήμα 4.13 παρουσιάζει την εκτίμηση των χρησιμοτήτων των SUs και του PU ως προς τον αριθμό των SUs για τις τρεις διαφορετικές τιμές της παραμέτρου  $m$ . Από τις δυο ομάδες καμπυλών προκύπτει ότι η εκτιμώμενη χρησιμότητα των SUs μειώνεται με την αύξηση του αριθμού τους και με την αύξηση της παραμέτρου  $m$ , ενώ η εκτιμώμενη  $U_p$  αυξάνεται με την αύξηση των SUs και με την αύξηση της παραμέτρου  $m$ . Τόσο η αύξηση της  $U_p$ , όσο και η μείωση της χρησιμότητας των δευτερευόντων χρηστών με την αύξηση των SUs έχει εξηγηθεί στο σχολιασμό στο Σχήμα 4.10. Το γεγονός ότι η χρησιμότητα του PU αυξάνεται με τη βελτίωση των συνθηκών του περιβάλλοντος οφείλεται στην αύξηση του αριθμού των αναμεταδοτών που επιλέγονται, όπως έδειξε το Σχήμα 4.11. Όσον αφορά την εκτιμώμενη χρησιμότητα των SUs, αυτή μειώνεται με τη βελτίωση των συνθηκών της ζεύξης αφού ο PU με τη σειρά του αυξάνει την τιμή του  $\alpha$  και απωθεί τους SUs, έτσι αυτοί δεν ενδιαφέρονται να μετέχουν στη συνεργασία με υψηλά επίπεδα συνεργατικής ισχύος. Επομένως, οι τελευταίοι δεν προσφέρουν μεγάλη ωφέλεια στη μετάδοση του PU και συνεπώς η χρησιμότητά τους μειώνεται.





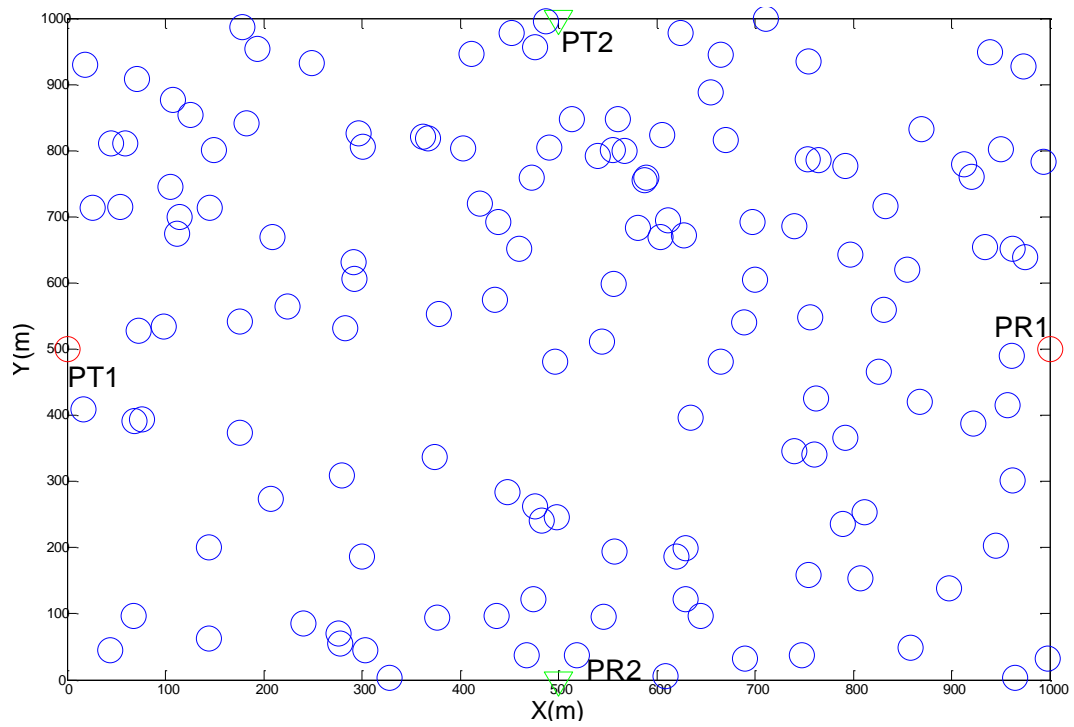
Σχήμα 4.13: Εκτίμηση αποτελεσμάτων 4000 επαναλήψεων με διαφορετικό αριθμό SUs και διαφορετική παράμετρο  $m$ : εκτίμηση των χρησιμότητων του PU και των SUs

#### 4.4.3 Προσομοίωση συστήματος με πολλαπλούς πρωτεύοντες χρήστες

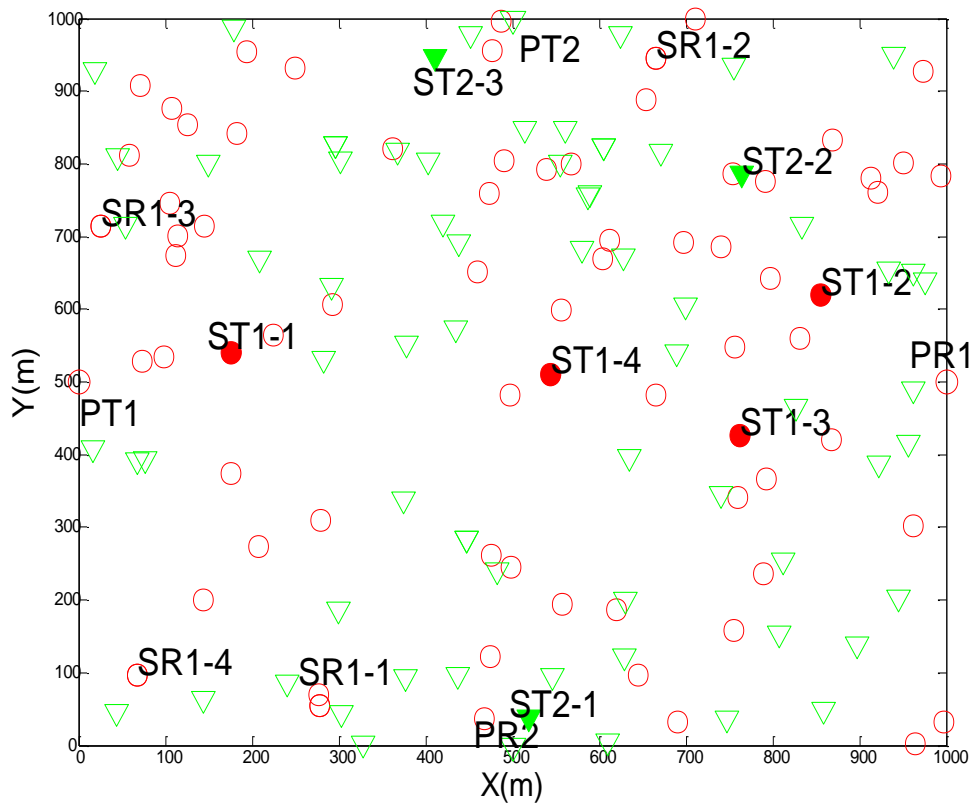
Στη συγκεκριμένη ενότητα προσομοιώνεται ένα σύστημα με πολλαπλούς πρωτεύοντες χρήστες και συγκεκριμένα δυο PUs. Οι  $PT_1$ ,  $PR_1$ ,  $PT_2$  και  $PR_2$  τοποθετούνται στις θέσεις (0,500), (1000,500), (500,1000) και (500,0) αντίστοιχα. Οι άλλες παράμετροι παραμένουν ίδιες με αυτές του συστήματος με έναν πρωτεύοντα χρήστη.

Στο Σχήμα 4.14 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα της τοπολογίας του συστήματος με 80 SUs, πριν γίνει η επιλογή των αναμεταδοτών. Οι  $PT_1$  και  $PR_1$  απεικονίζονται με κόκκινο κύκλο, οι  $PT_2$  και  $PR_2$  με πράσινο τρίγωνο και οι διάσπαρτοι SUs με μπλε κύκλους.

Στο Σχήμα 4.15 οι κόκκινοι κύκλοι παριστάνουν τους STs που εκχωρούνται στον  $PU_1$  και τα πράσινα τρίγωνα τους STs που εκχωρούνται στον  $PU_2$ . Μάλιστα οι αναμεταδότες των δυο PUs συνοδεύονται από έντονο χρωματισμό και ετικέτες που φανερώνουν σε ποιόν PU ανήκουν, αλλά και τη θέση που κατέχουν στο αντίστοιχο σύνολο των αναμεταδοτών. Για παράδειγμα η ετικέτα  $ST_i-j$  φανερώνει ότι ο συγκεκριμένος ST έχει εκχωρηθεί ως αναμεταδότης στον  $PU_i$  και κατέχει την  $j$ -οστή θέση στο σύνολο των αναμεταδοτών του  $PU_i$ . Στη συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρούμε ότι οι δυο PUs έχουν επιλέξει τον ίδιο αριθμό δευτερευόντων χρηστών και ο  $PU_1$  χρησιμοποιεί 4 αναμεταδότες στη συνεργατική διαδικασία ενώ ο  $PU_2$  3 αναμεταδότες.



Σχήμα 4.14: Τοπολογία συστήματος με δυο πρωτεύοντες χρήστες



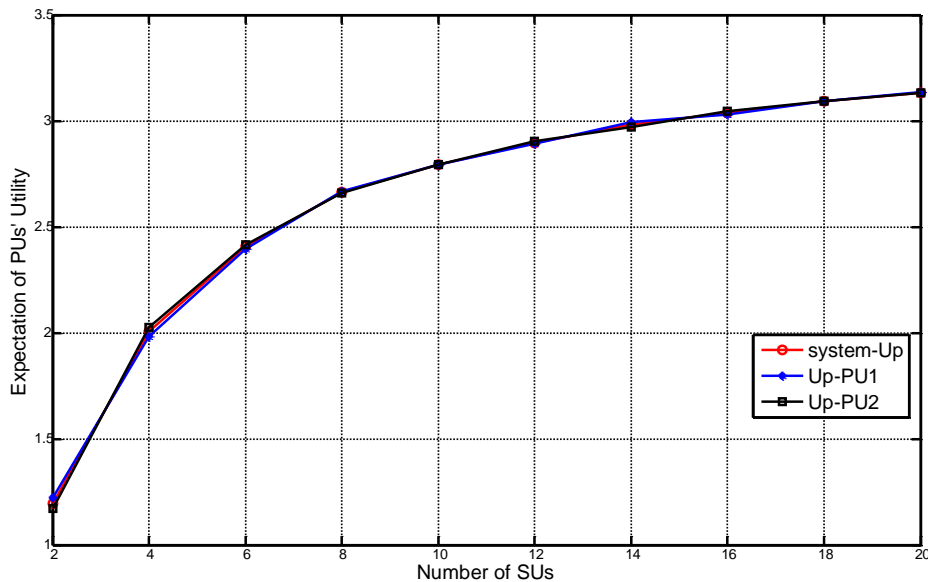
Σχήμα 4.15: Παρουσίαση τόσο της εκχώρησης των SUs, όσο και των αντίστοιχων αναμεταδοτών σε κάθε PU

#### 4.4.4 Επίδοση του συστήματος πολλαπλών πρωτεύοντων χρηστών

Στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζεται η μέση χρησιμότητα των δυο PUs, όπως προέκυψε εφαρμόζοντας τον προτεινόμενο ευρετικό μηχανισμό, ως συνάρτηση του αυξανόμενου αριθμού των SUs. Επίσης, παρατίθενται οι χρησιμότητες και των δυο PUs. Για την εύρεση της

μέσης χρησιμότητας του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η σχέση  $\frac{\sum_{i=1}^{N_p} U_p(i)}{N_p}$  όπου με  $N_p$

συμβολίζεται ο αριθμός των PUs που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι δυο. Ακόμα, ο αριθμός των SUs τίθεται από 2 μέχρι 20 και η απόσταση μεταξύ των STs και SRs είναι σταθερή και ίση με 100m. Το  $\varepsilon$  λαμβάνει τέτοια τιμή που εγγυάται τη δικαιοσύνη, δηλαδή θέτουμε το  $\varepsilon$  έτσι ώστε κατά τη διάρκεια της εκχώρησης των SUs, κανένας από τους PUs να μην μπορεί να επιλέξει διαδοχικούς SUs. Παρατηρούμε πως οι καμπύλες χρησιμοτήτων των PUs ταυτίζονται, γεγονός που δείχνει ότι η τιμή του  $\varepsilon$  είναι τέτοια που προσδίδει δικαιοσύνη στον ευρετικό αλγόριθμο. Η μέση  $U_p$  του συστήματος αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των SUs και μάλιστα η μορφή της καμπύλης είναι όμοια με αυτή που προέκυψε από τις προσομοιώσεις του συστήματος με τον έναν πρωτεύοντα χρήστη. Αυτό συμβαίνει γιατί για καθέναν από τους PUs ξεχωριστά συνεχίζουν να ισχύουν αυτά που περιγράφονται στην ανάλυση που προηγείται από το Σχήμα 4.10 και απλώς στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε αθροιστικό συνδυασμό των χρησιμοτήτων των δυο PUs, ο οποίος δεν αλλάζει τη μορφή της εξαγόμενης καμπύλης.



Σχήμα 4.16: Καμπύλη μέσης χρησιμότητας των PUs για σύστημα με δυο πρωτεύοντες χρήστες

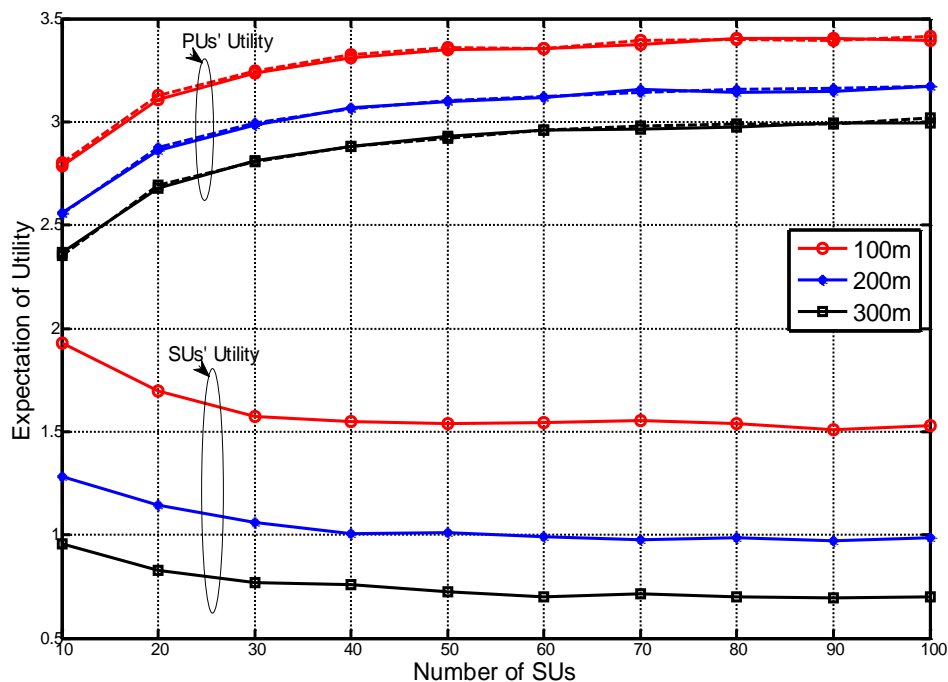
#### 4.4.5 Επίδραση του διαφορετικού αριθμού δευτερευόντων χρηστών στο σύστημα με πολλαπλούς πρωτεύοντες χρήστες και τυχαία τοπολογία

Στην ενότητα αυτή εστιάζουμε τόσο στη μεταβολή του αριθμού των SUs, όσο και στη μεταβολή της απόστασης μεταξύ των STs και των SRs. Ο αριθμός των SUs μεταβάλλεται από 10 μέχρι 100 και οι αποστάσεις μεταξύ των STs και SRs από 100m μέχρι 300m. Το Σχήμα 4.17 είναι αποτέλεσμα 4000 επαναλήψεων.

Στο Σχήμα 4.17 παρουσιάζεται η επίδραση των δυο προαναφερθέντων παραγόντων στην εκτίμηση της χρησιμότητας των PUs και της μέσης χρησιμότητας των SUs. Η μέση

χρησιμότητα των SUs δίνεται από τη σχέση  $\frac{\sum_{k=1}^{N_p} U_i(k)}{N_p}$ . Με συμπαγή γραμμή παρουσιάζεται

η καμπύλη χρησιμότητας του PU<sub>1</sub> και με στικτή γραμμή του PU<sub>2</sub>. Παρατηρούμε ότι οι δυο καμπύλες που αντιστοιχούν στους PU<sub>1</sub> και PU<sub>2</sub> συμπίπτουν και άρα ο ευρετικός μηχανισμός είναι δίκαιος, όπως συμπεραίνεται και στο Σχήμα 4.16. Επιπλέον, τα εξαγόμενα γραφήματα είναι όμοια με αυτά του συστήματος με έναν πρωτεύοντα χρήστη και αυτό φανερώνει ότι με το συνεργατικό μηχανισμό οι επιπτώσεις του ανταγωνισμού μεταξύ των δυο PUs εξασθενούν.



Σχήμα 4.17: Εκτίμηση αποτελεσμάτων 4000 επαναλήψεων με διαφορετικό αριθμό SUs και διαφορετική απόσταση μεταξύ STs και SRs: εκτίμηση των χρησιμότητων των PUs και των SUs

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα - Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στο προηγούμενο Κεφάλαιο μελετήθηκε η επίδοση ενός γνωστικού ραδιοσυστήματος τόσο με έναν, όσο και με πολλαπλούς πρωτεύοντες χρήστες και πολλαπλούς δευτερεύοντες χρήστες ως προς τις μεταβολές διαφορετικών παραμέτρων. Χαρακτηριστικές παράμετροι αποτελούν ο αριθμός των δευτερευόντων χρηστών, η μεταξύ τους απόσταση και η αλλαγή των συνθηκών του περιβάλλοντος. Σε κάθε περίπτωση προέκυψαν διαγράμματα για την επίδοση των PUs και SUs στις μεταβολές των παραπάνω παραμέτρων. Από τα διαγράμματα αυτά εξήχθησαν συμπεράσματα για το πώς οι PUs και SUs συμπεριφέρονται και αλληλεπιδρούν μέσα στο γνωστικό δίκτυο. Τα σημαντικότερα συμπεράσματα παρουσιάζονται, συνοπτικά, στο παρόν Κεφάλαιο και είναι τα εξής:

- Όσον αφορά την επιλογή των αναμεταδοτών, αυτό που έχει σημαντικότερη επίδραση στον πρωτεύοντα χρήστη είναι οι συνθήκες των ζεύξεων PT-ST και ST-PR, σε μικρότερο βαθμό ο ρυθμός μετάδοσης που παρέχει ο δευτερεύοντας χρήστης και σχεδόν καθόλου οι αποστάσεις μεταξύ των ST-SR, αφού τα δυο τελευταία μεγέθη αφορούν κυρίως τη μετάδοση μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών.
- Ο πρωτεύοντας χρήστης επωφελείται από τον έντονο ανταγωνισμό μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών και συνεπώς αυξάνεται η χρησιμότητά του. Ο ανταγωνισμός γίνεται έντονος είτε με την αύξηση του αριθμού των SUs, είτε με τη μείωση των μεταξύ τους αποστάσεων. Με τη σειρά τους οι δευτερεύοντες χρήστες επωφελούνται από τη μείωση των μεταξύ τους αποστάσεων αφού συμμετέχουν πιο ενεργά στη διεκδίκηση χρονοθυρίδας για τη μετάδοσή τους και ανταμείβονται περισσότερο από τον PU. Βέβαια, ζημιώνονται όσο αυξάνονται σε αριθμό αφού ανταγωνίζονται «σκληρότερα». Το γεγονός ότι τόσο στο σύστημα με έναν πρωτεύοντα, όσο και σε αυτό με δυο πρωτεύοντες χρήστες, παρουσιάζονται παρόμοιες καμπύλες χρησιμότητας, φανερώνει ότι ο προτεινόμενος ευρετικός μηχανισμός εξαλείφει τις επιπτώσεις πιθανού ανταγωνισμού μεταξύ των δυο PUs.
- Γενικά, ο PU καθορίζει τον ανταγωνισμό μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών και κατ'επέκταση τους αναμεταδότες του ρυθμίζοντας το χρόνο που διανέμει σε αυτούς για την προσωπική μετάδοσή τους. Έτσι, αν θέλει να αυξήσει τον ανταγωνισμό πρέπει να αυξήσει και τις χρονοθυρίδες που αντιστοιχούν στη μετάδοση των αναμεταδοτών. Όμως, ακόμα, και αν αυξάνονται πολύ οι SUs, δεν παρουσιάζεται αντίστοιχη αύξηση του συγκεκριμένου χρόνου και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ταυτόχρονα ελαττώνεται ο χρόνος της μετάδοσης του PU. Επομένως, η αύξηση αυτή είναι κορεσμένη, γιατί διαφορετικά θα οδηγούσε σε όλο και μικρότερο χρόνο πρωτεύουσας μετάδοσης και αντί να υπάρχει ωφέλεια του PU από τη συνεργατική διαδικασία, αυτός θα ζημιωνόταν.
- Τέλος, όταν οι συνθήκες διάδοσης των ζεύξεων γίνονται δυσχερέστερες, λόγω έντονων διαλείψεων, ο PU χρειάζεται μεγαλύτερη βοήθεια για να μεταδώσει την πληροφορία του σε επαρκή ποιότητα και έτσι αυξάνει το χρόνο δευτερεύουσας μετάδοσης για να προσελκύσει περισσότερους αναμεταδότες. Για αυτό οι τελευταίοι απολαμβάνουν μεγαλύτερη χρησιμότητα όταν είναι δυσχερέστερες οι συνθήκες.

Αντίθετα σε ευνοϊκότερες συνθήκες ο ΡU δεν έχει τόσο μεγάλη ανάγκη τους αναμεταδότες και αυξάνει το χρόνο της προσωπικής του μετάδοσης αποκτώντας μεγαλύτερη ωφέλεια και οδηγώντας τους SUs σε μικρότερη χρησιμότητα. Έτσι, θα μπορούσε να εξαχθεί το συμπέρασμα πως όταν οι συνθήκες διάδοσης είναι δυσμενέστερες ο ρόλος των SUs είναι σημαντικότερος για τον ΡU σε σχέση με την περίπτωση ευνοϊκότερων συνθηκών.

Τα μοντέλα που προσομοιώθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία μπορούν να επεκταθούν σημαντικά προσθέτοντας περισσότερες παραμέτρους που απεικονίζουν τις διαρκείς μεταβολές τους περιβάλλοντος, ώστε να αποδώσουν μια πιο ρεαλιστική εικόνα ενός γνωστικού δικτύου. Συγκεκριμένα παρατίθενται κάτωθι τόσο προτάσεις για την επέκταση των συγκεκριμένων μοντέλων, όσο και γενικότερες ιδέες για την αντιμετώπιση μελλοντικών προκλήσεων στα γνωστικά δίκτυα:

- Επέκταση του μοντέλου με τους δυο πρωτεύοντες χρήστες σε περισσότερους και με μεγαλύτερο αριθμό δευτερευόντων χρηστών και εξέταση των χρησιμότητων σε περίπτωση δίκαιου και μη δίκαιου αλγορίθμου εκχώρησης SUs σε ΡUs. Θα μπορούσαν οι SUs να επιλέγουν τον ΡU εκείνον για τον οποίο θα ανταγωνίζονταν, αφού εξέταζαν ποιός πρωτεύων χρήστης είναι αυτός που τους παρέχει τη μεγαλύτερη χρησιμότητα.
- Ανάπτυξη αλγορίθμων που είναι ικανοί να προσομοιώνουν ένα δυναμικά μεταβαλλόμενο γνωστικό περιβάλλον. Μέχρι στιγμής, κυρίως, έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι για στατικά περιβάλλοντα που προσπαθούν να καταλήξουν σε βέλτιστες λύσεις σύμφωνα με κάποια κριτήρια. Όμως, τα κινητά περιβάλλοντα είναι δυναμικά και τα χαρακτηριστικά των χρηστών αλλάζουν καθώς κινούνται στο χρόνο και στο χώρο. Έτσι, πρέπει να αναπτυχθούν αλγόριθμοι που θα παρέχουν αποδοτικές λύσεις σε ποικίλες συνθήκες και σενάρια.
- Χρήση στοχαστικών παιγνίων για την μοντελοποίηση της τυχαιότητας του περιβάλλοντος, της κίνησης των χρηστών σε αυτό και της ανταγωνιστικής συμπεριφοράς τους.
- Ανάπτυξη αλγορίθμων που οδηγούν στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, χωρίς να θυσιάζεται QoS, μεταξύ των πρωτευόντων και δευτερευόντων δικτύων στο πλαίσιο της γενικότερης «πράσινης» επικοινωνίας που αναπτύσσεται στην εποχή μας, ώστε να ελαττωθεί η μόλυνση του περιβάλλοντος.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Marcus, M. J., Kolodzy, P. and Lippman, A. (2005). "Reclaiming the vast wasteland: why unlicensed use of the white space in the TV bands will not cause interference to DTV viewers," New America Foundation: Wireless Future Program Report.
- [2] Marcus, M. J. (2005). "Unlicensed Cognitive Sharing of TV Spectrum: The Controversy at the Federal Communications Commission", IEEE Communications Magazine, vol. 43, no. 5.
- [3] FCC. (2002). "Report of the spectrum efficiency group", FCC Spectrum Policy Task Force, Report, 2002-11.
- [4] McHenry, M. A., Tenhula, P. A., McCloskey, D., Roberson, D. A. and Hood, C. S. (2006). "Chicago spectrum occupancy measurements & analysis and a long-term studies proposal" in Proceedings of First International Workshop on Technology and Policy for Accessing Spectrum (TAPAS). ACM, p. 1.
- [5] Niyato, D., Hossain, E. and Han, Z. (2009). *Dynamic Spectrum Access and Management in Cognitive Radio Networks*, Cambridge University Press, New York.
- [6] Mitola III, J. and Maguire, G. Q. Jr. (1999). "Cognitive radio: making software radios more personal", IEEE Personal Communications Magazine, vol. 6, no. 4, pp. 13–18.
- [7] Mitola, J. (2000). "Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio", PhD Dissertation, KTH, Stockholm, Sweden.
- [8] Wang, X., Zheng, L., Pengchao, X., Youyun, X., Xinbo, G. and Hsiao-Hwa, C. (2009). "Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks—An Auction based Approach", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics.
- [9] Jondral, F. K. (2005). "Software-defined radio: basics and evolution to cognitive radio", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 5, no. 3, pp. 275–283.
- [10] Liu, R. K. J. and Wang, B. (2011). *Cognitive Radio Networking and Security : A Game – Theoretic View*, Cambridge University Press, New York.
- [11] Tragos, E. Z., Zeadally, S., Fragkiadakis, A. G. and Siris, V. A. (2013). "Spectrum assignment in cognitive radio networks : A comprehensive survey", IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 15, no. 3
- [12] Haykin, S. (2005). "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications" IEEE Journal on Selected Areas Communications, vol. 23, no. 2, pp. 201–220.
- [13] Shepard, T. J. (1995). "Decentralized channel management in scalable multihop spread-spectrum packet radio networks", Ph.D. Dissertation, MIT, Cambridge, MA.
- [14] Gupta, P. and Kumar, P. R. (2000). "The capacity of wireless networks," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 46, no. 2, pp. 388–404.
- [15] Naeem, M., Anpalagan, A., Jaseemuddin, M. and Lee, C. D. (2013). "Resource allocation techniques in cooperative cognitive radio networks", IEEE Communications Surveys & Tutorials, accepted for publication.
- [16] Goldsmith, A., Jafar, S.A., Maric, I. and Srinivasa, S. (2009). " Breaking Spectrum Gridlock With Cognitive Radios: An Information Theoretic Perspective", Proceedings of the IEEE, vol.97, no.5, pp.894-914.
- [17] Cordeiro, C., Challapali, K., Birru, D., Shankar, S. and Others, (2006). "IEEE 802.22: An introduction to the first wireless standard based on cognitive radios", Journal on Communications, vol. 1, no. 1, pp. 38–47.
- [18] FCC. (2003). "Establishment of interference temperature metric to quantify and manage interference and to expand available unlicensed operation in certain fixed mobile and satellite frequency bands", FCC Document ET Docket 03-289.

- [19] Stoica, P. and Sundin, T. (1999). "On nonparametric spectral estimation" *Circuits, Systems and Signal Processing*, vol. 16, pp. 169–181.
- [20] Syed, A. R. and Yau, K. A. (2014). "Spectrum Leasing in Cognitive Radio Networks: A Survey", *International Journal of Distributed Sensor Networks*.
- [21] Alptekin, G. I. and Bener, A. B. (2009). "An efficient spectrum management mechanism for cognitive radio networks" in *Proceedings of the IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM'09)*, pp. 653–660, Long Island, NY, USA.
- [22] Haykin, S. and Moher, M. (2004). *Modern Wireless Communications*, New York: Prentice-Hall.
- [23] Haykin, S., Huber, K. and Chen, Z. (2004). "Bayesian sequential state estimation for MIMO wireless communications", *Proceedings of the IEEE (Special Issue on Sequential State Estimation)*, vol. 92, no. 3, pp. 439–454.
- [24] Zhao, J., Zheng, H. and Yang, G.H. (2005). "Distributed coordination in dynamic spectrum allocation networks" in *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN '05)*.
- [25] Chen, T., Zhang, H., Katz, M. D. and Zhou, Z. (2008). "Swarm intelligence based dynamic control channel assignment in CogMesh" in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC '08)*.
- [26] Kondareddy, Y. R. and Agrawal, P. (2008). "Synchronized MAC protocol for multi-hop cognitive radio networks" in *IEEE International Conference on Communications (ICC '08)*, pages 3198–3202.
- [27] Burbank, J. L. (2008). "Security in cognitive radio networks: the required evolution in approaches to wireless network security" in *3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (Crown-Com)*, pages 1–7.
- [28] Chen, R., Park, J.M. and Reed, J.H. (2008). "Defense against primary user emulation attacks in cognitive radio networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 26(1):25-37.
- [29] Sodagari, S., Attar, A. and Bilen, S. G. (2011). "On a truthful mechanism for expiring spectrum sharing in cognitive radio networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 29, no.4, pp. 856–865.
- [30] Wu, Y., Wang, B., Liu, K. J. R. and Clancy, T. C. (2008) "Collusion resistant multi-winner spectrum auction for cognitive radio networks" in *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '08)*, pp. 1–6, New Orleans, La, USA.
- [31] Chen, R., Park, J.M. and Bian, K. (2008). "Robust distributed spectrum sensing in cognitive radio networks" in *27th Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM)*, pages 1876–1884.
- [32] Petty, V. R., Rajbanshi, R., Datla, D. et al. (2007). "Feasibility of dynamic spectrum access in underutilized television bands" in *Proceedings of IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pp. 331–339.
- [33] Hauris, J. F. (2007). "Genetic algorithm optimization in a cognitive radio for autonomous vehicle communications" in *Proceedings of IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA)*, pp. 427–431.
- [34] Hinman, R.D. (2006). "Application of cognitive radio technology to legacy military waveforms in a JTRS (joint tactical radio system) radio" in *Proceedings of IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*.
- [35] Neumann, J. and Morgenstern, O. (1953). *Theory of Games and Economic Behavior*, Third edition, Princeton University Press.
- [36] Nash, J. (1950). "Equilibrium points in n-person games" in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 36(1), 48–49.
- [37] Nash, J. (1951). "Non-cooperative games", *Annals of Mathematics* 54: 286 – 295.



- [38] Aumann, R. J. (1974). "Subjectivity and correlation in randomized strategies," *Journal of Mathematical Economics*, vol. 1, no. 1, pp. 67–96.
- [39] Pavel, L. (2012). *Game Theory for Control of Optical Networks*, Springer Science and Business Media, New York.
- [40] Varian, Hal R. (2010). *Intermediate Microeconomics: A modern approach*, 8th edition, W. W. Norton & Company, Inc., New York.
- [41] Basar, T., Olsder, G.J. (1999). *Dynamic Noncooperative Game Theory*, 2nd edition, SIAM Series Classics in Applied Mathematics.
- [42] Rapoport, A. and Chammah, A. M. (1965). "Prisoner's dilemma" *University of Michigan Press*, vol. 165.
- [43] Qun, Y. (2013). "A Survey of Cooperative Games for Cognitive Radio Networks", *Wireless Personal Communications*, 73:949-966.
- [44] Rosen, J.B. (1965). "Existence and uniqueness of equilibrium points for concave n-person games", *Econometrica* 33(3), 520–534.
- [45] Shapley, L. S. (1953). "Stochastic games", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 39, no. 10, pp. 1095–1100.
- [46] Fudenberg, D. and Levine, D. K. (1999) *The Theory of Learning in Games*, Cambridge, MA: MIT Press, 1999.
- [47] Dekel, E., Fudenberg, D. and Levine, D. K. (2004). "Learning to play bayesian games", *Games and Economic Behavior*, 46(2), 282–303.
- [48] Monderer, D. and Shapley, L. S. (1996). "Potential game", *Games and Economic Behavior*, vol. 14, pp. 124–143.
- [49] Ui, T. (2000). "A Shapley value representation of potential games", *Games and Economic Behavior*, 31(1):121–135.
- [50] Maynard-Smith, J., Price, G. R. (1973). "The Logic of Animal Conflict". *Nature* 246 (5427): 15
- [51] Maynard-Smith, J. (1982). *Evolution and the Theory of Games*, Cambridge University Press.
- [52] Gibbons, R. (1992). "A primer in game theory", Hemel Hempstead: Harvester Wheatsheaf.
- [53] Sion, M. (1958). "On General Minimax Theorems", *Pacific Journal of Mathematics*.
- [54] Cournot, A. (1838). "Researches into the mathematical principles of the theory of wealth".
- [55] Edgeworth, F. Y. (1881). "Mathematical physics".
- [56] Osborne, M. J. and Rubinstein, A. (1999). *A Course in Game Theory*. Cambridge, MA: MIT Press.
- [57] Fudenberg, D., Kreps, D.M. (1993). "Learning mixed equilibria", *Games and Economics Behavior* 5, pp. 320–367.
- [58] Saraydar, C. U., Mandayam, N. B. and Goodman, D. J. (2002). "Efficient power control via pricing in wireless data networks", *IEEE Transactions on Communications*, 50(2):291–303.
- [59] Myerson, R. B. (2008). *Mechanism design*, in S. N. Durlauf and L. E. Blume, editors, *The New Palgrave Dictionary of Economics*. Basingstoke: Palgrave Macmillan.
- [60] Borel, E. (1927). "Algebre et calcul des probabilités", *Comptes Rendus Academie des Sciences*, vol. 184.
- [61] Harsanyi, J. C. (1973). "Games with Randomly Disturbed Payoffs: A New Rationale for Mixed Strategy Equilibrium Points", *International Journal of Game Theory* 2: 1–23.
- [62] Huang, J. (2013). "Market Mechanisms for Cooperative Spectrum Trading with Incomplete Network Information", *IEEE Communications Magazine*.
- [63] Thomson, W. (2009). "Bargaining and the theory of cooperative games: John Nash and beyond".

- [64] Owen, G. (2001). *Game Theory*, Academic Press.
- [65] Han, Z. and Poor, H. V. (2009). "Coalition games with cooperative transmission: A cure for the curse of boundary nodes in selfish packet-forwarding wireless networks", *IEEE Transactions on Communications*, 57(1), pp.203–213.
- [66] Niyato, D. and Hossain, E. (2008). "SPECTRUM TRADING IN COGNITIVE RADIO NETWORKS: A MARKET-EQUILIBRIUM-BASED APPROACH", *IEEE Wireless Communications*.
- [67] Maharjan, S., Zhang, Y. and Gjessing, S. (2011). "Economic Approaches for Cognitive Radio Networks: A Survey", *Wireless Personal Communications* 57:33-51.
- [68] Perea, A. (2010). "Backward Induction versus Forward Induction Reasoning", *Games*, 1, pp.168-188.
- [69] Krishna, V. (2002). *Auction theory*. London, UK: Academic Press.
- [70] Friedman, D., Friedman, D. P. and Rust, J. (1993). *The Double Auction Market: Institutions, Theories and Evidence*, Westview Press.
- [71] Zhao, Y., Mao, S., Neel, J. O. and Reed, J. H. (2009). "Performance Evaluation of Cognitive Radios: Metrics, Utility Functions, and Methodology" in *Proceedings of IEEE*, vol. 97, no. 4.
- [72] Lee, J.W., Chiang, M. and Calderbank, A. R. (2006). "Price-based distributed algorithms for rate–reliability tradeoff in network utility maximization," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 24, no. 5, pp. 962–976.
- [73] Jiang, Z., Ge, Y. and Li, Y. (2005). "Max-utility wireless resource management for best effort traffic," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 4, no. 1.
- [74] Zhai, C. and Zhang, W. (2013). "Multiuser diversity of spectrum leasing in cognitive radio networks", *Wireless Symposium (IWS), 2013 IEEE International*, pp. 1 – 4.
- [75] Yi, Y., Zhang, J., Zhang, Q., Jiang, T. and Zhang, J. (2010). "Cooperative communication-aware spectrum leasing in cognitive radio networks" in *IEEE symposium on new frontiers in dynamic spectrum*, pp.1–11.
- [76] Simeone, O., Stanojev, I., Savazzi, S., Bar-Ness, Y., Spagnolini, U. and Pickholtz, R. (2008). "Spectrum leasing to cooperating secondary ad hoc networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 26(1), pp. 203–213.
- [77] Yang, L., Kim, H., Zhang, J., Chiang, M. and Tan, C.W. (2011). "Pricing-based spectrum access control in cognitive radio networks with random access" in *INFOCOM 2011 Proceedings of IEEE*, pp. 2228–2236.
- [78] Baharlouei, A. and Jabbari, B. (2012). "A stackelberg game spectrum sensing scheme in cooperative cognitive radio networks" in *2012 IEEE wireless communications and networking conference (WCNC)*, pp.2215–2219.
- [79] Duan, L., Huang, J. and Shou, B. (2010). "Cognitive mobile virtual network operator: Investment and pricing with supply uncertainty" in *INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE*, pp. 1–9.
- [80] Feng, X., Wang, H. and Wang, X. (2013). "A game approach for cooperative spectrum sharing in cognitive radio networks", *Wireless Communications and Mobile Computing*.

