



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μελέτη Τηλεπικοινωνιακών Διατάξεων RIS με Εφαρμογές από τη Θεωρία Παιγνίων

Μελέτη και υλοποίηση

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΚΑΛΟΓΕΡΑ Δ. ΑΝΔΡΕΑ

Επιβλέπων: Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής

Αθήνα, Οκτώβριος 2023



Μελέτη Τηλεπικοινωνιακών Διατάξεων RIS με Εφαρμογές από τη Θεωρία Παιγνίων

Μελέτη και υλοποίηση

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΚΑΛΟΓΕΡΑ Δ. ΑΝΔΡΕΑ

Επιβλέπων: Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 27η Οκτωβρίου 2023.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής

.....
Θεοδώρα Βαρβαρίγου
Καθηγήτρια

.....
Ιωάννα Ρουσσάκη
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Copyright © - All rights reserved. Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Καλογεράς Ανδρέας, 2023.

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.

Το περιεχόμενο αυτής της εργασίας δεν απηχεί απαραίτητα τις απόψεις του Τμήματος, του Επιβλέποντα, ή της επιτροπής που την ενέκρινε.

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπογράφως ότι είμαι αποκλειστικός συγγραφέας της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, για την ολοκλήρωση της οποίας κάθε βοήθεια είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στην εργασία αυτή. Έχω αναφέρει πλήρως και με σαφείς αναφορές, όλες τις πηγές χρήσης δεδομένων, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών, είτε κατά κυριολεξία είτε βάσει επιστημονικής παράφρασης. Αναλαμβάνω την προσωπική και ατομική ευθύνη ότι σε περίπτωση αποτυχίας στην υλοποίηση των ανωτέρω δηλωθέντων στοιχείων, είμαι υπόλογος έναντι λογοκλοπής, γεγονός που σημαίνει αποτυχία στην Πτυχιακή μου Εργασία και κατά συνέπεια αποτυχία απόκτησης του Τίτλου Σπουδών, πέραν των λοιπών συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων. Δηλώνω, συνεπώς, ότι αυτή η Πτυχιακή Εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα προσωπικά και αποκλειστικά και ότι, αναλαμβάνω πλήρως όλες τις συνέπειες του νόμου στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής άλλης πνευματικής ιδιοκτησίας.

(Υπογραφή)

.....

Καλογεράς Ανδρέας

Περίληψη

Η θεωρία παιγνίων είναι μία επιστήμη η οποία συγκαταλέγεται σε αυτές των εφαρμοσμένων μαθηματικών. Τα στοιχεία που τη διέπουν είναι η ανάλυση διάφορων στρατηγικών και αποφάσεων, όταν σε μία κατάσταση αλληλεπιδρούν πολλές οντότητες (χρήστες). Πιο απλά, μελετάται η λήψη στρατηγικών αποφάσεων, συνήθως σε μεγέθη όπως μεγιστοποίηση κέρδους ή ελαχιστοποίηση κόστους, και έχει εφαρμογή και σε άλλους τομείς πέρα από τον ευκόλως εννοούμενο οικονομικό τομέα. Ένας από αυτούς τους τομείς είναι τα ασύρματα δίκτυα και γενικότερα οι ασύρματες ζεύξεις, όπου εδώ οι παίκτες είναι οι χρήστες, οι οποίοι αλληλεπιδρούν τόσο μεταξύ τους, όσο και με κάποιον ιεραρχικά ανώτερο χρήστη. Για παράδειγμα, οι χρήστες μπορεί να είναι 2 άνθρωποι οι οποίοι εκτελούν μία τηλεφωνική κλήση μεταξύ τους (άρα επισυνάπτουν μια μεταξύ τους ζεύξη), η οποία όμως για να μπορέσει να επιτευχθεί θα πρέπει να μεσολαβήσει η κεραία που προσδίδει το σήμα στις κινητές συσκευές (επομένως εδώ η κεραία έχει ιεραρχικά ανώτερο επίπεδο από τους χρήστες).

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της από κοινού ελέγχου ισχύος σε επικοινωνίες συσκευή προς συσκευή και ελέγχου των μετατοπίσεων φάσης της αναδιαμορφώσιμης έξυπνης επιφάνειας - Reconfigurable Intelligent Systems (RIS) η οποία επεμβαίνει σε τοπολογία που πραγματεύεται τις προαναφερθείσες επικοινωνίες. Στη συνέχεια θα κληθούμε με διάφορα παίγνια να δούμε την μοντελοποίηση του με προσέγγιση θεωρίας παιγνίων, μέσω της οποίας μετατρέπουμε το τηλεπικοινωνιακό πρόβλημα σε μαθηματικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, δανειζόμενοι ωστόσο και τη μηχανική μάθηση σε ορισμένους αλγόριθμους.

Λέξεις Κλειδιά

Θεωρία Παιγνίων, Potential Games, Reconfigurable Intelligent Systems, Ισορροπία Nash

Abstract

Game Theory is a scientific field which is a subfield of applied mathematics. It consists of several strategy and decision making analysis, in an instance where many players (users) compete each other. To simplify, it is the research of strategic decision making, usually in measures such as gain maximization or cost minimization, and it is applied in other fields too, including economics where it is usually applied. One of these fields is the wireless networks and the wireless communications in general, where the players are the users, which compete each other and usually with a user with more privileges than the others. For example, 2 users can be 2 people who make a phone call (they set up a link , a D2D communication to be more specific), which to be established, an antenna must provide the signal that will travel to the mobile phones (the "leader" , or the privileged user, is the antenna in this game).

The purpose of this diploma thesis is the research of a joint power control in device to device communications, and control of the phase shifts of Reconfigurable Intelligent Systems (RIS), which interferes in a topology regarding the stated communications. For the next step, we will apply several games to see the game theoretic approach, and convert the telecommunications problem to a mathematical optimization problem, using even machine learning in certain algorithms.

Keywords

Game Theory, Potential Game, Reconfigurable Intelligent Systems, Nash Equilibrium

στους γονείς μου, και στους κοντινούς μου ανθρώπους

Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ.Παπαβασιλείου Συμεών για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας και για την ευκαιρία που μου έδωσε να την εκπονήσω στο εργαστήριο Διαχείρισης και Βέλτιστου Σχεδιασμού Δικτύων . Επίσης ευχαριστώ ιδιαίτερα την καθηγήτρια κα. Τσιροπούλου Ειρήνη για την καθοδήγησή της ως προς το θέμα της διπλωματικής. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τη Διαμαντή Μάρω, για όλη τη στήριξη, τη κατανόηση και την υπομονή της σε αυτή την πορεία της διπλωματικής εργασίας. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την καθοδήγηση και την ηθική συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια, καθώς και τους συμφοιτητές και φίλους μου, Χρήστο Λ., Γιώργο Δ., και Δημήτρη Π., με τους οποίους συμπορεύσαμε μαζί σε αυτό το ταξίδι όλα αυτά τα χρόνια. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω για σημαντικούς για εμένα λόγους, τον Νίκο Μ. καθώς και τον Πολύκαρπο Π. .

Καλογεράς Ανδρέας

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract	3
Ευχαριστίες	7
1 Εισαγωγή	13
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής	14
1.2 Οργάνωση του τόμου	15
I Θεωρητικό Υπόβαθρο	17
2 Θεωρία Παιγνίων	19
2.1 Εισαγωγή στη θεωρία παιγνίων	19
2.1.1 Μία θεωρητική προσέγγιση	19
2.1.2 Welfare και Utility	20
2.1.3 Ισορροπία Nash	21
2.1.4 Potential Games	23
2.1.5 Stackelberg Games	25
2.2 Η θεωρία παιγνίων στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα	25
3 LOS - NLOS propagation	27
3.1 LOS propagation	27
3.2 NLOS Propagation	28
4 RIS	33
4.1 Ανάλυση - περιγραφή RIS	33
4.1.1 Βασικά στοιχεία RIS	34
4.1.2 D2D communications and RIS	35
II Μοντελοποίηση, Υλοποίηση και Αξιολόγηση	37
5 Περιγραφή Διάταξης - Υλοποίηση	39
5.1 Περιγραφή διάταξης	39
5.1.1 Τοπολογία	39
5.1.2 Ανάλυση παρεμβολών.	40

5.1.3 Μαθηματική διάταξη στο χώρο - σταθερές ζεύξεων	41
5.1.4 Βελτιστοποίηση με τη χρήση του Potential Game	43
5.1.5 Αποτελέσματα προσέγγισης Potential Games	44
5.1.6 Προσέγγιση μέσω Stackelberg Games	44
5.1.7 Heuristic Model [1]	45
5.1.8 Reinforcement Learning	46
6 Αποτελέσματα Μοντελοποίησης.	49
6.1 Αξιολόγηση ως προς το Utility και την ισχύ εκπομπής.	49
6.2 Αξιολόγηση ως προς τη σύγκλιση της βελτιστοποίησης	52
III Επίλογος	53
7 Επίλογος	55
7.1 Συμπεράσματα	55
7.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις	55
Παραρτήματα	57
Α΄ Ψευδοκώδικας αλγορίθμου Reinforcement Learning	59
Β΄ Απόδειξη της σχέσης (5.18)	61
Βιβλιογραφία	64
Συντομογραφίες - Αρκτικόλεξα - Ακρωνύμια	65
Απόδοση ξενόγλωσσων όρων	67

Κατάλογος Σχημάτων

3.1	Παράδειγμα LOS καναλιού. [2]	27
3.2	Παράδειγμα NLOS καναλιού. [2]	29
3.3	Παράδειγμα διάταξης που περιέχει passive repeaters. [3]	30
3.4	Ionospheric Propagation. [4]	30
3.5	Παράδειγμα της τεχνικής Ground Wave.[3]	31
4.1	Παράδειγμα διάταξης εφαρμογής RIS [5]	33
4.2	Μερικά μοτίβα που χρησιμοποιούνται κατα τη σύσταση μίας metasurface [6]	35
4.3	Μία τυπική τοπολογία όπου ένα RIS επιδρά σε D2D επικοινωνίες. [7]	36
5.1		40
5.2	Το δίκτυο αποτελούμενο από τους χρήστες και το RIS στο καρτεσιανό επίπεδο.	42
5.3	Ο πλήρης μηχανισμός λειτουργίας του Reinforcement Learning	47
6.1	Utility ανα χρήστη(ζεύξη) συναρτήσει του αριθμού των RIS στοιχείων.	50
6.2	Ισχύς ανα χρήστη(ζεύξη) συναρτήσει του αριθμού των RIS στοιχείων.	50
6.3	Συνολικό Utility της τοπολογίας συναρτήσει του αριθμού των RIS στοιχείων.	51
6.4	Συνολική λαμβανόμενη ισχύς της τοπολογίας συναρτήσει του αριθμού των RIS στοιχείων.	51
6.5	Αριθμός επαναλήψεων προς σύγκλιση συναρτήσει του αριθμού των RIS στοιχείων.	52

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Οι τηλεπικοινωνίες αποτελούν μία από τις βασικές πλέον μορφές επικοινωνίας τόσο σε ανθρώπινο όσο και σε επίπεδο μηχανημάτων. Ας σκεφτούμε λίγο, οι κινητές συσκευές, οι συναγερμοί, τα ραδιόφωνα, η τηλεόραση και πολλά άλλα ανθρώπινα milestones τα οποία υπάρχουν χάρη στους τηλεπικοινωνιακούς διαύλους. Ένα σύστημα τηλεπικοινωνιών μπορεί να διαθέτει είτε ενσύρματο δίαυλο είτε ασύρματο. Με την εξέλιξη του χρόνου, σιγά σιγά το ενσύρματο, πέρα από ορισμένες περιπτώσεις, τείνει να εξαλείφεται και η επικοινωνία να κυριεύεται από τις ασύρματες ζεύξεις.

Είναι προφανές πως η πολυπλοκότητα των ασυρμάτων ζεύξεων είναι μεγάλη. Παράμετροι όπως εμπόδια, καιρικές συνθήκες, ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές μπορούν να επηρεάσουν ανα πάσα στιγμή την ποιότητα μιας ζεύξης και στην χειρότερη των περιπτώσεων, τη διακοπή της. Ένα από τα πιο βασικά ζητήματα στις ασύρματες επικοινωνίες είναι η βελτιστοποίηση τους, ως προς διάφορες μετρικές όπως εύρος ζώνης ή ισχύς σήματος, καθώς και η αξιοπιστία τους. Ένα παράδειγμα απλού σχετικά τηλεπικοινωνιακού συστήματος είναι το σύστημα κεραία εκπομπής - κινητά τηλέφωνα. Όταν ένας χρήστης επιθυμεί να καλέσει κάποιον άλλο στο κινητό του τηλέφωνο (πομπός), θα το κάνει αυτό με τη βοήθεια της κεραίας από την οποία θα πάρει το σήμα κινητής τηλεφωνίας(ας ονομάσουμε την κεραία σταθμό βάσης). Ο άλλος χρήστης θα δεχθεί την κλήση (δέκτης) και έτσι θα συναφθεί ένας επικοινωνιακός δίαυλος μεταξύ πομπού και δέκτη. Το ζήτημα είναι πως αυτή η ζεύξη θα είναι πάντοτε ποιοτική και αξιόπιστη, καθώς διάφορες παράμετροι μπορούν να επηρεάσουν αυτές τις δύο μετρικές.

Όπως θα δούμε και αναλυτικά παρακάτω, ένα άλλο σημαντικό ζήτημα για μία ζεύξη, είναι ο τρόπος με τον οποίο θα υλοποιηθεί. Καθώς πρόκειται για τοπολογία με πολύ μεγάλο αριθμό κόμβων, είναι μείζονος σημασίας η σωστή και αποτελεσματική κατανομή των πόρων στην δεδομένη τοπολογία (καθώς σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίαυλο με συσκευή που εκπέμπει ασύρματα, κάθε κυψέλη ή κεραία, είναι υπεύθυνη για έναν μεγάλο αριθμό χρηστών, για το πώς η μετάδοση θα είναι τόσο επιτυχής, όσο και αξιόπιστη). Ίσως θα μπορούσε να γίνει μία εφαρμοσμένη παρομοίωση στην πραγματική ζωή, αυτή του κυκλοφοριακού προβλήματος. Εδώ, κάποιος χρήστης επιθυμεί να πάει από μία αφετηρία (κόμβος 1/ πομπός στην περίπτωση των ασυρμάτων ζεύξεων) σε έναν προορισμό (κόμβος 2/ δέκτης στην περίπτωση των ασυρμάτων ζεύξεων) μέσω μίας διαδρομής που περιλαμβάνει δρόμους στους οποίους υπάρχουν παράγοντες καθυστέρησης στον χρόνο άφιξης από την αφετηρία στο τέρμα, όπως κυκλοφοριακή συμφόρηση, φανάρια, προβληματικές υποδομές στο οδικό δίκτυο κ.ο.κ.(αντίστοιχα στις τηλεπικοινωνίες οι αντίστοιχοι δρόμοι είναι ο τηλεπικοινωνιακός δίαυλος, και η αντίστοι-

χη χειροτέρευση ποιοτικών στοιχείων της μετάδοσης (η αλλιώς χειροτέρευση της ποιότητας υπηρεσιών - Quality of Service - QoS, όπου ως QoS ορίζεται ως η χρήση τεχνολογιών σε ένα δίκτυο, προς ρύθμιση της δικτυακής κυκλοφορίας, και την εξασφάλιση της απόδοσης του δικτύου υπο δεδομένο εύρος ζώνης) είναι οι απώλειες σήματος λόγω διαλείψεων, η βροχή, τα κτίρια, οι παρεμβολές από άλλους χρήστες κ.ο.κ.).

Συνεπώς, υπάρχει η επιτακτική ανάγκη στο να εφαρμοστούν ορισμένοι κανόνες προκειμένου να εξασφαλιστεί υψηλό QoS στην τηλεπικοινωνιακή ζεύξη. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι προσέγγισης και μελέτης για το πως θα μπορεί να βελτιστοποιηθεί τόσο το κέρδος για κάθε κόμβο, όσο και για όλο το σύστημα τηλεπικοινωνιών, διότι υπάρχει και το ενδεχόμενο να μην μπορούν να εξυπηρετηθούν όλοι οι χρήστες, ή έστω όχι εξίσου (π.χ. υπερφόρτωση δικτύου ή μειωμένο εύρος ζώνης). Μπορεί να φανεί η "οικονομική" προσέγγιση σε ένα υποτιθέμενο μοντέλο υπηρεσίας και πελάτη", και μέρος αυτής της προσέγγισης θα υιοθετηθεί για να μελετηθεί η διαχείριση καθώς και βελτιστοποίηση των τοπολογιών που περιγράφηκαν άνωθι.

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Στην εργασία αυτή, ορμώμενοι από την αφαιρετική "οικονομική προσέγγιση", θα μελετηθεί μία τηλεπικοινωνιακή διάταξη, η οποία αποτελείται από ζευγάρια πομπού και δέκτη, και πιο συγκεκριμένα η ζεύξη αυτή ονομάζεται "επικοινωνία συσκευή προς συσκευή" (D2D), καθώς δεν μεσολαθεί κάποιος σταθμός βάσης στην επικοινωνία τους. Αντί σταθμού βάσης, θα μεσολαθήσει μία διάταξη που ονομάζεται Reconfigurable Intelligent System, η οποία λειτουργεί σαν κάτοπιτρο/ανακλαστήρας, και σκοπό έχει να βελτιστοποιήσει την ποιότητα, καθώς και την αξιοπιστία των ζεύξεων μεταξύ των χρηστών. Εδώ είναι που αναβλύζει το ζήτημα της διαχείρισης, καθώς τέτοιες τοπολογίες έχουν από μικρό, έως ικανό αριθμό χρηστών να προκαλέσουν προβλήματα παρεμβολών, διακοπών ζεύξεων και μείωση του QoS. Με τη βοήθεια της Θεωρίας Παιγνίων, μελετάται το πρόβλημα βελτιστοποίησης της διάταξης τόσο σε επίπεδο συστήματος (το σύστημα/τοπολογία στην ολότητα του να έχει τη βέλτιστη απόδοση), όσο και σε επίπεδο χρηστών (οι χρήστες να έχουν ίση ή αν όχι ίση, σωστά κατανομημένη μεταχείριση). Μετατρέπουμε λοιπόν την τηλεπικοινωνιακή τοπολογία σε ένα μοντέλο, το οποίο θα μελετήσουμε με προσέγγιση από τη Θεωρία Παιγνίων. Θα αναλυθεί το μαθηματικό υπόβαθρο και οι βασικές έννοιες/ορισμοί της θεωρίας παιγνίων έτσι ώστε να υπάρξει πλήρη αντιστοίχιση της θεωρίας, με την εφαρμογή της στη διάταξη που μελετάται. Η εν λόγω διάταξη αφορά ένα σύστημα ζεύξεων D2D, όπου παρεμβάλλεται στη ζεύξη ένα RIS, και θα εξετάσουμε τη συμπεριφορά του δικτύου, συναρτήσει του πλήθους των στοιχείων του RIS, σε συνδυασμό με τη βελτιστοποίηση της διάταξης.

Όσον αφορά τα παίγνια που θα εφαρμόσουμε, καθώς υπάρχει πλειάδα αυτών, θα ασχοληθούμε ενδελεχώς με τα Potential Games και τα Stackelberg Games. Όπως κι σε όλα τα παίγνια, σκοπός είναι το μοντέλο να καταλήξει σε Ισορροπία Nash, όπου είναι η βέλτιστη κατάσταση του μοντέλου, και οι χρήστες/παίκτες έχουν το μεγαλύτερο δυνατό κέρδος/μικρότερες δυνατές απώλειες. Επομένως, μεταφερόμενοι στο πεδίο των τηλεπικοινωνιών, θα εφαρμόσουμε και θα μελετήσουμε τα παίγνια προκειμένου η μελετούμενη διάταξη να συγκλίνει σε μία κατάσταση, όπου όλες οι D2D ζεύξεις θα βελτιστοποιηθούν, καθώς και το

πώς το RIS επιδρά στη σύγκλιση αυτής της κατάστασης. Επιπλέον, για τη βελτιστοποίηση θα δανειστούμε και αλγορίθμους από την μηχανική μάθηση όπως Gradient Descent, Reinforcement Learning, και θα εφαρμόσουμε και ένα Heuristic Model.

1.2 Οργάνωση του τόμου

Η εργασία αυτή είναι οργανωμένη σε έξι κεφάλαια. Στο κεφάλαιο 2, δίνονται οι βασικοί ορισμοί της θεωρίας παιγνίων, καθώς και θεμελιώδεις έννοιες που θα βοηθήσουν στην κατανόηση των εφαρμογών πάνω στη μελετούμενη διάταξη, με αρκετά αναλυτική μαθηματική περιγραφή. Στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται οι NLOS (Non Line Of Sight) και οι LOS (Line Of Sight) ζεύξεις, καθώς όπως θα δούμε και στην υλοποίηση, έχουμε θεωρήσει πως μία D2D ζεύξη θεωρείται LOS και μία NLOS ζεύξη είναι αυτή όπου "παρεμβαίνει" το RIS. Στο κεφάλαιο 4 περιγράφονται τα Reconfigurable Intelligent Systems, η δομή τους και ο τρόπος λειτουργίας τους, καθώς και ο τρόπος που μεσολαθούν σε μία ζεύξη D2D, ενώ στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται αναλυτικά το μοντέλο (τηλεπικοινωνιακή τοπολογία) που θα εφαρμοστεί η θεωρία παιγνίων, η αντιστοίχιση από το μαθηματικό στο τηλεπικοινωνιακό πεδίο των εννοιών που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, καθώς και οι αλγόριθμοι που εφαρμόστηκαν. Τέλος, στο κεφάλαιο 6 θα αναλυθούν συμπεράσματα καθώς και μελλοντικές εφαρμογές τόσο της διάταξης, όσο και της προσέγγισης της βελτιστοποίησης.

Μέρος I

Θεωρητικό Υπόβαθρο

Κεφάλαιο 2

Θεωρία Παιγνίων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι βασικές αρχές θεωρίας παιγνίων οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν σαν γνώση για την υλοποίηση του αντικειμένου της διπλωματικής.

2.1 Εισαγωγή στη θεωρία παιγνίων

2.1.1 Μία θεωρητική προσέγγιση

Σε ένα γενικότερο πλαίσιο, η θεωρία παιγνίων (game theory) έχει ως στόχο να βοηθήσει στην κατανόηση καταστάσεων στις οποίες οι λεγόμενοι λήπτες αποφάσεων αλληλεπιδρούν. Η έννοια του παιγνίου (παιχνιδιού) πηγάζει από την "ανταγωνιστική δραστηριότητα στην οποία οι παίκτες παλεύουν μεταξύ τους συμφωνα με ένα σύνολο από κανόνες". Η θεωρία παιγνίων εφαρμόζεται σε μία πληθώρα περιστάσεων. Αναφέρονται ενδεικτικά ορισμένες από αυτές: (παράθεση θεωρίας παιγνίων).

- Διεκδίκηση έργων από εταιρείες σε ανταγωνιστικό πλαίσιο.
- Πολιτικοί υποψήφιοι (διαδικασία της ψηφοφορίας).
- Ζώα που μάχονται γύρω από ένα θήραμα.
- Πλειοδότες που ανταγωνίζονται σε μία δημοπρασία
- Η εξέλιξη της μεταξύ συμπεριφοράς συγγενικών ειδών.

Η θεωρία παιγνίων ουσιαστικά αποτελείται από μία συλλογή μοντέλων ή αλλιώς, αφηρημένες περιγραφές συγκεκριμένων συστημάτων χρησιμοποιώντας μαθηματικές έννοιες. Ας αναρωτηθούμε όμως, τι πραγματικά σημαίνει η λέξη "μοντέλο". Είναι μία αφαιρετική έννοια που χρησιμοποιείται προς κατανόηση παρατηρήσεων και εμπειριών. Καλούμαστε μέσα από το μοντέλο να αντιληφθούμε συσχετίσεις μεταξύ των καταστάσεων, απομονώνοντας αρχές που μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα εύρος προβλημάτων, έτσι ώστε να μπορούν να ταιράξουν νέες καταστάσεις που μπορεί να προκύψουν.

Μία από τις ιδιαιτερότητες των μοντέλων είναι ότι δεν μπορούν να κριθούν "σωστά" ή "λάθος" κατάπολυτο κριτήριο, καθώς κάθε μοντέλο έχει μία χρησιμότητα ανάλογα με τον σκοπό με τον οποίο χρησιμοποιείται. Τα μοντέλα της θεωρίας παιγνίων είναι ακριβείς εκφράσεις ιδεών που μπορούν να παρουσιαστούν λεκτικά, και πιο ειδικά, με μαθηματικά σύμβολα, όπως θα δούμε παρακάτω.

2.1.2 Welfare και Utility

Στη παρούσα μοντελοποίηση θα ασχοληθούμε με μοντελοποίηση η οποία βασίζεται στα οικονομικά μοντέλα [8]. Τα οικονομικά μοντέλα κατά κανόνα προσεγγίζονται με 2 τρόπους, οικονομικό και σημασιολογικό. Σε αυτό το σημείο θα δώσουμε 2 ορισμούς, ξεκινώντας από τον πρώτο και με κάποιες έννοιες που θα εισάγουμε σταδιακά, θα διατυπώσουμε και τον δεύτερο:

Welfare Analysis: Η οικονομική ανάλυση της αποδοτικής κατανομής πόρων μεταξύ ανταγωνιζόμενων χρήσεων. Σε αυτή την οικονομική ανάλυση θα ορίσουμε τη λεγόμενη "σχέση προτίμησης", η οποία πρόκειται για μια δυαδική σχέση μεταξύ 2 συμμετεχόντων στο παίγνιο τους οποίους θα λέμε χρήστες. Αυτή η δυαδική σχέση μοντελοποιεί τις προτιμήσεις ενός χρήστη για διάφορα bundles (προϊόντα). Τα bundles τα ορίζουμε μαθηματικά με την εξής σχέση:

$$\bar{X}_r = (X_{j,r}, j \in J)$$

όπου J είναι το σύνολο των πόρων ενός εκάστοτε οικονομικού μοντέλου. Επιστρέφοντας στην έννοια της σχέσης προτίμησης, η ερμηνεία της θέλουμε να είναι εξής:

Αν $\bar{X}_r \geq \bar{Y}_r$ τότε ο r -χρήστης βρίσκει το \bar{X}_r τουλάχιστον τόσο καλό όσο το \bar{Y}_r . Το bundle μπορεί να ποικίλει ανάλογα το πρόβλημα το οποίο καλούμαστε να μοντελοποιήσουμε. Παραδείγματος χάρη, σε ένα οικονομικό πρόβλημα μπορεί να είναι μία μετοχή, σε ένα πρόβλημα ενέργειας μπορεί να είναι η βέλτιστη αναλογία τιμής/απόδοσης, ή, εν προκειμένω, η βέλτιστη γωνία λήψης προς μεγιστοποίηση απόδοσης σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα.

Οι σχέσεις προτίμησης ενός ατόμου πρέπει να είναι:

- κλειστές, δηλαδή υπάρχει προτίμηση μεταξύ οποιωνδήποτε 2 bundles και μόνο.
- μεταβατικές, δηλαδή αν $\bar{X}_r \geq \bar{Y}_r$ και $\bar{Y}_r \geq \bar{Z}_r$ τότε $\bar{X}_r \geq \bar{Z}_r$
- πεπερασμένες.

Αν ικανοποιούνται τα παραπάνω, τότε οι σχέσεις προτίμησης για ένα άτομο μπορούν να αναπαρασταθούν από το Utility Function. Περνάμε στον δεύτερο ορισμό που θα χρειαστούμε:

Utility: Το Utility είναι η βασική μετρική που εφαρμόζεται στο game theory και ουσιαστικά εκφράζει την προτίμηση ενός χρήστη για κατανάλωση διαφόρων κατανομών αγαθών η υπηρεσιών (ή bundles).

Σε γενικότερο πλαίσιο, χρησιμοποιούμε τις συναρτήσεις ωφέλειας (Utility Function) ως μετρικές προκειμένου να διαπιστώσουμε το satisfaction των χρηστών του παιγνίου. Επιστρέφοντας σε ένα πιο μαθηματικό κλίμα, και συνδυάζοντας τα προηγούμενα που αναφέρθηκαν, η σχέση προτίμησης μπορεί να εκφραστεί από μία utility function $U(\bar{X}_r)$. Αν, για παράδειγμα, σε μία τέτοια συνάρτηση ισχύει $U(\bar{X}_r) \geq U(\bar{Y}_r)$ όταν $\bar{X}_r \geq \bar{Y}_r$ αυτό σημαίνει ότι μεγαλύτερη ποσότητα Utility μας δείχνει ότι ένα bundle είναι προτιμότερο από κάποιο άλλο. Η Utility Function έχει δύο πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά:

- **Μονοτονία:** Θα πρέπει οι συναρτήσεις να μην είναι φθίνουσες, διότι για παράδειγμα, αν κάθε στοιχείο του διανύσματος κατανομής αυξάνεται ασθενώς έως ελάχιστα, τότε και το αντίστοιχο Utility Function αυξάνεται ασθενώς έως ελάχιστα. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι κάθε χρήστης προτιμάει περισσότερους πόρους κατα κανόνα.
- **Κυρτότητα:** Διαχωρίζουμε τις συναρτήσεις μας σε **Κυρτές** και **Κοίλες**. Ένα παράδειγμα όπου έχουμε κοίλη συνάρτηση είναι ένα μοντέλο με filesharing downloads, όπου ο κάθε χρήστης επιθυμεί να κατεβάσει ένα αρχείο το οποίο έχει τους περισσότερους σεεδερς, αλλά είναι ταυτόχρονα και ασφαλές. Στο εν λόγω παίγνιο, έχουμε elastic traffic, καθώς δεν υπάρχει τόσο πυκνή κίνηση δικτύου. Από την άλλη, ένα παράδειγμα κυρτής συνάρτησης εφαρμόζεται σε μοντέλο τηλεφωνικού κέντρου όπου έχουμε αντίθετα με παραπάνω, inelastic traffic. [8]

Αναφορικά με άλλα αντίστοιχα παραδείγματα, η κοίλη Utility Function χρησιμοποιείται κυρίως για παίγνια όπου υπάρχει ήδη μεγάλο επίπεδο πορων(είτε π.χ. αυτός ο πλούτος είναι το κεφάλαιο, είτε είναι ενέργεια, είτε ευρύς ζώνης), επομένως έχουμε αποφυγή ρίσκου (risk-averse), ενώ η κυρτή Utility Function χρησιμοποιείται κυρίως για παίγνια όπου ο πλούτος είναι σε χαμηλό επίπεδο επομένως το ρίσκο είναι κάτι το οποίο ενδείκνυται. (risk-seeking) [8].

Σε γενικότερο και πιο μαθηματικά εφαρμοσμένο πλαίσιο, κοίλες συναρτήσεις χρησιμοποιούνται στη περίπτωση που επιθυμείται μεγιστοποίηση, ενώ κυρτές χρησιμοποιούνται στη περίπτωση που επιθυμείται ελαχιστοποίηση. Μπορεί να γίνει αντιληπτό και από τις μορφές των γραφικών παραστάσεων μίας κυρτής και μίας κοίλης συνάρτησης εξάλλου.

Έστω τώρα R το σύνολο των χρηστών σε ένα σύστημα και X το σύνολο όλων των πιθανών κατανομών πόρων. Θεωρούμε την συνάρτηση U_r ως το Utility Function του r - χρήστη. Επιπλέον θεωρούμε $\bar{X} = (\bar{X}_r, r \in R)$, $\bar{Y} = (\bar{Y}_r, r \in R)$ δύο πιθανές κατανομές πόρων στους χρήστες. **Θα λέμε ότι το x Pareto-κυριαρχεί του y αν:**

$$U(\bar{X}_r) \geq U(\bar{Y}_r) \quad \forall r \text{ και} \\ \exists s \in R : U(\bar{X}_s) > U(\bar{Y}_s)$$

Επιπλέον, μία κατανομή πόρων είναι Pareto-βέλτιστη αν δεν Pareto-κυριαρχείται από άλλη κατανομή.

2.1.3 Ισορροπία Nash

Η έννοια του Pareto- Optimality είναι μία αντικειμενική έννοια, καθώς ορίζεται με αυστηρά μαθηματικά κριτήρια, χωρίς περιθώριο επιλογής κάποιας συγκεκριμένης μετρικής. Δε συμβαίνει το ίδιο όμως και με την έννοια του fairness, η οποία είναι πιο υποκειμενική. Όπως προδίδει και η ίδια η λέξη, ο οποιοσδήποτε παίκτης σε αυτή τη περίπτωση, δεν θα σκεφτεί μόνο τον εαυτό του, αλλά θα φροντίσει το payoff να είναι δίκαιο για όλους τους παίκτες. Ένα παράδειγμα από τη πραγματική ζωή, είναι το δικαίωμα στα αγαθά. Με αυτό εννοούμε πως η εξασφάλιση ενός αγαθού σε έναν άνθρωπο δεν προϋποθέτει την στέρηση του, ή την περιθωριοποίηση/εξαναγκασμό κάποιου άλλου προκειμένου να το έχει [9]

Ας δούμε ένα βασικό κριτήριο Fairness:

Έστω συνάρτηση f γνησίως κοίλη και γνησίως αύξουσα στο \mathbb{R} , $\forall r$. Παίρνουμε την συνάρτηση $f(U(\bar{X}_r))$ τέτοια ώστε να είναι και αυτή κοίλη συνάρτηση του \bar{X}_r . Με βάση αυτές τις 2 συνθήκες, **Υπάρχει μοναδική λύση \bar{x}^* στο πρόβλημα βελτιστοποίησης:**

“Μεγιστοποίησε το $\sum_r f(Ur(\bar{X}_r))$ που ικανοποιεί τη συνθήκη $\bar{x} \in X$

Μάλιστα, αυτή η κατανομή πόρων που μεγιστοποιεί το άθροισμα αυτό είναι, σύμφωνα και με τα παραπάνω, Pareto-βέλτιστη.

Στη συνέχεια θα αναλύσουμε τέσσερα γενικότερα κριτήρια Fairness που θα μας βοηθήσουν και στην κατανόηση της διάταξης που καλούμαστε να μοντελοποιήσουμε στο πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας.

1. **Utilitarian** Το Utilitarian Fairness έχει την προσέγγιση της ισόκατανομής. Δηλαδή σε αυτό το κριτήριο, είναι “άδικο” (unfair) κάποιιοι χρήστες να έχουν πολύ περισσότερα από όσα πραγματικά χρειάζονται, ενώ άλλοι χρήστες δεν έχουν αρκετά για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες τους στα πλαίσια του παιχνιδιού. (Για παράδειγμα, σε μία τηλεπικοινωνιακή ζεύξη, ενδεχομένως είναι πιο “άδικο” σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας ένας χρήστης να έχει συνεχώς τέλεια κάλυψη με μεγάλο εύρος ζώνης, πολύ μεγαλύτερο από όσο θα χρειαζόταν, την ώρα που κάποιος άλλος χρήστης θα είχε μονίμως χαμηλό QoS. [10])
2. **Proportional**
3. **Max-min Fairness** Το \bar{x}^* είναι max-min fair αν επιλύει το πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\bar{x}^* = \arg \max_{\bar{x} \in X} [\min_r f(U(\bar{X}_r))]$$
4. **α - fairness** Ουσιαστικά εδώ έχουμε μία κομψή γενίκευση των προηγούμενων τριών κριτηρίων. Θεωρούμε τη συνάρτηση $f(U)$, όπου U η Utility Function που ορίσαμε άνωθεν ως εξής:

$$f(U) = \begin{cases} \frac{U^{1-\alpha}}{1-\alpha} & x \neq a \\ \frac{100-x}{100} & 0 \leq x \leq 100 \\ 0 & 100 \leq x \end{cases}$$

Με δεδομένο πάντα ότι η Utility Function είναι κοίλη συνάρτηση, παραγωγίζουμε την ϕ δύο φορές, και διαπιστώνουμε πως η συνάρτηση αυτή είναι γνησίως αύξουσα και κοίλη. Το ενδιαφέρον με αυτή τη συνάρτηση είναι το ότι για ορισμένες τιμές του α ανάγεται στα προαναφερθέντα κριτήρια. Πιο συγκεκριμένα:

- Για $\alpha = 0$ ανάγεται στο Utilitarian Fairness.
- Για $\alpha = 1$ ανάγεται στο Proportional Fairness.
- Για $\alpha = 2$ ανάγεται στο TCP fairness
- Για $\alpha \rightarrow \infty$ ανάγεται στο Max-min Fairness.

Κινούμενοι σιγά σιγά στο μήκος κύματος που επιθυμούμε, ειδικεύουμε την ανάλυσή μας σε έναν συγκεκριμένο τύπο παιγνίου που θα ορίσουμε παρακάτω. **Στατικό παίγνιο** g ονομάζουμε την 3-τούπλα

$$(R, \{S_r\}, \{\Pi_r\}), r \in R \text{ όπου:}$$

1. R πεπερασμένο σύνολο πακέτων
2. $\forall r \in R, S_r$ είναι το σύνολο στρατηγικών του παίκτη r και
3. $\forall r \in R, \Pi_r$ είναι η συνάρτηση payoff για τον χρήστη r .

Επιπλέον ορίζουμε με το S_{-r} ως το σύνολο των ενεργειών όλων των άλλων παικτών-χρηστών, εκτός του εξεταζόμενου. Σε ένα παίγνιο λέμε ότι ο παίκτης r θα έχει αυστηρά κυριαρχική στρατηγική S_r^* αν προτιμά την επιλογή του ανεξάρτητα από τις επιλογές των άλλων παικτών. Ένα μαθηματικό παράδειγμα είναι το εξής:

$$\Pi_r(S_r^*, S_{-r}) > \Pi_r(S_r, S_{-r}), \forall S_r \in S_r, S_{-r} \in S_{-r}.$$

Αν σε ένα παίγνιο G ο παίκτης r ήξερε ότι οι υπόλοιποι παίκτες θα επιλέξουν ενέργειες $\overline{s_{-r}}$,

για να μεγιστοποιήσει το payoff θα πρέπει να επιλέξει μια ενέργεια από το σύνολο:

$$Br(\overline{s_{-r}}) = \arg \max_{s_r \in S_r} \Pi_r(S_r, S_{-r})$$

Το Br ονομάζεται το best response correspondence του παίκτη r , και οποιοδήποτε στοιχείο του συνόλου αυτού ονομάζεται βέλτιστη απόκριση (best response) του παίκτη r στις ενέργειες των άλλων παικτών.

Το αποτέλεσμα $\overline{s^e}$ αποτελεί Ισορροπία Nash αν και μόνο αν:

$$\overline{s_r^e} \in Br(\overline{s_{-r}^e}), \forall r$$

Κοντολογίς, στην ισορροπία Nash, κάθε ενέργεια του παίκτη είναι η βέλτιστη απόκριση στις ενέργειες των άλλων παικτών. Προτού εμβαθύνουμε ακόμη περισσότερο στα παίγνια που θα χρησιμοποιήσουμε στη μοντελοποίηση, ορίζουμε το 'κυρτό' (Concave) παίγνιο ως εξής:

Ένα παιχνίδι στρατηγικής ονομάζεται concave game αν για κάθε παίκτη $r \in R$:

1. S_r είναι ένα μη κενό, συμπαγές και κυρτό υποσύνολο του R^n
2. $\Pi_r(s_r, \overline{s_{-r}})$ είναι συνεχής στο s_r για κάθε πιθανό $\overline{s_{-r}}$.
3. $\Pi_r(s_r, \overline{s_{-r}})$ είναι κοίλη συνάρτηση του s_r για κάθε πιθανό $\overline{s_{-r}}$.

Θεώρημα: Κάθε concave game έχει τουλάχιστον μία ισορροπία Nash.

2.1.4 Potential Games

Τα Potential Games είναι υποκατηγορία των Strategic Normal Form Games. Ουσιαστικά σε ένα Potential Game εργαζόμαστε με μία Potential Function η οποία περιγράφει τη συμπεριφορά των συναρτήσεων Payoff ή αλλιώς, την 'ικανοποίηση' ενός παίκτη/χρήστη ως προς κάποια μετρική η οποία για παράδειγμα μπορεί να είναι το κέρδος. Εισήχθησαν

για πρώτη φορά από τους Monderer, Sharpley το 1996. Στη βιβλιογραφία έχουν μελετηθεί διάφορες πτυχές και επεκτάσεις των Potential Games, αλλά στη συγκεκριμένη εργασία θα επικεντρωθούμε σε μία πιο γενική περιγραφή, σε συνάφεια με την εφαρμογή της στη διάταξη που θα μελετήσουμε. Επιπλέον, μας ενδιαφέρουν ειδικότερα τα Best Response Potential Games καθώς και τα Exact Potential Games.

Προφανώς ένα παίγνιο ονομάζεται Potential όταν υπάρχει κάτι τέτοιο. Οι συναρτήσεις Potential ποσοτικοποιούν την διαφορά που προκύπτει στο payoff κάθε παίκτη, λόγω της μονομερούς κατανομής για κάθε παίκτη. Αυτή η ποσοτικοποίηση μπορεί να είναι είτε ακριβής (Exact Potential Game, είτε να προσεγγίζεται ως προς το best response (Best Response Game).

Μία πιο απτή ερμηνεία της Potential Function είναι η μέτρηση της "διαφωνίας" μεταξύ των παικτών, ή ισοδύναμα, την σύγκλιση στην ισορροπία Nash. Η Potential Function είναι πράγματι αρκετά σημαντική, καθώς μπορεί να αντικαταστήσει τη Utility Function διαφόρων παικτών, και διατηρεί τη δομή του παιγνίου ως προς την ισορροπία Nash καθώς και το best response.

Τα Potential Games "κρύβουν" μερικές πολύ χρήσιμες ιδιότητες, οι οποίες "γεννιούνται" χάρη στην ύπαρξη της Potential Function. Υπό δεδομένες συνθήκες, όλα τα Potential Games έχουν Pure Strategy ισορροπία Nash. Ακόμα και όταν δεν είναι ισχυρή η ύπαρξη των συνθηκών, η αλληλεπίδραση μεταξύ των παικτών στο παίγνιο και το learning process τους συγκλίνουν σε Ισορροπία Nash. Δηλαδή, εάν στο παίγνιο ξεκινήσουμε από ένα αυθαίρετο σημείο, η ακολουθία των best responses των παικτών οδηγούν σε Ισορροπία Nash μετά από πεπερασμένο αριθμό βημάτων.

Θα δούμε με μαθηματική ερμηνεία τα συνήθη Potential Games και τα Exact Potential Games, (υπάρχουν και τα pseudo-Potential, τα οποία εφαρμόζονται στα ασύρματα δίκτυα και στις τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις).

Έστω $\Gamma = \langle N, Y, u \rangle$ ένα στρατηγικό παίγνιο σε κανονική μορφή με πεπερασμένο αριθμό παικτών. Το πεδίο στρατηγικών καθώς και η συνάρτηση payoff του παίκτη i προσδιορίζονται από τα μεγέθη Y_i και u_i αντίστοιχα. Με αρχή αυτό, θα αναλύσουμε λίγο εκτενέστερα τα συνήθη καθώς και τα exact Potential Games. Για χάρη εννοιολογικής ευκολίας, τα συνήθη Potential Games θα τα λέμε στο εξής Ordinal Potential Games.

- **Ordinal Potential Game:**

Έστω το παίγνιο Γ . Μία συνάρτηση $P : Y \rightarrow R$ είναι Ordinal Potential για το Γ αν για κάθε $i \in N$ και για κάθε $y_{-i} \in Y_{-i}$ ισχύει:

$$u_i(y_{-i}, x) - u_i(y_{-i}, z) > 0 \quad \text{ανν} \quad P(y_{-i}, x) - P(y_{-i}, z) > 0 \quad \forall x, z \in Y_i \quad (2.1)$$

Ερμηνεύοντας την παραπάνω συνθήκη, αν ένας παίκτης εκλαμβάνει καλύτερο (αντίστοιχα χειρότερο) payoff αλλάζοντας στρατηγική με μία συγκεκριμένη συμπεριφορά/κατανομή (ανεξάρτητα από κάποιον άλλον παίκτη), τότε η Potential Function αυξάνεται (αντίστοιχα μειώνεται) ως προς τη κατανομή αυτή. [11]

- **Exact Potential Game:** Μία συνάρτηση $P : Y \rightarrow R$ είναι Exact Potential για το Γ αν είναι Weighted Potential με βάρος ίσο με 1 $\forall i \in N$. Ένα παίγνιο ονομάζεται exact potential αν υπάρχει potential function τέτοια ώστε να αντιπροσωπεύει την αλλαγή στο utility συσσωρευμένο από κάθε παίκτη ο οποίος κατανέμει τη στρατηγική του ανεξάρτητα.

2.1.5 Stackelberg Games

Μία άλλη κατηγορία παιγνίων είναι τα Stackelberg Games. Τα παίγνια αυτά είναι μη-συμμετρικά, και εδώ ένας παίκτης(ή μία ομάδα παικτών) θεωρούμε πως είναι "προνομιούχος/οι" και μπορούν να λάβουν κάποια απόφαση πριν από όλους τους υπόλοιπους παίκτες. Αυτό διαφέρει από τα Potential Games τα οποία είναι συμμετρικά και θεωρούμε πως κάθε παίκτης έχει ίσα δικαιώματα στο παίγνιο, και την ίδια επίγνωση των συνθηκών του παιγνίου καθώς και των στρατηγικών των υπολοίπων παικτών. [12]

Συγκεκριμένα, στο Stackelberg game ένας παίκτης (ή ομάδα χρηστών) συμπεριφέρεται σαν "αρχηγός" και οι υπόλοιποι είναι οι "ακόλουθοι". Ο αρχηγός μπορεί να κρατήσει σταθερή τη στρατηγική του ,ενώ οι ακόλουθοι αντιδρούν ανεξάρτητα, πάντα ως προς τη στρατηγική του αρχηγού. Πιο αναλυτικά, ένα Stackelberg Game με N παίκτες μπορεί να οριστεί ως παίγνιο δύο επιπέδων, όπου οι παίκτες συμπεριφέρονται ακολουθιακά.

Αρχικά, τον πρώτο λόγο τον έχει πάντοτε ο αρχηγός, ο οποίος επιλέγει την βέλτιστη στρατηγική. Στο δεύτερο επίπεδο, οι ακόλουθοι προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν τις συναρτήσεις κόστους, δεδομένης της επιλογής του αρχηγού. Στο τέλος ο αρχηγός ανανεώνει την στρατηγική του προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος στο παίγνιο.

Η λύση του παιγνίου ονομάζεται κατέπέκταση Ισορροπία Stackelberg. Σε αυτή τη περίπτωση, ο κάθε ακόλουθος παρατηρεί τη στρατηγική του αρχηγού x και ανταποκρίνεται με στρατηγική $f(x) : x \rightarrow y$ η οποία είναι η βέλτιστη ως προς το εκτιμώμενο payoff του εκάστοτε παίκτη. [13]

2.2 Η θεωρία παιγνίων στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα

Ανάμεσα στους διάφορους τομείς που βρίσκει εφαρμογή η θεωρία παιγνίων, ένας από αυτούς είναι και τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Παρόλο που η διάταξη που μελετάται σε αυτή την εργασία έχει μία πιο τηλεπικοινωνιακή προσέγγιση, αξίζει να δούμε σε ένα πολύ εισαγωγικό πλαίσιο και το δικτυακό επίπεδο εφαρμογής της θεωρίας παιγνίων, μιας και τα υπόλοιπα αναλύονται εκτενώς στα υπόλοιπα παρακάτω κεφάλαια.

Ας ορίσουμε λίγο πιο αυθαίρετα σε επίπεδο συστήματος, το ασύρματο δίκτυο. Ουσιαστικά είναι ένα σύστημα που αποτελείται από κόμβους, οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ασύρματης ζεύξης, συνήθως στο φάσμα των ραδιοσυχνοτήτων. Μερικά γνωστά παραδείγματα ασυρμάτων δικτύων περιλαμβάνουν το WLAN, το ad hoc, καθώς και τις δορυφορικές επικοινωνίες. Στην ασύρματη ζεύξη, οι κόμβοι ανταγωνίζονται μεταξύ τους για την εξασφάλιση πόρων (εδώ έρχεται να "δέσει" η θεωρία παιγνίων που έχουμε περιγράψει έως τώρα). Τέτοιοι

πόροι είναι η ισχύς που θα λάβει από το κανάλι, το εύρος ζώνης κ.λ.π. Όταν ένας πομπός (κόμβος που προσφέρει πληροφορία στους άλλους, π.χ. κεραιά σε κινητά τηλέφωνα), η συμπεριφορά των κόμβων θα εξαρτηθεί από τη διαθεσιμότητα του ζητούμενου πόρου. Αν π.χ. το εύρος ζώνης είναι άφθονο, τότε όλοι οι κόμβοι θα φερθούν το ίδιο καθώς θα εξασφαλίσουν αυτο που χρειάζονται. Αν όμως το εύρος ζώνης είναι χαμηλό, ή υπάρχουν π.χ. διαλείψεις (βροχή, ομίχλη) και το σήμα της κεραιάς είναι ασθενές, οι κόμβοι μεταξύ τους θα "ανταγωνιστούν" διότι δεν υπάρχει διαθέσιμος πόρος για όλους. Και αυτός είναι ένας από τους λόγους απώλειας πακέτων στα δίκτυα, ή, για παράδειγμα η έλλειψη σήματος στα κινητά τηλέφωνα όταν υπάρχει υπερπληθυσμός. Άλλωστε είναι σύνηθες σε εκδηλώσεις που υπάρχει πολύς κόσμος συγκεντρωμένος σε ένα σημείο (συναυλίες, αγώνες), οι κυψέλες κινητής τηλεφωνίας να υπερφορτώνονται και να μην υπάρχει κάλυψη σήματος. Ουσιαστικά κάθε κινητό - "κόμβος", "παλεύει" να εξασφαλίσει τους δικούς του πόρους. Η θεωρία παιγνίων μελετάει και αυτές τις περιπτώσεις, όπου τα μοντέλα που παρουσιάζονται συνήθως είναι προς βελτιστοποίηση και στόχος όπως έχουμε δει και άνωθι, είναι η ισορροπία Nash. [14]

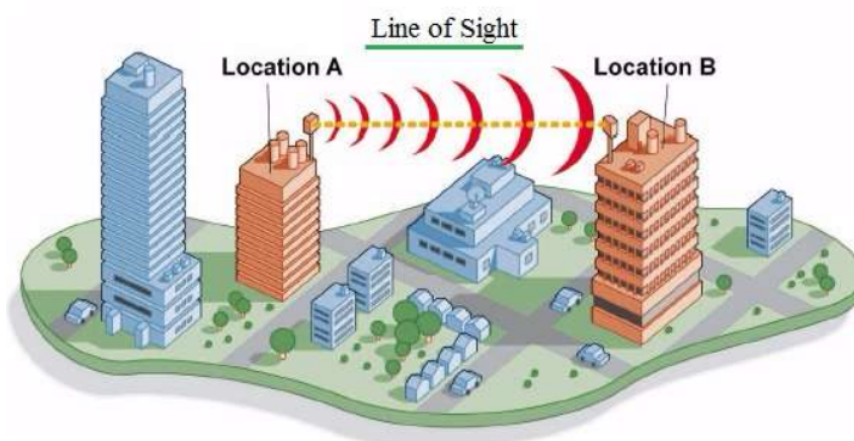
Κεφάλαιο 3

LOS - NLOS propagation

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά γίνεται μια περιγραφή ξεχωριστά των LOS και NLOS καναλιών, και στη συνέχεια συγκρίνουμε τα 2 αυτά κανάλια επικοινωνίας.

3.1 LOS propagation

Το ακρωνύμιο LOS σημαίνει Line Of Sight (αντίστοιχα παρακάτω που θα το αναπτύξουμε, το ακρωνύμιο NLOS σημαίνει Non Line Of Sight, και είναι πράγματι ακριβώς ότι λέει η έννοια. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε ένα σύστημα επικοινωνίας πομπού δέκτη, όπου δεν υπάρχουν εμπόδια ανάμεσα στον τηλεπικοινωνιακό δίαυλο, άρα δεν υπάρχουν διαλείψεις λόγω φυσικού/τεχνητού εμποδίου. LOS δίαυλος μπορεί να υπάρχει και σε σύστημα σταθερού πομπού (Base Station) και κινητού δέκτη. Το πιο απτό παράδειγμα LOS επικοινωνίας είναι η επικοινωνία P2P (Point - to Point). Με άλλα λόγια, το LOS είναι η νοητή γραμμή που συνδέει ένα ζεύγος πομπού-δέκτη σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα, η οποία δεν διακόπτεται από ενδιάμεσους παράγοντες. Εξάλλου εάν ένα αντικείμενο ήταν εμπόδιο στη νοητή γραμμή πομπού-δέκτη, δεν θα μπορούσε ο πομπός να "δεί" κατευθείαν τον δέκτη.



Σχήμα 3.1: Παράδειγμα LOS καναλιού. [2]

Η έννοια Line Of Sight δεν συναντάται μόνο στις τηλεπικοινωνίες, αλλά έχει απαρχές σε πολλές εφαρμογές στην καθημερινή ζωή. Ένα πολύ απλό παράδειγμα είναι οι φάροι στα λιμάνια, όπου η τοποθεσία τους είναι τέτοια προκειμένου ο αρμόδιος να έχει ένα πολύ καθαρό και μακρύ οπτικό πεδίο. Πολλές φορές, ειδικά τις νυχτερινές ώρες, μπορούμε μέσα

απο ένα πλοιο να δούμε το φώς του φάρου (παλλόμενο βαθύ κόκκινο), απο αρκετά μίλια μακριά. Βέβαια, όσο πιο μακριά είμαστε απο το φάρο, σιγά σιγά το LOS διακόπτεται, λόγω της καμπυλότητας της γής.

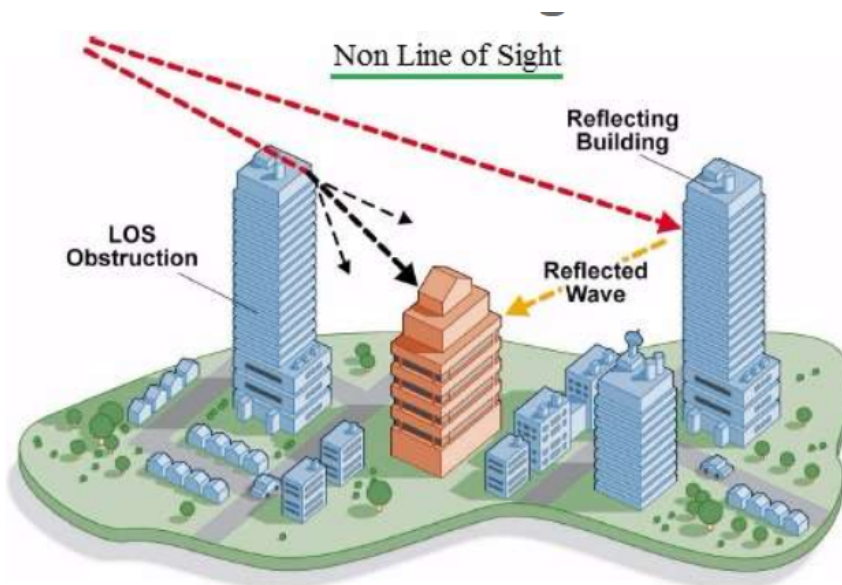
Στις τηλεπικοινωνίες το LOS είναι κομβικής σημασίας, καθώς ειδικά στις ασύρματες επικοινωνίες, υπάρχει πιθανότητα διακοπής της ζεύξης αν οτιδήποτε βρεθεί ανάμεσα απο τον πομπό και τον δέκτη. Γενικά αρκετά ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα μπορούν να μεταδώσουν σήμα μέσα από δένδρα ή κτίρια (με τις αντίστοιχες απώλειες/διαλείψεις), αλλά όμως φυσικά εμπόδια όπως βουνά , ακόμα και η καμπυλότητα της γής που αναφέρθηκε προηγουμένως, καθιστούν αδύνατη την μεταφορά σήματος. Αυτός είναι και ο λόγος που μια ραδιοφωνική κεραία, παρόλο που βρίσκεται σε ικανό υψόμετρο τέτοιο ώστε να μην υπάρχουν εμπόδια στη γραμμή μετάδοσης, υπάρχει ένα κατώφλι μετάδοσης στο οποίο από αυτή την απόσταση και πέρα, η μετάδοση δεν είναι επιτυχής. Επιπλέον, το LOS propagation λειτουργεί επιτυχώς μόνο αν ο δέκτης βρίσκεται σε μία κυκλική περιοχή που περικλείει τον πομπό, η ακτίνα της οποίας πρέπει να είναι ίση με την εφαιπόμενη απόσταση του εκπεμπόμενου σήματος. Για αυτό τον λόγο οι LOS διατάξεις περιλαμβάνουν πομπό ο οποίος είναι σε μεγάλο υψόμετρο, διότι έτσι αυξάνεται η εμβέλεια του σήματος. Επιπλέον, προκειμένου να ξεπεραστούν οι ενδεχόμενες διαλείψεις λόγω καμπυλότητας της γής και να αυξηθεί η ακτίνα επιτυχούς μετάδοσης του σήματος, χρησιμοποιούμε εργαλεία που ενισχύουν το σήμα του πομπού, όπως π.χ. repeaters. [15]. Τέλος, μια εφαρμογή LOS propagation είναι το Radar, όπου η συσκευή-πομπός στέλνει ένα ραδιοφωνικό σήμα προς ένα αντικείμενο, και ο πομπός "περιμένει" την "ηχώ" που θα ανακλασθεί από το επιθυμητό αντικείμενο του οποίου θέλουμε να μετρήσουμε την απόσταση. Επομένως, η απόσταση του αντικειμένου καθορίζεται υπολογίζοντας τον χρόνο που χρειάστηκε για να επιστρέψει η ηχώ (διαιρούμενο με το 2, καθώς όσο χρόνο χρειάζεται να ταξιδέψει το σήμα στο αντικείμενο, άλλο τόσο θέλει για να επιστρέψει πίσω, καθώς και την ταχύτητα του κύματος(δεδομένου ότι ξέρουμε τη συχνότητα του κύματος που εκπέμπεται).

3.2 NLOS Propagation

Σε αντίθεση με το LOS Propagation, στο NLOS έχουμε εμπόδια ανάμεσα στη ζεύξη πομπού δέκτη τα οποία προκαλούν διαλείψεις η/και εμποδίζουν το σήμα να διαδοθεί στον επιθυμητό δέκτη. Ένα πολύ απλό παράδειγμα NLOS διάδοσης απεικονίζεται παρακάτω, όπου ένα κτίριο εμποδίζει την απευθείας διάδοση του κύματος, και τελικά το κύμα φτάνει στον δέκτη ανακλώμενο από ένα άλλο κτίριο.

Τα πιο συνήθη εμπόδια μεταξύ πομπού-δέκτη είναι τα δένδρα, τα ψηλά κτίρια, το φυσικό ανάγλυφο (βουνά), κ.λ.π. . Τα εμπόδια μπορεί να έχουν 2 είδους συμπεριφορές. Μπορούν είτε να ανακλούν το σήμα(όπως συμβαίνει στην περίπτωση του σχήματος 3.2), είτε να απορροφούν το σήμα. Σε κάθε περίπτωση πάντως δημιουργούνται διαλείψεις, και περιορίζεται η ικανότητα μετάδοσης μίας τηλεπικοινωνιακής διάταξης. Θα αναπτύξουμε επιγραμματικά κάποιες τεχνικές που χρησιμοποιούνται σε NLOS επικοινωνίες , καταλήγοντας στη τεχνική που θα χρησιμοποιήσουμε στην διπλωματική εργασία.

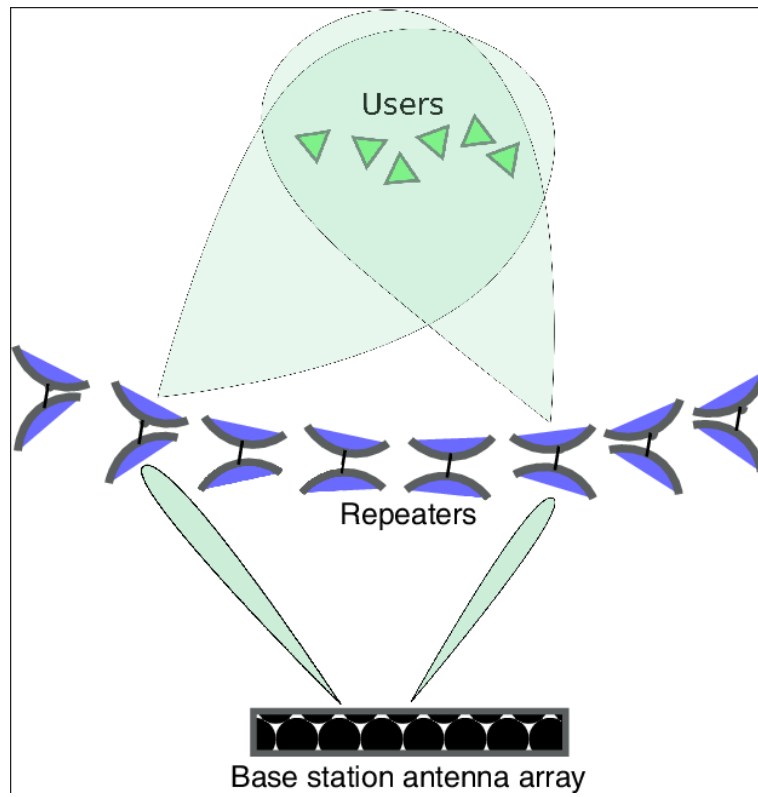
- Repeater : Χωρίζονται σε ενεργητικούς και παθητικούς. Οι μόν ενεργητικοί πέρα



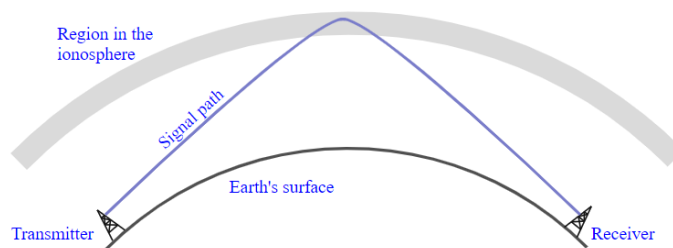
Σχήμα 3.2: Παράδειγμα NLOS καναλιού. [2]

από ανάκλαση του σήματος, διαθέτουν και ενίσχυση (gain) , έτσι ώστε το σήμα να περνάει στον δέκτη όσο πιο "ατόφιο" γίνεται, και να περιορίζονται οι απώλειες. Οι δεπαθητικοί, λειτουργούν ως ανακλαστήρες και χρησιμοποιούνται στη περίπτωση που το σήμα του πομπού είναι αρκετά ισχυρό, έτσι ώστε να φτάσει στον δέκτη ακόμη και μετά τις απώλειες διάδοσης.

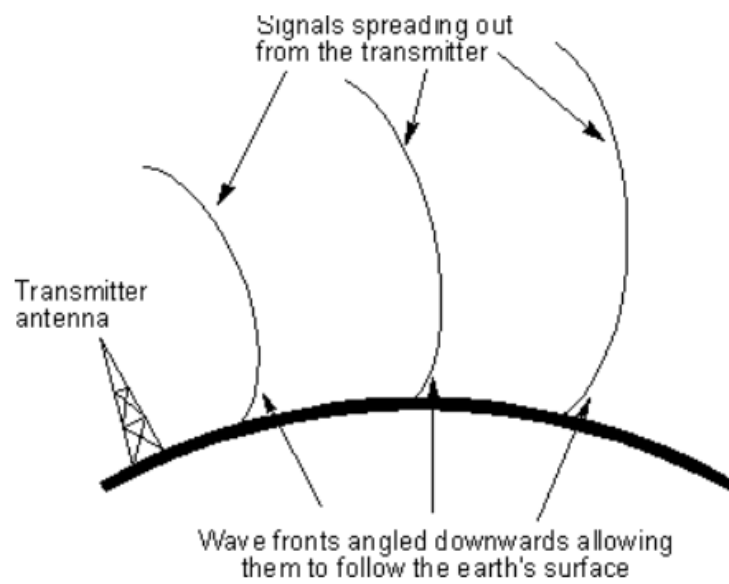
- **Ionospheric Propagation:** Χρησιμοποιείται στις μεσαίες και υψηλές ραδιοσυχνότητες. Σε αυτή την τεχνική, το στρώμα της ιονόσφαιρας χρησιμοποιείται ως ανακλαστήρας σε σύστημα πομπού-δέκτη όπου δεν έχουν οπτική επαφή. Χρησιμοποιείται πέρα από τις δορυφορικές και ραδιοφωνικές επικοινωνίες, και σαν λύση ανάγκης σε P2P ραδιοεπικοινωνίες.
- **Ground wave propagation:** Σε αυτόν τον τύπο διάδοσης, χρησιμοποιείται η επιφάνεια του εδάφους προκειμένου να διελεύσουν τα σήματα και να υπάρχει κάλυψη στην υψηλή και τη μεσαία ζώνη συχνοτήτων. Χρησιμοποιείται κυρίως από ραδιοφωνικούς σταθμούς προκειμένου να καλύψουν μία συγκεκριμένη εμβλέπεια εκπομπής. Αυτή η τεχνική όμως έχει και κάποια μειονεκτήματα, αφού οι δέκτες λαμβάνουν τόσο direct, όσο και ανακλώμενο σήμα, ενώ επιπλέον το σήμα είναι ευάλωτο σε τυχαίες ανακλάσεις. (συνέχεια ανάπτυξης LOS-NLOS κ.ο.κ...)



Σχήμα 3.3: Παράδειγμα διάταξης που περιέχει passive repeaters. [3]



Σχήμα 3.4: Ionospheric Propagation. [4]



Σχήμα 3.5: Παράδειγμα της τεχνικής Ground Wave.[3]

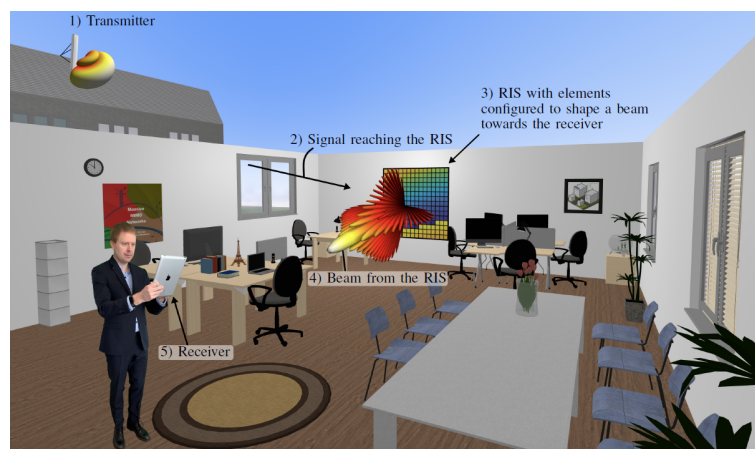
Κεφάλαιο 4

RIS

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται και αναλύεται η βασική διάταξη πάνω στην οποία υλοποιήθηκε και εφαρμόστηκε η θεματολογία που αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, και περιγράφονται πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα, χρήσεις και εφαρμογές της εν λόγω διάταξης.

4.1 Ανάλυση - περιγραφή RIS

Αρχικά, ως προς το φάσμα των τηλεπικοινωνιακών διατάξεων-μοντέλων, θα περιορίσουμε το ενδιαφέρον μας στις ασύρματες επικοινωνίες. Ακόμα πιο συγκεκριμένα, θα εξετάσουμε τις ασύρματες επικοινωνίες όπου ο χώρος επικοινωνίας πομπού-δέκτη περιλαμβάνει διάφορα αντικείμενα και επιφάνειες, επομένως έχουμε διαφόρων ειδών διαλείψεις και απώλειες. Συνήθως, αυτές ακολουθούν παρόμοια συμπεριφορά ως προς τη διάδοση του κύματος. Υπάρχει όμως μία κατηγορία αντικειμένων τα οποία ρυθμίζουν το περιβάλλον διάδοσης, η ακόμα πιο ορθά, το αναδιαμορφώνουν. Αυτά τα αντικείμενα ονομάζονται Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS, και πρόκειται για μεταγενέστερη του 5G δικτύου αρχιτεκτονική. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής RIS το οποίο θα αναλυθεί παρακάτω.



Σχήμα 4.1: Παράδειγμα διάταξης εφαρμογής RIS [5]

Στην εικόνα αυτή βλέπουμε μία πρότυπη λειτουργία μίας Reconfigurable Intelligent Surface, όπου ο πομπός είναι εκτός οπτικού πεδίου. Το σήμα εκπέμπεται προς την RIS,

και στη συνέχεια η επιφάνεια αυτή αναδιαμορφώνει κατάλληλα το σήμα προκειμένου να το σήμα να εκπνεμφθεί εκ νέου προς την κατεύθυνση του δέκτη, έτσι ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή απόδοση. Να σημειωθεί εδώ πως χρειάζεται κατάλληλο configuration προκειμένου το beaming στον δέκτη να γίνει με τον βέλτιστο τρόπο, πράγμα που σημαίνει πως πρέπει το configuration να είναι τέτοιο ώστε η επιτυχής επικοινωνία με τον δέκτη-χρήστη να πραγματοποιείται σε οποιοδήποτε σημείο το χώρου, παρόλη την παρεμβολή των διαφόρων εμποδίων σε ένα δωμάτιο (έπιπλα, ηλεκτρικές συσκευές, τοίχοι κ.λ.π.) [5]

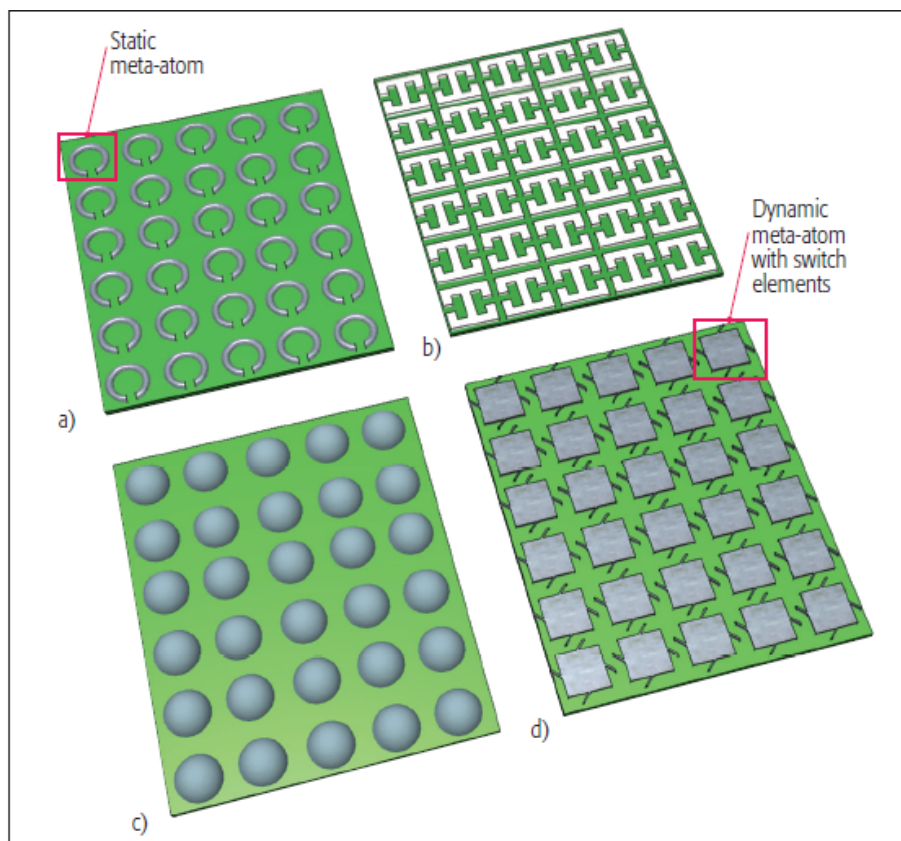
Μία Reconfigurable Intelligent Surface είναι μία λεπτή επιφάνεια που αποτελείται από ορισμένα στοιχεία, έστω N , καθένα από τα οποία συμπεριφέρεται ως scatterer . Ο εν λόγω scatterer στην πραγματικότητα είναι μία κεραία μικρού μεγέθους που ουσιαστικά λαμβάνει το σήμα λήψης από τον πομπό και στη συνέχεια το εκμπέμπει προς τον δέκτη, χωρίς όμως κάποια ενίσχυση, αλλά ένα ρυθμιζόμενο διάστημα χρονοκαθυστερήσης [16] . Συνήθως, επειδή κατα κανόνα έχουμε να κάνουμε με σήματα στενής ζώνης, αυτή η χρονοκαθυστερήση μεταφράζεται σε ολίσθηση φάσης. Επομένως, δεδομένου ότι σε κάθε N -οστό panel στο οποίο φτάνει το σήμα από τον πομπό, έχουν ρυθμιστεί κατάλληλα οι ολισθήσεις φάσης, τα N σήματα τα οποία φτάνουν τελικά στον δέκτη μέσω συμβολής θα φτάσουν προσθετικά. Πρέπει δηλαδή να ληφθεί υπόψη η επαλληλία των κυμάτων έτσι ώστε να μην συμβεί κάποια ακύρωση φάσης μεταξύ δύο διαδιδόμενων σημάτων τα οποία πρέπει να καταλήξουν στον δέκτη. Στο παραπάνω σχήμα, στο RIS βλέπουμε ότι κάθε panel έχει και διαφορετικό χρώμα, ή υπάρχουν ομάδες panel που έχουν το ίδιο χρώμα. Το χρώμα υποδεικνύει την ολίσθηση φάσης που θα πρέπει να υποστεί το σήμα όταν φτάνει από τον πομπό στο N -οστό στοιχείο του RIS, προκειμένου να εκμπνεμφθεί το ανακλώμενο κύμα κατάλληλα στον δέκτη. Κάθε στοιχείο είναι σημαντικά μικρότερο σε μέγεθος από το μήκος κύματος του εκμπνεμμένου κύματος (μάλιστα, μία ενδεικτική παραδοχή είναι να είναι το $1/5$ του μήκους κύματος [17]), προκειμένου το σήμα να σκορπιστεί ομοιομορφα, και η επιφάνεια να σχηματίσει ισχυρές δέσμες κύματος στην επιθυμητή κατεύθυνση. Σε αντίθεση περίπτωση, και ειδικά από τη στιγμή που το RIS δε διαθέτει κάποια ενίσχυση όταν φτάνει το σήμα σε αυτό, το σήμα που θα έπαιρνε ο δέκτης μετά την επίδραση του RIS θα ήταν πολύ ασθενέστερο.

4.1.1 Βασικά στοιχεία RIS

Το RIS είναι μία επιφάνεια η οποία αποτελείται από συγκεκριμένο αριθμό πάνελ, έστω N , τα οποία αποκαλούνται metasurfaces. [17] Τα metasurfaces αυτά, είναι διδιάστατες επιφάνειες με στοιχεία που αποτελούνται από metamaterial. Αυτά έχουν τη ιδιότητα πως μπορούν σε πραγματικό χρόνο να ρυθμίζουν μεγέθη όπως πλάτος, ολίσθηση φάσης, χρονική καθυστέρηση και πόλωση, προκειμένου κάθε φορά η απόδοση της ζεύξης να είναι όσο το δυνατόν βέλτιστη.

Παρακάτω απεικονίζεται μία τομή μιας τέτοιας metasurface με διάφορα μοτίβα.

Στην εικόνα αυτή, θα εξηγήσουμε λίγο τον τρόπο λειτουργίας των metasurfaces. Σε ένα metasurface, η πρόσκρουση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων προκαλεί κύματα μέσα στην επιφάνεια, μέσω επαγωγής. Στο 4.1α), (static meta-atoms) το μοτίβο της υπέρθεσης των κυμάτων καθορίζεται πλήρως από τη γεωμετρία κάθε στοιχείου. Στο 4.1δ), έχουμε δυναμικά στοιχεία, και η υπέρθεση των κυμάτων καθορίζεται από την κατάσταση στην οποία είναι κάθε



Σχήμα 4.2: Μερικά μοτίβα που χρησιμοποιούνται κατά τη σύσταση μίας metasurface [6]

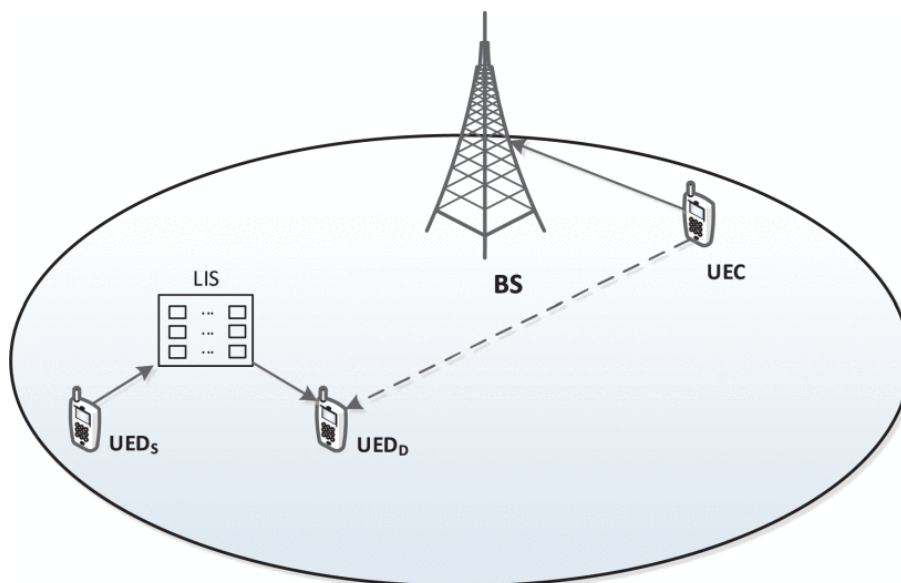
στοιχείο(το οποίο όπως βλέπουμε λειτουργεί σαν διακόπτης). Επιπλέον, το επαγόμενο κύμα που παράγεται από τα meta-surfaces, δημιουργεί ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο απόκρισης. Γενικότερα τα meta-atoms, σχεδιάζονται για να αποδώσουν ένα ρυθμιζόμενο πεδίο απόκρισης. Επιπλέον, έχει σημασία και το μέγεθος και το πάχος του κάθε meta-atom, προκειμένου να έχουμε την μέγιστη επαφή με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, για να έχουμε και την βέλτιστη απόδοση. Τα meta-atoms σχεδιάζονται σε τετραγωνική διάταξη, όπου αυτή η τετραγωνική περιοχή κυμαίνεται μεταξύ $\lambda/10$ και $\lambda/5$, όπου λ το μήκος κύματος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τα οποία αλληλεπιδρούν με τα meta-atoms.

4.1.2 D2D communications and RIS

Σε αυτή την ενότητα θα περιγραφεί μία τηλεπικοινωνιακή διάταξη στην οποία εφαρμόζεται η τηλεπικοινωνιακή διάταξη RIS, η οποία έχει αρκετές ομοιότητες με την υπο μελέτη διάταξη της διπλωματικής εργασίας. Η ειδοποιός διαφορά είναι στο ότι θα εστιάζουμε κυρίως στο ποιοτικό κομμάτι και όχι στο μαθηματικό, όπου η πλήρης μαθηματική περιγραφή του μοντέλου θα γίνει πάνω στην διάταξη η οποία είναι αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.

Προτού ξεκινήσουμε με την ανάλυση, ας δούμε μία τυπική τηλεπικοινωνιακή τοπολογία όπου επιδρά ένα RIS:

Αυτή η τοπολογία αφορά κυψελοειδές δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Δύο (ή και περισσότερες εάν έχουμε να κάνουμε με multicast ή broadcast επικοινωνία, αλλά στο παρόν θα ασχοληθούμε μόνο με την επικοινωνία μεταξύ 2 συσκευών) συσκευές επισυνάπτουν μία D2D



Σχήμα 4.3: Μία τυπική τοπολογία όπου ένα RIS επιδρά σε D2D επικοινωνίες. [7]

επικοινωνία και θα τις ονομάζουμε D2D συσκευές. Αυτές οι συσκευές συνήθως(σε συνάρτηση πάντα με της ολικής διάταξης) είναι χαμηλού κόστους, υπολογιστικών δυνατοτήτων και πόρων. Συνεπώς το κανάλι επικοινωνίας είναι αυτό που θα καθορίσει τη σύνδεση επιτυχής ή όχι, καθώς υπάρχει το ενδεχόμενο η σύνδεση να αποτύχει εάν η απόσταση μεταξύ 2 D2D συσκευών είναι μεγαλύτερη των προδιαγραφών, ή εάν η απευθείας ζεύξη παρεμβάλλεται από εμπόδια(δηλαδή έχουμε μία NLoS ζεύξη).[18] Επομένως αυτό περιορίζει αρκετά τις προσεγγίσεις στις επικοινωνίες D2D.

Τα Reconfigurable Intelligent Surfaces έρχονται να προσφέρουν πιθανές λύσεις σε αυτούς τους περιορισμούς ως προς τις επικοινωνίες D2D. [19],[20]

Το βασικό πλεονέκτημα των RIS είναι το ότι μπορούν να χειριστούν ηλεκτρονικά, πράγμα που κάνει την τοπολογία παραμετροποιήσιμη μέσω κατάλληλου λογισμικού, και οι ανακλάσεις μπορούν να ρυθμιστούν έτσι ώστε να βελτιωθεί η επικοινωνία μεταξύ D2D συσκευών. Όσον αφορά αυτή τη βελτίωση, δεν είναι κατ'ανάγκη αποκλειστικά στο σήμα/ισχύς εκπομπής, αλλά αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε βασικές τηλεπικοινωνιακές και δικτυακές μετρικές, όπως το Bit Error Rate, το ρυθμό μετάδοσης μίας ζεύξης, καθώς και το Signal To Noise Ratio στον πομπό και στο δέκτη της D2D επικοινωνίας. Η συνήθης παράμετρος που ρυθμίζεται στα RIS, προς βελτιστοποίηση της ζεύξης, είναι η ολίσθηση φάσης καθώς το σήμα από τον πομπό προσπίπτει σε δεδομένη επιφάνεια του RIS[21].

Μέρος 

Μοντελοποίηση, Υλοποίηση και Αξιολόγηση

Κεφάλαιο 5

Περιγραφή Διάταξης - Υλοποίηση

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η υλοποίηση της διάταξης και η βελτιστοποίηση της. Αρχικά περιγράφουμε αναλυτικά κάθε στοιχείο της διάταξης, στη συνέχεια αναφέρουμε τα παίγνια που χρησιμοποιούμε για να πάρουμε τα βέλτιστα δυνατά αποτελέσματα, ενώ στο τέλος με κάποια διαγράμματα γίνεται σύγκριση για διάφορες τιμές N στοιχείων του RIS, ως προς το Utility, το Power Allocation, και στο τέλος βλέπουμε πραγματικά την επίδραση του RIS, όπου βλέπουμε την απόδοση της τηλεπικοινωνιακής ζεύξης χωρίς να παρεμβάλλουμε του RIS

5.1 Περιγραφή διάταξης

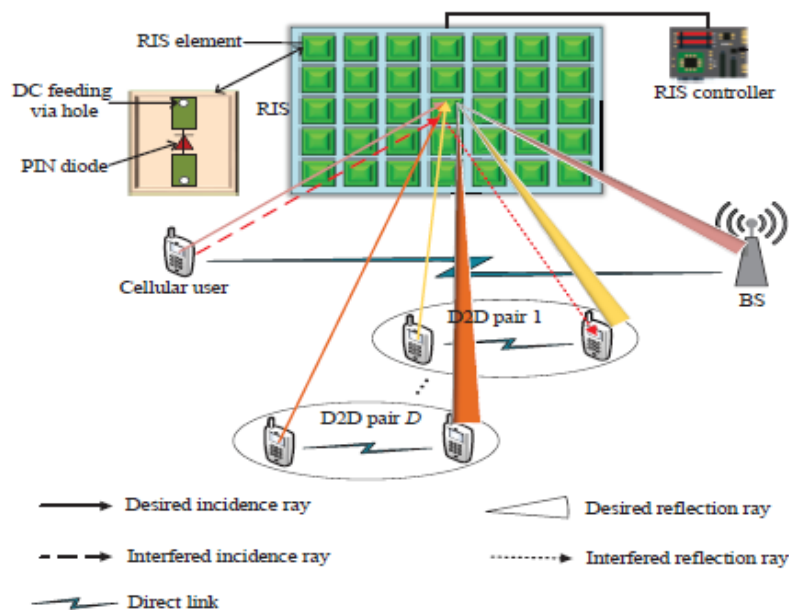
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η αρχική τηλεπικοινωνιακή διάταξη που χρησιμοποιούμε για να βελτιστοποιήσουμε την απόδοση, υπό την επίδραση του RIS. Επιπλέον εξηγούμε κάποια μεγέθη τα οποία δεν αναλύθηκαν στα προηγούμενα θεωρητικά κεφάλαια.

5.1.1 Τοπολογία

Θεωρούμε ένα δίκτυο ζεύξης uplink, το οποίο περιέχει επιφάνεια RIS, και είναι υποβοηθούμενη από αυτή. Στο δίκτυο αυτό έχουμε έναν χρήστη κινητής τηλεφωνίας και πολλαπλά ζευγάρια επικοινωνίας D2D.

Στη διάταξη αυτή χρησιμοποιούμε ένα RIS προκειμένου να περιορίσουμε τυχόν παρεμβολές, το οποίο RIS περιέχει πλειάδα προγραμματιζόμενων στοιχείων. Ανακλά τα σήματα που προσπίπτουν στην επιφάνεια, και στρέφεται στους δέκτες με κατευθυνόμενα κύματα. Το RIS βοηθά στη δημιουργία ενός ανακλώμενου καναλιού ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη. Επομένως, στην περίπτωση μας όπου έχουμε να κάνουμε με κινητές επικοινωνίες, ο σταθμός βάσης δέχεται τόσο τα απευθείας σήματα από τον χρήστη κινητής συσκευής, αλλά και τα ανακλώμενα σήματα τα οποία προέρχονται από το RIS. Το RIS διαθέτει επιφάνειες με ρυθμιζόμενες γωνίες φάσης, οι οποίες συμβάλλουν στη ρύθμιση του ελέγχου ισχύος της διάταξης. Θεωρούμε επιπλέον πως υπάρχουν D D2D ζεύξεις που μοιράζονται το ίδιο εύρος ζώνης με την κινητή ζεύξη. Επειδή όλες αυτές οι ζεύξεις μοιράζονται το ίδιο φάσμα, οι παρεμβολές είναι αναπόφευκτες, επομένως η απόδοση της διάταξης περιορίζεται.

Συνολικά, έχουμε $D+1$ ζεύξεις τις οποίες ορίζουμε στο σύνολο $\mathbf{A} = 1, 2, \dots, D, D+1$. Για μία ζεύξη $i \in L$, θεωρούμε αντίστοιχα τους πομπούς και δέκτες r_i, t_i .



Σχήμα 5.1

Όσον αφορά τους διαύλους επικοινωνίας, έχουμε 2 ειδών. Ένα LOS καθώς και ένα NLOS όπου το RIS ανακλά το σήμα από τον πομπό στον δέκτη. Συγκεκριμένα, το κανάλι επικοινωνίας από τον πομπό t_i στον δέκτη r_i όπου "επεμβαίνει" το l_z, l_y στοιχείο, ως το h_{ij} . Το LOS κανάλι επικοινωνίας το συμβολίζουμε με h_{direct} .

Στη μελετούμενη διάταξη, το RIS είναι ένας ομοιόμορφος επίπεδος πίνακας τετραγωνικού μεγέθους, όπου περιέχει $N \times N$ στοιχεία. Θα εξετάσουμε την ολίσθηση φάσης για κάθε τέτοιο στοιχείο. Θεωρούμε χωρίς βλάβη της γενικότητας και για λόγους απλότητας, ότι το εύρος της ολίσθησης φάσης θα είναι περιορισμένο και μάλιστα κβαντισμένο στο διάστημα $[0, 2\pi]$. Θεωρώ ότι η κβάντιση θα γίνει με e bits, επομένως θα έχουμε 2^e ολισθήσεις φάσης. Στη συνέχεια, ορίζουμε την σταθερά απόκρισης που προκαλείται από το στοιχείο του RIS στην l_z -η γραμμή και την l_y -η στήλη ως $q_{l_z, l_y} = e^{j\theta_{l_z, l_y}}$, με ολίσθηση φάσης $\theta_{l_z, l_y} = \frac{2m_{l_z, l_y}\pi}{2^e - 1}$, $m_{l_z, l_y} = 0, 1, \dots, 2^e - 1$, $1 \leq l_z, l_y \leq N$ όπου j είναι το φανταστικό μέρος (το q είναι μιγαδικός αριθμός).

Επιπλέον, στη διάταξη μας παίρνουμε τη θεώρηση πως δεν υπάρχουν πομποί ή δέκτες στο RIS, και λειτουργεί μόνο σαν ανακλαστήρας.

5.1.2 Ανάλυση παρεμβολών.

Στο NLOS κανάλι, το σήμα που λαμβάνει ο δέκτης είναι η υπέρθεση του σήματος που εκπέμπει ο πομπός καθώς και το ανακλώμενο σήμα από το RIS. Όλα τα υπόλοιπα σήματα από τους λοιπούς διαύλους επικοινωνίας συνδράμουν στην συνολική παρεμβολή. Λαμβάνοντας υπόψη την προστιθέμενη αυτή παρεμβολή, το λαμβανόμενο αυτό σήμα στο δέκτη δίνεται από τη σχέση:

$$s_{r_i} = (h_{r_i, t_i} + \sum_{l_z, l_y} h_{l_z, l_y}^{r_i, t_i}) \sqrt{p_i} s_{t_i} + \sum_{j \in L, j \neq i} (h_{r_i, t_j} + \sum_{l_z, l_y} h_{l_z, l_y}^{r_i, t_j}) \sqrt{p_j} s_{t_j} + w_{r_i} \quad (5.1)$$

Ο πίνακας $\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_{D+1}]$ είναι ένας πίνακας -γραμμή με μέγεθος $D+1$ όπου περιέχει την ισχύ μετάδοσης για όλες τις ζεύξεις $i = 1, 2, \dots, D+1$. Το w_{r_i} είναι AWGN που ακολουθεί την μιγαδική κανονική κατανομή με μέση τιμή 0 και τυπική απόκλιση σ^2 . Την παραπάνω τη σχέση την γράφουμε με τη βοήθεια κάποιων μητρών ως εξής:

$$\mathbf{F} = \sum_{l_z, l_y} q_{l_z, l_y} H_{l_z, l_y} \quad (5.2)$$

Όπου H_{l_z, l_y} είναι ένας πίνακας που αποτελείται από τις σταθερές των ανακλώμενων διαύλων μεταξύ όλων των πομπών και των δεκτών, με μέγεθος $(D+1) \times (D+1)$. (Θα αναλυθεί λίγο παρακάτω το πως προκύπτει αυτή η σταθερά). Επιπλέον ορίζουμε το μέγεθος F_{r_i, t_j} το οποίο αντιπροσωπεύει το στοιχείο στην j - γραμμή και i στήλη του πίνακα \mathbf{F} . Στη συνέχεια, H^L περιέχει τις σταθερές των διαύλων LOS, και είναι μεγέθος $(D+1) \times (D+1)$. Αντιστοίχως, το H_{r_i, t_j} αντιπροσωπεύει το στοιχείο στην j - γραμμή και i στήλη του πίνακα \mathbf{H} .

Ξαναγράφουμε τώρα την παραπάνω σχέση ως εξής:

$$s_{r_i} = (H_{r_i, t_i}^L + F_{r_i, t_i}) \sqrt{p_i} s_{t_i} + \sum_{j \in L, j \neq i} (H_{r_i, t_j}^L + F_{r_i, t_j}) \sqrt{p_j} s_{t_j} + w_{r_i} \quad (5.3)$$

Επιπλέον, το SINR που λαμβάνεται στον δέκτη για την i -οστή ζεύξη είναι:

$$\Gamma_{r_i} = \frac{|H_{r_i, t_i}^L + F_{r_i, t_i}|^2 p_i}{\sum_{j \in L, j \neq i} |H_{r_i, t_j}^L + F_{r_i, t_j}|^2 p_j + \sigma^2} \quad (5.4)$$

Και ο αντίστοιχος ρυθμός μετάδοσης, σύμφωνα με τον κανόνα του Shannon, είναι

$$R_{r_i} = \log_2 \left(1 + \frac{|H_{r_i, t_i}^L + F_{r_i, t_i}|^2 p_i}{\sum_{j \in L, j \neq i} |H_{r_i, t_j}^L + F_{r_i, t_j}|^2 p_j + \sigma^2} \right) \quad (5.5)$$

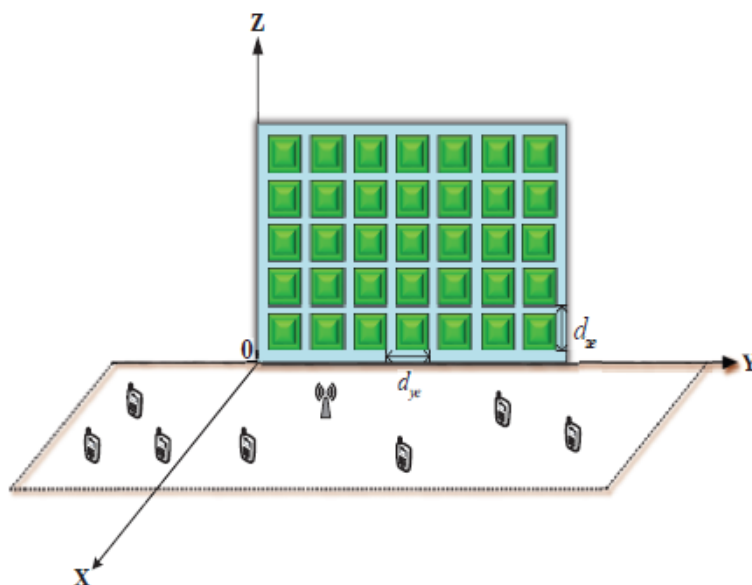
5.1.3 Μαθηματική διάταξη στο χώρο - σταθερές ζεύξεων

Η μοντελοποίηση μας εξαρτάται σχεδόν αμιγώς από την συνολική τοπολογία του RIS, των πομπών και των δεκτών. Την τοπολογία αυτή την απεικονίζουμε όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα στο καρτεσιανό επίπεδο. Συγκεκριμένα, το RIS τοποθετείται στο επίπεδο Y-Z, με την βάση του να εφάπτεται όπως απεικονίζεται στο σχήμα, στους άξονες Y-Z. Θεωρούμε πως οι αποστάσεις μεταξύ των στοιχείων του RIS είναι $d_{ye} = 0.005$ m και $d_{ze} = 0.005$ m. Επιπλέον θεωρούμε πως ο σταθμός βάσης, ο χρήστης κινητής τηλεφωνίας (δηλαδή το ζεύγος πομπού-δέκτη), εντοπίζονται στο επίπεδο X-Y σε μία ορθογώνια περιοχή όπου οι κορυφές τις είναι στις συντεταγμένες $(0, -100, 0)$, $(0, 100, 0)$, $(100, 100, 0)$, $(100, -100, 0)$.

Όλες οι ζεύξεις πομπού-δέκτη, θεωρούμε πως είναι ομοιόμορφα και τυχάια κατανεμημένοι στην ορθογώνια περιοχή που ορίσαμε παραπάνω. Έστω μία ζεύξη i , τότε οι συντεταγμένες για τον πομπό και τον δέκτη θα είναι αντίστοιχα (διανύσματα αποστάσεων).

Με βάση αυτές τις συντεταγμένες πομπού-δέκτη, η απόσταση ορίζεται ως εξής:

$$DS_{t_i}^{l_z, l_y} = \sqrt{t_{ix}^2 + (t_{iy} - l_y d_{ye})^2 + (-l_z d_{ze})^2} \quad (5.6)$$



Σχήμα 5.2: Το δίκτυο αποτελούμενο από τους χρήστες και το RIS στο καρτεσιανό επίπεδο.

$$DS_{l_z, l_y}^{r_i} = \sqrt{r_{ix}^2 + (r_{iy} - l_y d_{ye})^2 + (-l_z d_{ze})^2} \quad (5.7)$$

Σύμφωνα με το δεδομένο σύστημα συντεταγμένων, ορίζουμε και την κατάλληλη μοντελοποίηση για τον δίαυλο (για την ακρίβεια, για τους διαύλους LOS, και NLOS.).

Για το κανάλι όπου παρεμβάλλεται το RIS, θα το μοντελοποιήσουμε σαν δίαυλο Rician (ΠΗΓΗ). Αυτός περιλαμβάνει τόσο LOS, όσο και NLOS στοιχεία. Συγκεκριμένα, ορίζουμε το παρακάτω μέγεθος για τον συγκεκριμένο δίαυλο:

$$h_{l_z, l_y}^{r_i, t_i} = \sqrt{\frac{\beta}{1 + \beta}} h_{l_z, l_y}^{\tilde{r}_i, t_i} + \sqrt{\frac{1}{1 + \beta}} h_{l_z, l_y}^{\hat{r}_i, t_i} \quad (5.8)$$

όπου $\beta = 4$ είναι η σταθερά Rician, \tilde{h} είναι το LOS στοιχείο και \hat{h} είναι το NLOS στοιχείο. Για το LOS στοιχείο, η μοντελοποίηση δίνεται από τον τύπο:

$$h_{l_z, l_y}^{\tilde{r}_i, t_i} = \sqrt{\beta_0 (DS_{l_z, l_y}^{l_z, l_y} DS_{l_z, l_y}^{r_i})^{-a}} e^{-j\theta'} \quad (5.9)$$

όπου $\beta_0 = -61.3849$ dB είναι το gain του διαύλου σε απόσταση αναφοράς ενός μέτρου, θ' είναι η φάση η οποία είναι μία τυχαία μεταβλητή στο διάστημα $[0, 2\pi]$ και a είναι η σταθερά path loss στον δίαυλο LOS.

Για το NLOS στοιχείο, η μοντελοποίηση δίνεται από τον τύπο:

$$h_{l_z, l_y}^{\hat{r}_i, t_i} = \sqrt{\beta_0 (DS_{l_z, l_y}^{l_z, l_y} DS_{l_z, l_y}^{r_i})^{-a'}} h_{NLOS, l_z, l_y}^{r_i, t_i} \quad (5.10)$$

όπου a' είναι η σταθερά path loss στον δίαυλο NLOS και (μπλα μπλα) που ακολουθεί την μιγαδική κανονική κατανομή ($CN(0, 1)$) είναι το small-scale fading.

Επιπλέον, ορίζουμε το παρακάτω μέγεθος για τον LOS δίαυλο:

$$h_{r_i, t_i} = h_i \sqrt{\beta_0 (DS_{r_i}^{t_i})^{-\alpha}} \quad (5.11)$$

όπου h_i είναι το small scale fading το οποίο ακολουθεί την κατανομή Nakagami - m_i με παραμέτρους $m_i = 3$ και $\omega_i = 1/3$.

Το θ είναι το large-scale path loss και η απόσταση μεταξύ ενός πομπού και ενός χρήστη, το οποίο ξανά υπολογίζεται σύμφωνα με το δοσμένο σύστημα συντεταγμένων.

Επιπλέον, στο large-scale fading, ορίζουμε $\alpha = 2.5$ στην περίπτωση LOS και $\alpha = 3.6$ στην περίπτωση NLOS. Στην εν λόγω μοντελοποίηση θα χρησιμοποιήσουμε την ζώνη συχνοτήτων μήκους κύματος της τάξης του mm με κεντρική συχνότητα τα 28 GHz. Η πυκνότητα φάσματος ισχύος του θορύβου είναι -134 dBm/MHz. Επιπλέον, η μέγιστη ισχύς διάδοσης στο δίαυλο είναι 23 dBm και ο κάθε χρήστης (αφού βελτιστοποιηθεί το τηλεπικοινωνιακό σύστημα) θα έχει ελάχιστη τιμή SINR = 5 dB.

5.1.4 Βελτιστοποίηση με τη χρήση του Potential Game

Καταρχάς, υπενθυμίζουμε πως η ισχύς που λαμβάνει ο χρήστης j όταν μεταδίδει ο χρήστης i με ισχύ P_i είναι:

$$P_i G_{i,j}, G_{i,j} = (h_{i,j} + \sum_{l_z, l_y} h_{l_z, l_y}^{i,j} q_{l_z, l_y}) \quad (5.12)$$

και οι παρεμβολές που "αισθάνεται" ο χρήστης i είναι

$$I_{sense} = \sum_{\forall j \neq i} P_j G_{i,j} \quad (5.13)$$

ενώ οι παρεμβολές που προκαλεί ο χρήστης i στους υπόλοιπους χρήστες είναι

$$I_{cause} = \sum_{\forall j \neq i} P_i G_{j,i} \quad (5.14)$$

Οι συνολικές παρεμβολές που δέχεται και "αισθάνεται" κάθε χρήστης είναι

$$I = \sum_{\forall i} (\sum_{\forall j \neq i} P_j G_{i,j} + \sum_{\forall j \neq i} P_i G_{i,j}) \quad (5.15)$$

Θα ορίσουμε τώρα το Utility Function για κάθε χρήστη ως εξής:

$$U(P_i, P_{-i}) = - \sum_{\forall j \neq i} P_j G_{i,j} - \sum_{\forall j \neq i} P_i G_{i,j} \quad (5.16)$$

Θέλουμε κάθε χρήστη να μεγιστοποιεί το Utility Function, ισοδύναμα να ελαχιστοποιεί τις παρεμβολές που "αισθάνεται" και προκαλεί.

Το παίγνιο που μόλις ορίσαμε είναι Exact Potential και η συνάρτηση Exact Potential δίνεται από την σχέση:

$$\Phi(P_i, P_{-i}) = \sum_{\forall i} (-a \sum_{\forall j \neq i} P_j G_{i,j} - (1-a) \sum_{\forall j \neq i} P_i G_{i,j}) \quad (5.17)$$

Αποδεικνύεται πως αυτό το παίγνιο (απόδειξη στο απενδύξ) έχει ισορροπία Nash , η οποία είναι το διάνυσμα των μέγιστων ισχύων που δέχεται ο κάθε χρήστης δηλαδή:

$$U_i(P_i, P_{-i}) - U_i(P'_i, P_{-i}) = \Phi(P_i, P_{-i}) - \Phi(P'_i, P_{-i}) \quad (5.18)$$

όπου προκύπτει η ισορροπία Nash $\mathbf{P} = [P_1, P_2, \dots, P_n]$

Επομένως, οι χρήστες με δοσμένο το βέλτιστο διάνυσμα θ για τις γωνίες, μπορούν να προσδιορίσουν την μέγιστη ισχύ (για κάθε χρήστη) η οποία ελαχιστοποιεί τις παρεμβολές που προκαλεί σε άλλους και παράλληλα δέχεται ο ίδιος.

5.1.5 Αποτελέσματα προσέγγισης Potential Games

Για την βελτιστοποίηση του Potential Game χρησιμοποιήσαμε αλγορίθμους βελτιστοποίησης. Ένας από τους αλγορίθμους βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήσαμε είναι ο **Gradient Descent**.

Όπως προδίδεται και από το όνομα του αλγορίθμου, βασίζεται στην κλίση της συνάρτησης. Στόχος μας είναι να βρούμε το σημείο για το οποίο ελαχιστοποιείται η συνάρτηση, έστω p . Ο αναδρομικός τύπος ο οποίος περιγράφει τον αλγόριθμο είναι ο εξής:

$$p_{n+1} = p_n - \eta \nabla f(p_n) \quad (5.19)$$

Πρακτικά λοιπόν, υπολογίζεται η κλίση σε ένα συγκεκριμένο σημείο, και αφαιρείται από το σημείο αυτό. Βλέπουμε ότι η κλίση πολλαπλασιάζεται από μία παράμετρο η , η οποία είναι το **learning rate** του αλγορίθμου. Στην εφαρμογή μας, πήραμε σαν learning rate την τιμή 0.01.

5.1.6 Προσέγγιση μέσω Stackelberg Games

Βασισμένοι στην περιγραφή των Stackelberg Games στην προηγούμενη ενότητα, θα μοντελοποιήσουμε την τοπολογία ως προς αυτό το παίγνιο. Εδώ θα θεωρήσουμε τον πομπό ως αρχηγό, ο οποίος θέτει τις στροφές φάσεις q , και τους δέκτες ως "ακόλουθους", οι οποίοι ρυθμίζουν τις ισχύς P_i . Εδώ ο πομπός(αρχηγός) στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους η οποία αποτελείται από τις παρεμβολές που προκαλούνται και είναι αντιληπτές από όλους τους χρήστες. Στη συνέχεια, οι ακόλουθοι στοχεύουν στο να ελαχιστοποιήσουν τις "προσωπικές" τους Utility Functions, ανάλογα με τις παρεμβολές που νιώθουν.

Επομένως, θέλουμε να μεγιστοποιήσουμε(ή ισοδύναμα να ελαχιστοποιήσουμε το αρνητικό της) την παρακάτω συνάρτηση:

$$\sum_{\forall i} P_i G_{i,j} \quad (5.20)$$

Θα ξεκινήσουμε βρίσκοντας τις βέλτιστες στροφές φάσεις οι οποίες μεγιστοποιούν τη

συνάρτηση. Στη συνέχεια, για κάθε ακόλουθο(δέκτη), θα μεγιστοποιήσουμε το σήμα σε αυτόν με δεδομένες ισχύεις P_i και τις γωνίες που έχει επιλέξει ο αρχηγός(πομπός).

Με δεδομένες τις στροφές φάσης, επιλύουμε πρόβλημα βελτιστοποίησης για κάθε δέκτη για να βρούμε τις βέλτιστες ισχύεις.

Επαναλαμβάνουμε αυτή τη διαδικασία μέχρι την επιθυμητή σύγκλιση. Ουσιαστικά ο αρχηγός ρυθμίζει τις στροφές φάσεις ανάλογα με τις αποκρίσεις των ακολούθων, και οι ακόλουθοι ρυθμίζουν τα P_i βασιζόμενοι στις στροφές φάσεις που έχει επιλέξει ο αρχηγός.

5.1.7 Heuristic Model [1]

Μία άλλη προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση της διάταξης είναι το Heuristic Model, το οποίο θα περιγράψουμε παρακάτω. Σκοπός του Heuristic Model είναι η υποβάθμιση τάξης πολυπλοκότητας του προβλήματος το οποίο όπως είναι, έχει πολύ μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας.

Συγκεκριμένα, θεωρούμε ένα RIS ο οποίος έχει M στοιχεία, και έστω το σύνολο $M = 1, 2, \dots, m, \dots, M$. Επιπλέον, για το m -οστό στοιχείο του RIS, θεωρούμε την στροφή φάσης $\omega_m \in [0, 2\pi)$. Παίρνουμε την παραδοχή πως το πλάτος του σήματος δεν επιδέχεται κάποια μεταβολή, επομένως η τιμή του συντελεστή ανάκλασης είναι ίση με 1. Ο πίνακας ανάκλασης είναι ένας διαγώνιος πίνακας της μορφής $\mathbf{\Omega} = \text{diag}(e^{j\omega^1}, \dots, e^{j\omega^M}) \in \mathbb{C}^{M \times M}$ Σε κοινή γραμμή με τις προηγούμενες μοντελοποιήσεις, θεωρούμε h_{ij} το channel gain για το απευθείας σήμα μεταξύ πομπού και δέκτη και $h_{r,j}$ το channel gain για το δίαυλο μεταξύ του RIS και του δέκτη, ενώ τέλος h_{ir} το channel gain μεταξύ του πομπού και του RIS.

Σκοπός είναι να προσδιορίσουμε το διάνυσμα γωνιών(στροφή φάσης) $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots]$ που βελτιστοποιούν τη συνολική ισχύ του σήματος που λαμβάνεται στο δέκτη. Δηλαδή, να βρούμε αυτές τις γωνίες ω για τις οποίες μεγιστοποιείται το συνολικό channel gain των πομπών. Οδηγούμαστε στην επίλυση του ακόλουθου προβλήματος βελτιστοποίησης:

$$\max_{\omega} \sum_{i=1}^{|I|} |h_{i,j} + h_{R,j}^H \mathbf{\Omega} h_{i,R}|^2 \quad (5.21)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq \omega_m < 2\pi, \forall m \in M. \quad (5.22)$$

Σε αυτό το σημείο θεωρούμε $v_m = e^{j\omega_m}, \forall m \in M$ και το διάνυσμα $v = [v_1, \dots, v_m, \dots, v_{|M|}] \in \mathbb{C}^{M \times 1}$. Αντικαθιστούμε $\hat{h}_{i,R}^H = h_{R,j}^H \text{diag}(h_{i,R}) \in (\mathbb{C})^{1 \times M}$ και προκύπτει το εξής:

$$\max_v \sum_{i=1}^{|I|} |h_{i,j} + \hat{h}_{R,j}^H v|^2 \quad (5.23)$$

$$\text{s.t. } |v_m| = 1, \forall m \in M. \quad (5.24)$$

όπου πλέον ο νέος περιορισμός είναι ισοδύναμος του αρχικού. Η εξίσωση προς βελτιστοποίηση δεν πληροί τις προϋποθέσεις σύγκλισης καθώς πρόκειται για μία συνάρτηση η οποία δέν είναι κοίλη, ενώ παράλληλα το σύνολο που ορίζει ο περιορισμός δέν είναι κυρτό.

Επομένως, έτσι όπως είναι στημένο το πρόβλημα, δεν υπάρχει λύση στην οποία μπορεί να συγκλίνει. Το πρόβλημα έρχεται να μας λύσει η προσέγγιση heuristic, ως εξής:

Θεωρούμε την περίπτωση όπου ένας πομπός, έστω για $i = 1$, υπάρχει στο δίαυλο. Τότε το channel power gain του δεδομένου πομπού μεγιστοποιείται όταν η υπέρθεση των σημάτων από διαφορετικές διαδρομές (στην προκειμένη περίπτωση την απευθείας διαδρομή πομπού-δέκτη και την διαδρομή όπου παρεμβάλλεται το RIS, ευθύγραμμίζονται απόλυτα και συνδυάζονται κατα το βέλτιστο. Αυτό συμβαίνει όταν οι γωνίες του ευθέως και του ανακόμενου σήματος είναι ίσες, ως εξής:

$$\angle h_{1,U} = -\angle h_{1,R} + \angle v \iff \angle v = \angle h_{1,U} + \angle h_{1,R}. \quad (5.25)$$

Έτσι καταλήγουμε στον βέλτιστο πίνακα ολίσθησης φάσης μεγέθους $1 \times |M|$, $\omega^* = \angle v$ για το σύστημα. Επομένως, μπορούμε να συμπεράνουμε πως υπάρχει ένας πίνακας $v_i = [v_{i,1}, \dots, v_{i,m}, \dots, v_{i,M}] \in \mathbb{C}^{|M| \times 1}$ για κάθε πομπό i που μεγιστοποιεί το channel power gain, ο οποίος δίνεται από την εξίσωση:

$$v_i = e^{j\angle h_{i,j}} e^{j\angle h_{i,R}}, \forall i \in I. \quad (5.26)$$

Παρόλα αυτά, διαπιστώνεται ότι οι πίνακες αυτοί διαφέρουν για κάθε πομπό, επομένως στο υπάρχον πρόβλημα δεν υπάρχει κάποιος πίνακας ο οποίος να μεγιστοποιεί το channel gain για όλους τους πομπούς στη διάταξη.

Θα υποβαθμίσουμε περαιτέρω την πολυπλοκότητα του προβλήματος προκειμένου να συγκλίνουμε σε μία βέλτιστη λύση. Θεωρούμε πως κάθε πομπός έχει ένα συντελεστή βάρους στο διάστημα $[0, 1]$, και θεωρούμε τον γραμμικό συνδυασμό των πινάκων v_i ως εξής:

$$v = \sum_{i=1}^I w_i v_i, \quad (5.27)$$

όπου προφανώς θα ισχύει ότι $\sum_{i=1}^I w_i = 1$.

Επομένως τώρα το πρόβλημα ανάγεται στο να βρούμε την βέλτιστη κατανομή των τιμών w_i για κάθε τιμή του πίνακα v_i . Τώρα το πρόβλημα επίλυσης έχει ανηχθεί στο εξής:

$$\max_{w} \sum_{i=1}^{|I|} |h_{i,j} + \hat{h}_{R,j} \Omega h_{i,R}|^2 \quad (5.28)$$

$$s.t. 0 \leq w_i \leq 1, \forall i \in I. \quad (5.29)$$

Το πλέον πρόβλημα που καταλήξαμε αποτελείται από μία μη αρνητική γραμμική συνάρτηση, ομοίως και για τους περιορισμούς.

Επομένως, βρίσκοντας το διάνυσμα των βέλτιστων βαρών w μας οδηγεί στο βέλτιστο πίνακα v και προσδιορίζει τις ζητούμενες στροφές φάσης ω .

5.1.8 Reinforcement Learning

Η τελευταία μοντελοποίηση θα γίνει με τη βοήθεια της μηχανικής μάθησης, και συγκεκριμένα με αλγορίθμους Reinforcement Learning.

Το Reinforcement Learning συνδέεται απόλυτα με τη θεωρία παιγνίων ως προς τη λογική καθώς και τη προσέγγιση, καθώς το πεδίο στο οποίο εφαρμόζεται είναι όσον αφορά την εκμάθηση μιας βέλτιστης συμπεριφοράς σε δεδομένο περιβάλλον, προκειμένου να επιτευχθεί το μέγιστο δυνατό payoff. Αυτή η συμπεριφορά υιοθετείται μέσω αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον, και θα μπορούσαμε να το παρομοιάσουμε με τα παιδιά που αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον για να μάθουν τον κόσμο [22]. Παρακάτω ακολουθεί μία εικόνα που συνοψίζει τη δομή και τα στοιχεία του Reinforcement Learning:



Σχήμα 5.3: Ο πλήρης μηχανισμός λειτουργίας του Reinforcement Learning

Όσον αφορά την εφαρμογή του Reinforcement Learning στη διάταξη που μελετάμε, κάθε πομπός επιλέγει μόνοι του, μέσα από ένα διακριτό σύνολο ισχυών (το οποίο αρχικοποιείται με τυχαίο τρόπο στην πρώτη επανάληψη), μέσα από ένα διακριτό σύνολο ισχύων, αυτό που μεγιστοποιεί το Utility του. Θεωρούμε πως οι επιλογές (ισχείς) των άλλων πομπών παραμένουν σταθερές και ίσες με την τιμή που επέλεξαν στην προηγούμενη επανάληψη. Επομένως, σε αυτή την επαναληπτική διαδικασία, ο κάθε παίκτης-πομπός παίρνει μία απόφαση διατηρώντας τις αποφάσεις των άλλων σταθερές. Η απόφαση αυτή θα οδηγήσει σε μία "επιβράβευση" για τον εκάστοτε πομπό, η οποία επιβράβευση θα είναι το Utility του. Μάλιστα, με βάση αυτή την επιβράβευση, ο κάθε πομπός ανανεώνει την κάθε πιθανότητα να επιλέξει ένα power level ή όχι, σε επόμενη επανάληψη. Στο παράρτημα Α παρατίθεται ο ψευδοκώδικας που μοντελοποιεί την προσέγγιση μέσω Reinforcement Learning.

Όλες οι παραπάνω μοντελοποιήσεις που περιγράφηκαν, μπορούν να επιλύσουν το ζητούμενο πρόβλημα βελτιστοποίησης, και να συγκλίνει το σύστημα σε ισορροπία Nash, το καθένα με διαφορετικό τρόπο, άλλα καταλήγοντας κάθε φορά στο ίδιο αποτέλεσμα. Συνοψίζοντας, στο Potential κάθε χρήστης είχε ίσους όρους και σκοπός ήταν η εύρεση της βέλτιστης γωνίας ανα χρήστη, και δεδομένου αυτής, το βέλτιστο Utility κάθε χρήστη, στο Stackelberg, ο χρήστης "αρχηγός" επιλέγει τις επιθυμητές γωνίες ανάλογα με τις αποκρίσεις των υπολοίπων χρηστών, στο Heuristic Model με μαθηματικά εργαλεία, υποβαθμίζεται η τάξη πολυπλοκότητας του προβλήματος βελτιστοποίησης σε απλούστερο, και τέλος στο Reinforcement Learning υπάρχουν ομοιότητες με το Stackelberg, με τη διαφορά ότι οι ενέργειες

που κάνει κάθε χρήστης πραγματοποιούνται στοχαστικά.

Κεφάλαιο 6

Αποτελέσματα Μοντελοποίησης.

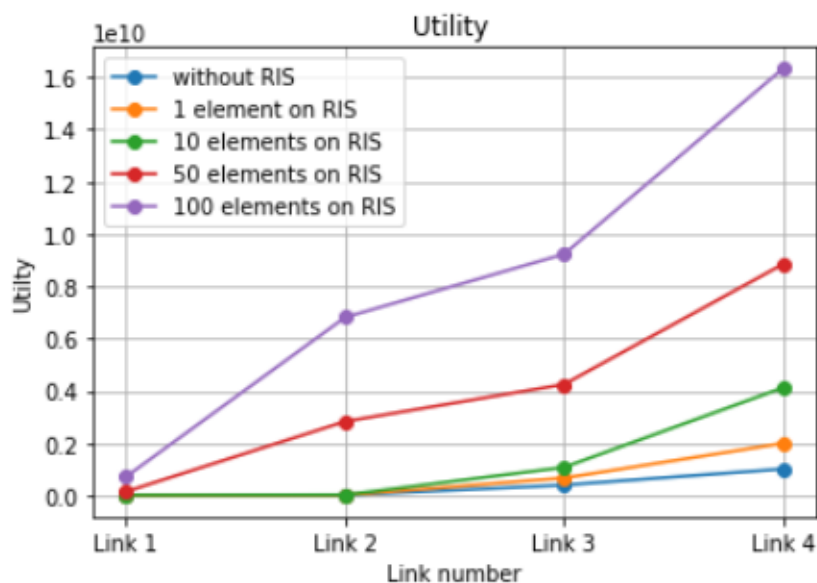
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η αξιολόγηση της τοπολογίας σύμφωνα με μετρικές που θα δούμε παρακάτω.

Τις ποιοτικές αξιολογήσεις για την τοπολογία, τις αντήσαμε από την Stackelberg προέγγιση, διότι απο τη στιγμή που όλες οι μέθοδοι ξεκινούν με τυχαία αρχικοποίηση, είναι λογικό να υπάρχουν μικρές αριθμητικές διαφορές σε κάθε μοντέλο.

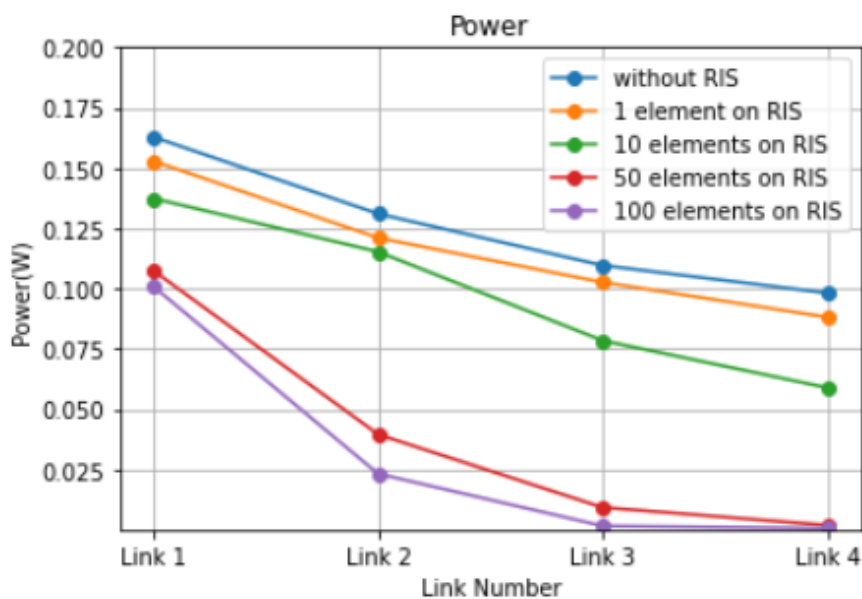
6.1 Αξιολόγηση ως προς το Utility και την ισχύ εκπομπής.

Το πρώτο μας evaluation θα είναι ως προς το Utility και την λαμβανόμενη ισχύ εκπομπής, τόσο ανα επίπεδο χρήστη, όσο και ως προς το συνολικό. Ξεκινάμε με τα διαγράμματα που απεικονίζουν το Utility καθώς και την ισχύ για κάθε χρήστη, ως προς διαφορετικό αριθμό RIS επιφανειών. Επιλέξαμε για το εν λόγω evaluation 4 χρήστες, άρα 4 D2D ζεύξεις, και απεικονίσαμε τις μετρικές ως προς καμία, 1, 10, 50 και 100 επιφάνειες RIS. Η επιλογή αυτών των παραμέτρων έγινε με σκοπό η μοντελοποίηση να είναι άμεσα εφαρμόσιμη σε πραγματικές τηλεπικοινωνιακές λύσεις. Υπενθυμίζουμε το κατώφλι για την ισχύ, το οποίο είναι -23 dBm, επομένως σε Watt, οι τιμές ισχύος που αναμένουμε βρίσκονται μεταξύ 0.0001 και 0.2 Watt. Οι χρήστες έχουν τοποθετηθεί τυχαία σε μία ορθογώνια περιοχή, όπως αυτή ορίστηκε στο κεφάλαιο 5. Τέλος, επειδή όπως αναφέρθηκε και πριν, όλες οι μέθοδοι ξεκινούν με τυχαία αρχικοποίηση των ισχύων, αντήσαμε τον μέσο όρο των αποτελεσμάτων από αριθμό που τρέξαμε τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, προκειμένου να έχουμε όσο πιο αντικειμενικά αποτελέσματα είναι δυνατό. Επιπλέον, για λόγους περαιτέρω σχολιασμού, ταξινομήσαμε τους χρήστες σε αύξουσα σειρά, σύμφωνα με το Utility (ή όπως θα διαπιστωθεί στη συνέχεια, σε φθίνουσα σειρά συναρτήσει της ισχύος του κάθε χρήστη).

Παρατηρώντας τις 2 γραφικές παραστάσεις μπορούμε να διακρίνουμε μία συσχέτιση στη συμπεριφορά του Utility και της ισχύος ανά χρήστη. Βλέπουμε ότι μεγάλο Utility σε κάποιο χρήστη συνεπάγεται μικρή λαμβανόμενη ισχύς. Με άλλα λόγια, ένας χρήστης ο οποίος λαμβάνει χαμηλή ισχύ, μπορεί να έχει μεγαλύτερη ικανοποίηση, διότι διαχειρίζεται "πιο έξυπνα" τους πόρους που διαθέτει, και είναι εφικτό σύμφωνα με τη συνάρτηση Utility που έχουμε ορίσει στην εν λόγω εργασία, καθώς το Utility Function που διέπει τη μοντελοποίηση, αποτελείται τόσο από τις παρεμβολές που προκαλεί ο κάθε χρήστης, όσο και από τις παρεμβολές που "αισθάνεται". Επομένως, μεγάλη ισχύς λήψεως δεν σημαίνει και μεγαλύτερο Utility.



Σχήμα 6.1: *Utility* ανα χρήση(ζεύξη) συναρτήσει του αριθμού των RIS στοιχείων.

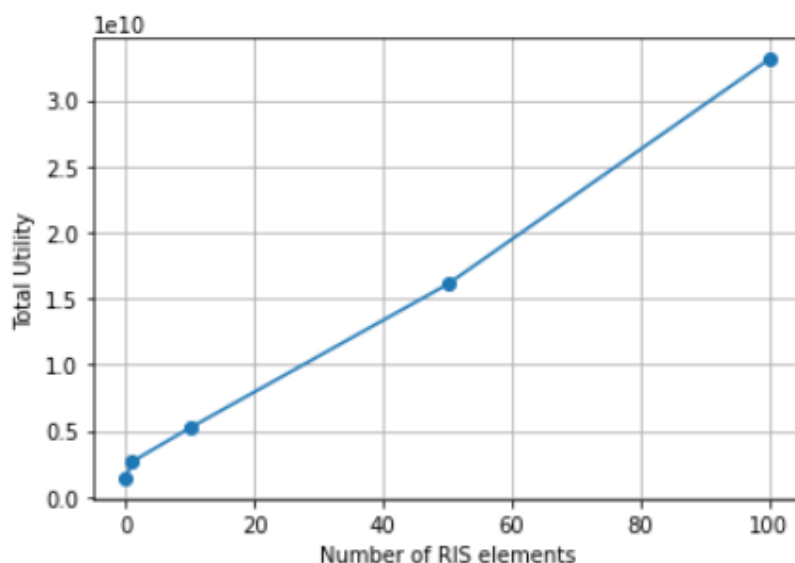


Σχήμα 6.2: *Ισχύς* ανα χρήση(ζεύξη) συναρτήσει του αριθμού των RIS στοιχείων.

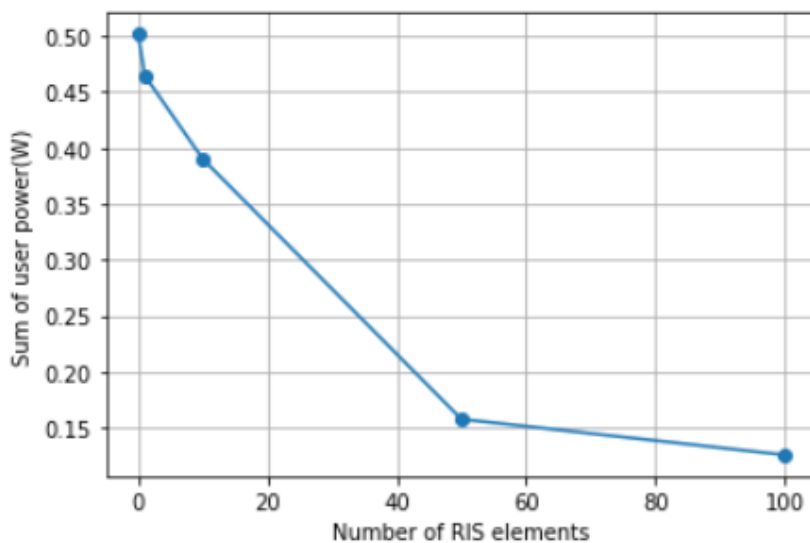
Επιπλέον, παρατηρούμε πως μέχρι και τα 10 RIS, και κυρίως στους χρήστες με μεγαλύτερη λαμβανόμενη ισχύ, δεν υπάρχει αρκούντως μεγάλη διαφορά, σε σχέση με το να γίνουν τα RIS 50 ή 100. Ειδικότερα για την περίπτωση των 100 RIS, βλέπουμε ότι το Utility ειδικά για τον ποιο "αδύναμο" χρήστη/παίκτη, ο οποίος έχει τη χαμηλότερη λαμβανόμενη ισχύ, εκτοξεύεται. Επιπλέον, μπορούμε να δούμε πως για 100 RIS στοιχεία, πλησιάζουμε προς το βέλτιστο power allocation, στη τιμή 0.001 Watts.

Ας δούμε και μία σφαιρικότερη εικόνα, απεικονίζοντας τη συνολική ισχύ εκπομπής ανά αριθμό RIS, και το συνολικό Utility της τοπολογίας ανά αριθμό RIS.

Όπως ήταν απολύτως αναμενόμενο, παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά ως προς το Utility



Σχήμα 6.3: Συνολικό Utility της τοπολογίας συναρτήσει του αριθμού των RIS στοιχείων.

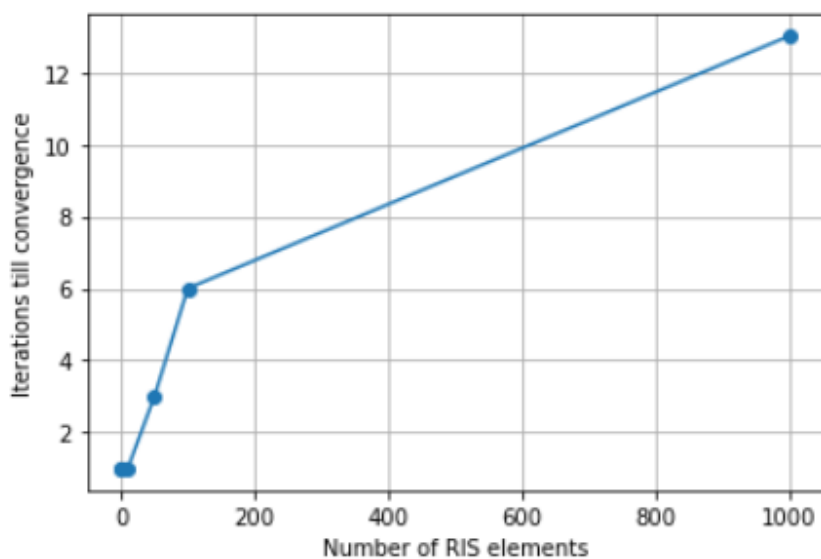


Σχήμα 6.4: Συνολική λαμβανόμενη ισχύς της τοπολογίας συναρτήσει του αριθμού των RIS στοιχείων.

καθώς και την ισχύ μετάδοσης. Ως προς την κλίση, δηλαδή την αλλαγή στο μέγεθος, παρατηρούμε πως οι μεγάλες διαφορές στην χρήση RIS αρχίζουν και φαίνονται όταν έχουμε 50 στοιχεία και άνω. Σαν ένα γενικότερο συμπέρασμα, όπως το περιμέναμε εξάλλου από τις προηγούμενες γραφικές παραστάσεις, είναι πως η αύξηση των στοιχείων του RIS αυξάνει και τη συνολική ικανοποίηση του μοντέλου. Φυσικά, αυτό κάτω από τα εκάστοτε constraints που έχουμε ορίσει. Κλείνοντας, ως προς την ολότητα του συστήματος, ο αριθμός των στοιχείων του RIS είναι αυτός που κρίνει την συνολική ικανοποίηση, άρα θα πρέπει να δοθεί η δέουσα προσοχή στον αριθμό αυτό προς βελτιστοποίηση της διάταξης.

6.2 Αξιολόγηση ως προς τη σύγκλιση της βελτιστοποίησης

Για τη βελτιστοποίηση, χρησιμοποιήσαμε μεταξύ άλλων, για την βελτιστοποίηση του Utility του "αρχηγού" και των "ακολουθών", τη μέθοδο minimize από τη βιβλιοθήκη scipy.optimize της Python. Σάν κριτήριο διακοπής της επαναληπτικής μεθόδου, ορίσαμε τη διαφορά των Utilities μεταξύ 2 επαναλήψεων, και σαν κατώφλι τοποθετήσαμε το 10^{-10} . Για λόγους πληρότητας, ως προς τη σύγκλιση εξετάσαμε και την περίπτωση όπου το RIS διαθέτει 1000 στοιχεία.



Σχήμα 6.5: Αριθμός επαναλήψεων προς σύγκλιση συναρτήσει του αριθμού των RIS στοιχείων.

Βλέπουμε πως, για δεδομένο κατώφλι, οι επαναλήψεις κατά μέσο όρο ανά RIS είναι σχετικά λίγες, ειδικά όσο κρατάμε λίγα στοιχεία. Προφανώς, αλλάζοντας το κατώφλι σύγκλισης αυτό αλλάζει, αλλά θεωρούμε πως το κατώφλι είναι ήδη αρκετά "αυστηρό".

Μέρος **III**

Επίλογος

Κεφάλαιο 7

Επίλογος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ασχοληθήκαμε με την εφαρμογή της θεωρίας παιγνίων, καθώς και αλγορίθμους βελτιστοποίησης και μηχανικής μάθησης, σε μία τηλεπικοινωνιακή τοπολογία ασύρματης ζεύξης. Θεωρήσαμε την ίδια τοπολογία ως ένα παίγνιο, στο οποίο κάθε χρήστης καλούνταν να μεγιστοποιήσει την ικανοποίηση του (Utility), σε συνδυασμό με το power allocation του κάθε χρήστη, αλλά και στην ολότητα της διάταξης. Σκοπός αυτής, η κατάληξη του παιγνίου σε Ισορροπία Nash. Χρησιμοποιήσαμε για τη βελτιστοποίηση παίγνια όπως Potential και Stackelberg, και μοντέλα Heuristic και Reinforcement Learning. Σε αυτή τη τοπολογία, είδαμε το πώς με τη βοήθεια των Reconfigurable Intelligent Systems μπορούμε να επηρεάσουμε τη σύγκλιση του παιγνίου και την συνολική απόδοση του, προς την ισορροπία Nash.

7.1 Συμπεράσματα

Πέρα από τα constraints που ορίζονται στο κάθε μοντέλο, και πρέπει να είναι σταθερά, ως προς αυτά τα constraints συμπεράναμε πως ο αριθμός των RIS στοιχείων (για λόγους σύγκρισης εξετάσαμε και το σενάριο απουσίας αυτού) είναι η βασική παράμετρος που ρυθμίζει τη συμπεριφορά της τοπολογίας-παιγνίου. Άλλη παράμετρος που μπορεί να επηρεάσει αυτή τη συμπεριφορά είναι η απόσταση των ζεύξεων σημείο προς σημείο από το RIS. Ως προς τη βελτιστοποίηση, συμπεράναμε πως μεγιστοποίηση της ικανοποίησης του χρήστη (Utility) δεν συνεπάγεται και μεγαλύτερη ισχύς, μάλιστα είδαμε πως συνέβη το αντίθετο στην ανάλυση μας, καθώς έτσι υπήρξε καλύτερη διαχείριση των πόρων της τοπολογίας. Με τη χρήση της θεωρίας παιγνίων, μετατράπηκε ένα πρόβλημα στο πεδίο των τηλεπικοινωνιών, σε μαθηματικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, και είδαμε πως μπορούμε με διάφορα παίγνια και αλγορίθμους να προσομοιώσουμε τέτοιες διατάξεις. Επιπλέον, οι προτεινόμενοι τρόποι είχαν ικανοποιητική σύγκλιση για πολύ μικρά κατώφλια.

7.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Προεκτάσεις σχετικά με την τοπολογία που μελετήθηκε θα μπορούσε να είναι η διαφορετική περιοχή στην οποία βρίσκονται οι χρήστες (π.χ. κυκλική περιοχή γύρω από μία ακτίνα), ή ακόμα και μελέτη της συμπεριφοράς του δικτύου ,παρουσία RIS όταν υπάρχουν διαλείψεις σε αυτό, ή οι χρήστες είναι εν κινήσει. Επιπλέον, θα ήταν ενδιαφέρουσα η εφαρ-

μογή της μελέτης σε κλειστό χώρο, σε διάφορες κλίμακες όπως ένα δωμάτιο σπιτιού, ή ένα μεγάλο πολυχώρο. Επιπλέον, μπορεί η βελτιστοποίηση να γίνει ως προς διαφορετικές μετρικές, όπως ο ρυθμός σφαλμάτων bit (BER), και ακόμη πιο συγκεκριμένα, η συμπεριφορά του δικτύου σε διάφορες διαμορφώσεις με μεταβλητά bits (δηλαδή QPSK, 16QAM, 64QAM κ.ο.κ.). Τέλος, μία ενδιαφέρουσα επέκταση θα ήταν η μελέτη της ασφάλειας των δεδομένων που μεταδίδονται μέσω RIS, καθώς με την πάροδο των χρόνων και την εποχή των δεδομένων, είναι καίριας σημασίας να εξασφαλίζεται η εμπιστευτικότητα, η αξιοπιστία και η ιδιωτικότητα των δεδομένων που μεταδίδονται μέσω τηλεπικοινωνιακών ζευξιών.

Παραρτήματα

Ψευδοκώδικας αλγορίθμου Reinforcement Learning

Κατάρχας, για τον αλγόριθμο θα ορίσουμε τις εξής μεταβλητές:

- agent i , ο οποίος είναι ο i -οστός πομπός.
- action of agent i , η οποία είναι η αρχική ισχύς του χρήστη. Για 4 χρήστες θεωρούμε τις ισχύεις $[P_{max}, \frac{P_{max}}{2}, \frac{P_{max}}{3}, \frac{P_{max}}{4}]$ σαν αρχικό διάνυσμα ισχύων του παιγνίου.
- action probability of agent i , Όπου είναι το διάνυσμα των πιθανοτήτων (ΡΕΦ) επιλογής κάθε ισχύος.
- reward, το utility του κάθε χρήστη.
- cost, το αρνητικό utility του κάθε χρήστη.
- iteration, ο αριθμός επανάληψης της διαδικασίας.

Ο αλγόριθμος είναι ο παρακάτω:

- iteration = 0
- $P_i = P_{max}$, iteration = 0 for each i , όπου επιλέγεται τυχαία μία ισχύς.
- $P_{r_i} = [1/4, 1/4, 1/4, 1/4]$, όπου το διάνυσμα πιθανοτήτων στη πρώτη επανάληψη θεωρούμε ότι το αρχικοποιούμε ισοπίθانا.
- while :
 - iteration +=1
 - Επιλέγεται πιθανοτικά μία ισχύς για κάθε χρήστη, και η επιλογή αυτή βασίζεται στο διάνυσμα action of agent που ορίσαμε παραπάνω, με δεδομένο το action που έχουν πράξει οι άλλοι χρήστες από τη προηγούμενη επανάληψη, Στη συνέχεια υπολογίζεται το κόστος (-Utility). Μετά απο αυτό, ο πίνακας action probability παίρνει νέες τιμές, ανάλογα με το formula που έχουμε επιλέξει. [23]
- Until the difference between two Utility Functions is less than a threshold ϵ , that we initialize.

Παράρτημα **B'**

Απόδειξη της σχέσης (5.18)

$$U_i(P_i, P_{-i}) - U_i(P'_i, P'_{-i}) = - \sum_{j \neq i} P_j G_{ij} - \sum_{j \neq i} P_i G_{j,i} - \left(- \sum_{j \neq i} P_j G_{i,j} - \sum_{j \neq i} P'_i G_{j,i} \right) \quad (B'.1)$$

$$\Phi_i(P_i, P_{-i}) - \Phi_i(P'_i, P'_{-i}) = \sum_{i=1}^{|U|} \left(-a \sum_{j \neq i} P_j G_{ij} - (1-a) \sum_{j \neq i} P_i G_{j,i} \right) - \sum_{i=1}^{|U|} \left(-a \sum_{j \neq i} P_j G_{ij} - (1-a) \sum_{j \neq i} P'_i G_{j,i} \right) \quad (B'.2)$$

Άρα η συνάρτηση Exact Potential είναι:

$$\Phi_i(P_i, P_{-i}) = -a \sum_{j \neq i} P_j G_{ij} - (1-a) \sum_{j \neq i} P_i G_{j,i} + \sum_{k=1, k \neq i}^{|U|} U_i \left(-a \sum_{j=1, j \neq k}^{|U|} P_j G_{kj} - (1-a) \sum_{j=1, j \neq k}^{|U|} P_k G_{j,k} \right) \quad (B'.3)$$

Οι πρώτοι 2 όροι της εξίσωσης αφορούν τον i -οστό χρήστη, επομένως θα συνεχίσουμε την εξίσωση με αυτόν τον συμβολισμό.

$$\Phi_i(P_i, P_{-i}) = (\text{iοσοσχρηστης}) + \sum_{k=1, k \neq i}^{|U|} \left[-a P_i G_{k,i} - a \sum_{j=1, j \neq i, j \neq k}^{|U|} P_j G_{kj} - (1-a) P_k G_{i,k} - (1-a) \sum_{j=1, j \neq i, j \neq k}^{|U|} P_k G_{j,k} \right] \quad (B'.4)$$

$$\begin{aligned} \Phi_i(P_i, P_{-i}) &= (\text{iοσοσχρηστης}) + \sum_{k=1, k \neq i}^{|U|} (-a P_i G_{k,i}) + \sum_{k=1, k \neq i}^{|U|} (-(1-a) P_k G_{i,k}) \\ &+ \sum_{k=1, k \neq i}^{|U|} \left[-a \sum_{j=1, j \neq i, j \neq k}^{|U|} P_j G_{ij} - (1-a) \sum_{j=1, j \neq i, j \neq k}^{|U|} P_k G_{j,k} \right] \end{aligned}$$

Ο τελευταίος όρος της εξίσωσης, όπως παρατηρούμε από τη μαθηματική εξίσωση, δεν περιλαμβάνει κανέναν όρο που να περιέχει κάποια στρατηγική του i -οστού χρήστη. Θα την θέσουμε ίση με $\mathcal{Q}(P_{-i})$.

Επομένως έχουμε:

$$\Phi(P_i, P_{-i}) = -a \sum_{j=1, j \neq i}^{|U|} P_j G_{i,j} - (1-a) \sum_{j=1, j \neq i}^{|U|} P_i G_{j,i} - a \sum_{j=1, j \neq i}^{|U|} P_i G_{k,i} - (1-a) \sum_{j=1, j \neq i}^{|U|} P_k G_{i,k} + \mathcal{Q}(P_{-i}). \quad (\text{B'.5})$$

Αντικαθιστούμε το k με το j και προκύπτει:

$$\Phi(P_i, P_{-i}) = -a \sum_{j=1, j \neq i}^{|U|} P_j G_{i,j} - (1-a) \sum_{j=1, j \neq i}^{|U|} P_i G_{j,i} - a \sum_{j=1, j \neq i}^{|U|} P_i G_{j,i} - (1-a) \sum_{j=1, j \neq i}^{|U|} P_j G_{i,j} + \mathcal{Q}(P_{-i}). \quad (\text{B'.6})$$

$$\Phi(P_i, P_{-i}) = -(a + (1-a)) \sum_{j=1, j \neq i}^{|U|} P_j G_{i,j} - ((1-a) + a) \sum_{j=1, j \neq i}^{|U|} P_j G_{i,j} + \mathcal{Q}(P_{-i}) \quad (\text{B'.7})$$

$$\Phi(P_i, P_{-i}) = - \sum_{j=1, j \neq i}^{|U|} P_j G_{i,j} - \sum_{j=1, j \neq i}^{|U|} P_i G_{j,i} + \mathcal{Q}(P_{-i}) \quad (\text{B'.8})$$

Αν ο χρήστης i αλλάξει τη στρατηγική του από P_i σε P'_i τότε προκύπτει

$$\Phi(P'_i, P_{-i}) = - \sum_{j=1, j \neq i}^{|U|} P_j G_{i,j} - \sum_{j=1, j \neq i}^{|U|} P'_i G_{j,i} + \mathcal{Q}(P_{-i}) \quad (\text{B'.9})$$

Επομένως προκύπτει η ζητούμενη σχέση:

$$U_i(P_i, P_{-i}) - U_i(P'_i, P_{-i}) = \Phi(P_i, P_{-i}) - \Phi(P'_i, P_{-i}) \quad (\text{B'.10})$$

Βιβλιογραφία

- [1] E. E. Tsiropoulou M. Diamanti, P. Charatsaris και S. Papavassiliou. *The Prospect of Reconfigurable Intelligent Surfaces in Integrated Access and Backhaul Networks*. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 6(2):859–872, June 2022.
- [2] *LOS vs NLOS | Difference between LOS and NLOS wireless channels*. <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/LOS-vs-NLOS-wireless-channel.html>.
- [3] M. Eissa D. Sukhanov. *MANIPULATING LOS AND NLOS MIMO PROPAGATION ENVIRONMENTS USING PASSIVE REPEATERS*. 2021.
- [4] *HF Propagation: Ionospheric Radio Propagation*. <https://www.semanticscholar.org/paper/MANIPULATING-LOS-AND-NLOS-MIMO-PROPAGATION-USING-Sukhanov-Eissa/9724601a7d8ce1d292f845d8b72e702cfb710df3>.
- [5] Erik G. Larsson Emil Björnson, Özgecan Özdoğan. *Reconfigurable Intelligent Surfaces : Three Myths and Two Critical Questions*.
- [6] Ageliki Tsioliaridou Andreas Pitsillides Sotiris Ioannidis Christos Liaskos, Shuai Nie και Ian Akyildiz. *A New Wireless Communication Paradigm through Software-Controlled Metasurfaces*.
- [7] Yiyang Ni; Yaxuan Liu; Jue Wang; Qin Wang; Haitao Zhao; Hongbo Zhu. *Performance Analysis for RIS-Assisted D2D Communication Under Nakagami-m Fading*. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(6):74,80, Φεβ.2014.
- [8] Randall A. Berry και Ramesh Johari. *Economic Modeling in Networking: A Primer*. *Foundations and Trends in Networkings*, 6(3):171–187, 2011.
- [9] Matthew Rabin. *The American Economic Review*,, τόμος 83. 1993.
- [10] Brad Hooker. *The Cambridge Companion to Utilitarianism*. Cambridge University Press, Shaftesbury Road Cambridge CB2 8EA Massachusetts, 2014.
- [11] Multiagent Systems Course Project Report. *Potential Games: Theory and Application in Wireless Networks*. 2008.
- [12] B.von Stengel και S. Zamir. *Leadership with commitment to mixed strategies*. *Tech. Rep. LSE-CDAM-2004-01*, CDM Research Report, 2004.

- [13] Agnieszka Jakóbiak Andrzej Wilczyński και Joanna Kołodziej. *Stackelberg Security Games: Models, Applications and Computational Aspects*.
- [14] Quan Wang Deyu Lin και Pengfei Yang. *The Game Theory: Applications in the Wireless Networks*. InTechOpen, 2018.
- [15] *Line-of-sight Propagation*. <https://technav.ieee.org/topic/line-of-sight-propagation>.
- [16] A. Tsioliaridou A. Pitsillides S. Ioannidis Liaskos, S. Nie και I. Akyildiz. *A new wireless communication paradigm through software controlled metasurfaces*. *IEEE Commun. Mag.*, 56(9):162,169, 2018.
- [17] O. Tsilipakos et al. *Toward intelligent metasurfaces: The progress from globally tunable metasurfaces to software-defined metasurfaces with an embedded network of controllers*. *Advanced Optical Materials*, 2020.
- [18] A. Lozano T. L. Marzetta F. Boccardi, R. W. Heath και P. Popovski. *Five disruptive technology directions for 5G*. *IEEE Commun. Mag*, 52(2).
- [19] H. Haas M. Di Renzo και P. M. Grant. *Spatial modulation for multiple antenna wireless systems: A survey*. *IEEE Commun. Mag.*, 12:182,191, Δεσ.2011.
- [20] W. Tanget et al. *Programmable metasurface-based RF chain-free 8PSK wireless transmitter*. *Electron. Lett*, 55:417,420, Απρ.2019.
- [21] L. Y. Song H. L. Zhang, B. Y. Di και Z. Han. *Reconfigurable intelligent surfaces assisted communications with limited phase shifts: How many phase shifts are enough*. *IEEE Trans. Veh. Tech.*, 69(4):4498,4502, Απρ.2020.
- [22] *What is Reinforcement Learning?* <https://www.synopsys.com/ai/what-is-reinforcement-learning.html>.
- [23] E.E.Tsiropoulou G.Fragkos και S.Papavasiliou. *Disaster Management and Information Transmission Decision-making in Public Safety Systems*.

Συντομογραφίες - Αρκτικόλεξα - Ακρωνύμια

κ.λ.π.	και λοιπά
κ.ο.κ	και ούτω καθεξής
QoS	Quality Of Service
D2D	Device to Device
RIS	Reconfigurable Intelligent Systems
LOS	Line Of Sight
NLOS	Non Line Of Sight
WLAN	Wireless Local Area Network
P2P	Point to Point
5G	Fifth Generation
BER	Bit Error Rate
SNR	Signal to Noise Ratio
SINR	Signal to Inference plus Noise Ratio

Απόδοση ξενόγλωσσων όρων

Απόδοση

ορόσημο
ποιότητα υπηρεσίας
συσκευή προς συσκευή
επαναπρογραμματιζόμενες έξυπνες επιφάνειες
δυναμικά παίγνια
καθοδική κλίση
ενισχυτική μάθηση
ευρετικό μοντέλο
οπτική επαφή
μη οπτική επαφή
θεωρία παιγνίων
ευημερία
χρησιμότητα
ανάλυση
συνάρτηση
ελαστική κίνηση
ανελαστική κίνηση
λήψεις κοινής χρήσης αρχείων
παρετο-βελτιστοποίηση
δικαιοσύνη
ωφελιμιστικό
αναλογικό
καλύτερη απόκριση
κυρτό
κοίλο
στρατηγική κανονική μορφή
εξόφληση
διαδικασία εκμάθησης
ακριβές δυναμικό παίγνιο
ψευδο-δυναμικό παίγνιο
συνήθες δυναμικό παίγνιο
σταθμισμένο δυναμικό παίγνιο
επί τούτω
σημείο προς σημείο

Ξενόγλωσσος όρος

milestone
quality of service
device to device
reconfigurable intelligent surfaces
potential games
gradient descent
reinforcement learning
heuristic model
line of sight
non line of sight
game theory
welfare
utility
analysis
function
elastic traffic
inelastic traffic
filesharing downloads
pareto-optimality
fairness
utilitarian
proportional
best response
concave
convex
strategical normal form
payoff
learning process
exact potential game
pseudo-potential game
ordinal potential game
weighted potential game
ad hoc
point to point

ενίσχυση	gain
διάδοση σε ιονόσφαιρα	ionospheric propagation
διάδοση κύματος μέσω εδάφους	ground wave propagation
ακτινοβολώντας	beaming
διαμόρφωση	configuration
διασκορπιστής	scatterer
πίνακας	panel
πολλαπλή διανομή	multicast
εκπομπή	broadcast
ρυθμός σφάλματος βιτ	bit error rate
σηματοθορυβικός λόγος	signal to noise ratio
ανερχόμενη ζεύξη	uplink
απώλειες μεγάλης κλίμακας	large scale path loss
ενίσχυση καναλιού	channel gain