



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ολοκληρωμένη Πρόσβαση σε Δίκτυα 6^{ης} Γενιάς
με Προγραμματιζόμενες Έξυπνες Επιφάνειες

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ ΧΑΡΑΤΣΑΡΗ

Επιβλέπων: Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2021



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής

Ολοκληρωμένη Πρόσβαση σε Δίκτυα 6^{ης} Γενιάς με Προγραμματιζόμενες Έξυπνες Επιφάνειες

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ ΧΑΡΑΤΣΑΡΗ

Επιβλέπων: Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 22η Ιουνίου 2021.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

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

.....
Θεοδώρα Βαρβαρίγου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννα Ρουσσάκη
Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2021



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής

Copyright ©–All rights reserved Παναγιώτης Χαρατσάρης, 2021.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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.

(Υπογραφή)

.....
ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΧΑΡΑΤΣΑΡΗΣ

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

© 2021– All rights reserved

Η τεχνολογία των δικτύων ολοκληρωμένης πρόσβασης (Integrated Access and Backhaul-IAB), προσφέρει μια νέα οπτική στα προβλήματα που αφορούν το οπισθοζευκτικό δίκτυο (backhaul), ειδικά όταν ο στόχος είναι η παροχή υπηρεσιών από άκρο σε άκρο. Κάνοντας χρήση και των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (Unmanned Aerial Vehicles -UAVs), όταν συνδυαστεί με την τεχνολογία των Προγραμματιζόμενων Έξυπνων Επιφανειών (Reconfigurable Intelligent Surfaces - RIS), προσφέρει στα δίκτυα νέας γενιάς τα χαρακτηριστικά της αναδιαμόρφωσης και ενεργειακής αποδοτικότητας.

Στην παρούσα διπλωματική, θα παρουσιαστεί η προοπτική του RIS σε ένα δίκτυο IAB υποβοηθούμενο από UAV που στοχεύει στην ενεργειακά αποδοτική του λειτουργία, λαμβάνοντας υπόψιν τις μεταδόσεις που πραγματοποιούνται τόσο στο τμήμα της πρόσβασης όσο και στο οπισθοζευκτικό δίκτυο. Θα εισαχθεί ένα δυναμικό πλαίσιο διαχείρισης πόρων που στοχεύει στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης από άκρο σε άκρο, θεωρώντας ως ελεγχόμενες παραμέτρους τις αλλαγές φάσης των στοιχείων του RIS, την αναλογία διαχωρισμού εύρους ζώνης ανάμεσα στην πρόσβαση και το backhaul και την ισχύ μετάδοσης των χρηστών και του UAV. Το αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης μοντελοποιείται και αντιμετωπίζεται μέσω μιας θεωρητικής προσέγγισης που βασίζεται σε ένα κατανεμημένο παίγνιο Stackelberg μοναδικού ηγέτη και πολλαπλών ακολούθων. Παράλληλα, παρουσιάζεται η προσαρμογή του πλαισίου για τη βελτιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης του δικτύου από άκρο σε άκρο.

Η αξιολόγηση της απόδοσης του προτεινόμενου πλαισίου θα αναδείξει τα οφέλη που προσφέρονται στην ενεργειακή απόδοση τόσο των χρηστών όσο και του UAV λόγω των τεχνολογιών των IAB και RIS.

Λέξεις Κλειδιά

Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα, Προγραμματιζόμενες Έξυπνες Επιφάνειες, Δίκτυα Ολοκληρωμένης Πρόσβασης, Θεωρία Παιγνίων, Δίκτυα 6^{ης} γενιάς, Μη-Ορθογώνιο Μοντέλο Πολλαπλής Πρόσβασης, Ενεργειακή Απόδοση

Abstract

The Integrated Access and Backhaul (IAB) technology provides a new view of the backhauling problem, especially when targeting the end-to-end service provisioning. The IAB paradigm - being well aligned with the vision of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) - when combined with the benefits of the Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) technology, offers the attributes of reconfigurability and energy efficiency to the future wireless networks.

In this thesis, we demonstrate the prospect of RIS in an UAV-assisted IAB network targeting the energy-efficient operation, while accounting for the transmissions established in both the wireless access and backhaul network parts. We introduce a dynamic resource management framework that targets the end-to-end energy efficiency optimization, while considering the RIS elements' phase shifts, the system bandwidth split between access and backhaul, and the transmission power levels of both the UAV and the users, as controllable parameters. The corresponding joint optimization problem is formulated and treated via a distributed single-leader multiple-followers Stackelberg game theoretic approach. The adaptation of the proposed framework is also demonstrated for the treatment of the IAB network's end-to-end data rate optimization.

The framework's performance evaluation highlights the benefits achieved in both the users' and UAV's energy efficiency, by the joint exploitation of the IAB and RIS technologies.

Keywords

Unmanned Aerial Vehicles, Reconfigurable Intelligent Surfaces, Integrated Access and Backhaul Networks, Game Theory, 6G Networks, Non-Orthogonal Multiple Access, Energy-Efficiency

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του καθηγητή του ΕΜΠ, κ. Συμεών Παπαβασιλείου τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω για την ανάθεση ενός πραγματικά ενδιαφέροντος θέματος και την υποστήριξη του κατά την διάρκεια της εκπόνησης της. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επίκουρη καθηγήτρια του University of New Mexico (USA), κυρία Ειρήνη-Ελένη Τσιροπούλου και την υποψήφια διδάκτορα Μαρία Διαμαντή για την άριστη συνεργασία και την καθοδήγηση. Η συμβολή τους τους ήταν καθοριστική για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Με αφορμή την ολοκλήρωση των σπουδών μου, θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τους φίλους μου με τους οποίους μοιράστηκα τα φοιτητικά μου χρόνια στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου που με υποστήριξε και μου συμπαράσταθη καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη	1
Abstract	3
Ευχαριστίες	5
Περιεχόμενα	8
Κατάλογος Σχημάτων	9
1 Εισαγωγή	11
1.1 Πρόλογος	11
1.2 Σχετική Έρευνα	12
1.3 Διάρθρωση της Διπλωματικής Εργασίας	13
2 Θεωρητικό Υπόβαθρο	15
2.1 Εισαγωγή	15
2.2 Integrated Access and Backhaul (IAB)	15
2.2.1 Αρχιτεκτονική	16
2.2.2 Δίκτυα Ολοκληρωμένης Πρόσβασης Υποβοηθούμενα από Μη-Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (UAVs)	17
2.3 Προγραμματιζόμενες Έξυπνες Επιφάνειες (RIS)	18
2.3.1 Αρχιτεκτονική	19
2.3.2 Περιπτώσεις χρήσης (Use Cases)	20
2.3.3 Προκλήσεις και Μελλοντικές Έρευνες	21
2.4 Βασικές Έννοιες Θεωρίας Παιγνίων	22
2.4.1 Παίγνια σε Κανονική Μορφή Αναπαράστασης	23
2.4.2 Ισορροπία Nash	23

2.4.3	Μοντέλο Stackelberg	24
2.4.4	Κοίλα Παίγνια (Concave Games)	26
3	Μοντελοποίηση Προβλήματος	27
3.1	Περιγραφή Συστήματος Μοντελοποίησης	27
3.2	Μοντέλο Απωλειών Διαδρομής (Path-Loss)	28
3.2.1	Πρώτο Επίπεδο Επικοινωνίας	29
3.2.2	Δεύτερο Επίπεδο Επικοινωνίας	30
3.3	Επικοινωνιακό Μοντέλο	31
4	Περιγραφή Προβλήματος και Αλγορίθμου Επίλυσης	33
4.1	Βελτιστοποίηση Ενεργειακής Απόδοσης Συστήματος	33
4.1.1	Σχεδιασμός Πλαισίου Επίλυσης	33
4.1.2	Προσαρμογή Γωνιών Αλλαγής Φάσης RIS	35
4.1.3	Βελτιστοποίηση Ηγέτη (Leader)	37
4.1.4	Βελτιστοποίηση Ακολούθων (Followers)	40
4.2	Βελτιστοποίηση Ρυθμού Μετάδοσης Συστήματος	43
5	Αξιολόγηση Αλγορίθμου και Αριθμητικά Αποτελέσματα	45
5.1	Εισαγωγή	45
5.2	Παράμετροι Προσομοίωσης	45
5.3	Καθαρή Αξιολόγηση Διαδικασίας Βελτιστοποίησης	46
5.4	Συγκριτική Αξιολόγηση Διαφορετικών Στόχων Βελτιστοποίησης	48
5.5	Αξιολόγηση της Δυναμικής Διαχείρισης Φάσματος	49
5.6	Αξιολόγηση Προτεινόμενης Προσαρμογής Αλλαγής Φάσης Στοιχείων του RIS	50
6	Σύνοψη - Συμπεράσματα	53
6.1	Σύνοψη	53
6.2	Συμπεράσματα	53
6.3	Μελλοντική Έρευνα	54
	Βιβλιογραφία	55
	Γλωσσάριο	63

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Απεικόνιση απλού Δικτύου Integrated Access and Backhaul (IAB) [Mad+20]	16
2.2	Αρχιτεκτονική Δικτύων Integrated Access and Backhaul (IAB) [Pol+20]	17
2.3	Δίκτυο IAB Υποβοηθούμενο από UAVs [PFI19]	17
2.4	Απλό Δίκτυο με RIS [BÖL20a]	18
2.5	Διαφορετικές Υλοποιήσεις RIS	20
3.1	Δίκτυο Ολοκληρωμένης Πρόσβασης (IAB) υποβοηθούμενο από UAV και υποστήριξη RIS	28
4.1	Πλαίσιο Διαχείρισης Πόρων του Δικτύου Από-Άκρο-Σε-Άκρο	34
5.1	Αξιολόγηση της απόδοσης και της συμπεριφοράς σύγκλισης του αλγορίθμου ως προς την ισχύ των χρηστών για διαφορετικό πλήθος στοιχείων του RIS	47
5.2	Αξιολόγηση της απόδοσης και της συμπεριφοράς σύγκλισης του αλγορίθμου ως προς την ενεργειακή απόδοση των χρηστών για διαφορετικό πλήθος στοιχείων του RIS	47
5.3	Συγκριτική Αξιολόγηση μεταξύ των δύο στόχων βελτιστοποίησης για διαφορετικές απαιτήσεις ελάχιστου ρυθμού μετάδοσης των χρηστών.	48
5.4	Συγκριτική Αξιολόγηση μεταξύ της προτεινόμενης δυναμικής λύσης διαχωρισμού φάσματος και προσεγγίσεις σταθερού διαχωρισμού.	50
5.5	Συγκριτική Αξιολόγηση μεταξύ της προτεινόμενης προσαρμογής της αλλαγής φάσης των στοιχείων του RIS και τυχαίων διαμορφώσεων των γωνιών, για διαφορετικά πλήθη στοιχείων του RIS και διαφορετικές αποστάσεις των χρηστών από το UAV.	51

1.1 Πρόλογος

Τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAVs) αναμένεται να φέρουν επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιούνται οι ασύρματες επικοινωνίες. Παρέχοντας υπηρεσίες επικοινωνίας κατά απαίτηση, τα UAVs συμβάλουν στην διατήρηση της βιωσιμότητας του δικτύου σε περιπτώσεις που η υποκείμενη υποδομή δικτύου αποδεικνύεται περιορισμένη [VTP19b]. Πρόσφατα, οι προσπάθειες της ερευνητικής κοινότητας και των φορέων τυποποίησης αποκάλυψαν πολλές ευκαιρίες (που επιτράπηκαν χάρις τις αναπτυσσόμενες τεχνολογίες) οι οποίες θα οδηγήσουν σταδιακά στην ωρίμανση των επικοινωνιών που υποστηρίζονται από τα UAVs. Χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας τέτοιας τεχνολογίας είναι τα δίκτυα ολοκληρωμένης πρόσβασης (Integrated Access and Backhaul - IAB). Πιο συγκεκριμένα, η τεχνική αυτή προτείνει οι βάσεις κόμβων επόμενης γενιάς (gNBs), που αναφέρονται και ως κόμβοι του IAB (IAB nodes), να μεταδίδουν ασύρματα την κυκλοφορία μεταξύ τους με πολλαπλά βήματα ώστε να φτάσει τελικά στον IAB δότη (IAB donor), ο οποίος είναι συνδεδεμένος με το Διαδίκτυο μέσω υποδομής οπτικών ινών [3GP18]. Λόγω της εξέλιξης της αρχιτεκτονικής των δικτύων και της χρήσης ενός ευρύτερου φάσματος συχνοτήτων είναι πλέον δυνατή η χρήση της 5G NR (Νέα Ραδιοεπικοινωνία) για μια ασύρματη σύνδεση μιας κεντρικής τοποθεσίας (όπως ενός σταθμού βάσης) με ένα κατανομημένο σημείο (όπως ένα UAV). Με αυτόν τον τρόπο αντιμετωπίζονται οι εγγενείς προκλήσεις των UAVs σχετικά με την συνδεσιμότητα τους στο κεντρικό δίκτυο.

Στηριζόμενοι στην ιδέα και τις δυνατότητες των δικτύων IAB, μια άλλη ενδιαφέρουσα τεχνολογία που έχει πρόσφατα λάβει ιδιαίτερη προσοχή είναι οι Προγραμματιζόμενες Έξυπνες Επιφάνειες (Reconfigurable Intelligent Surfaces - RIS). Κατασκευάζονται από τεχνικά μετα-υλικά τα οποία χρησιμεύουν συνήθως ως ανακλαστήρες. Το RIS επιτρέπει μέσω λογισμικού τον έλεγχο των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων του ανακλώμενου σήματος [Gon+20b]. Ως εκ τούτου με τον κατάλληλο χειρισμό των ανακλώμενων σημάτων, το RIS αναμένεται να βελτιώσει την συνολική ισχύ του σήματος που λαμβάνεται και την ενεργειακή απόδοση των επικοινωνιών. Αξιοποιώντας τα κοινά οφέλη των υποδομών δικτύων που υποστηρίζονται από το IAB και το RIS στόχος της διπλωματικής είναι να σχεδιάσουμε και να προτείνουμε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο δυναμικής διαχείρισης φάσματος και βελτιστοποίησης της ενεργειακής

απόδοσης από άκρο σε άκρο, το οποίο θα είναι προσαρμοσμένο στις μελλοντικές επικοινωνίες που υποβοηθούνται από τα UAVs. Για το σκοπό αυτό επεξεργαζόμαστε από κοινού τις αλλαγές φάσης των στοιχείων του RIS, το διαχωρισμό του εύρους ζώνης μεταξύ της ασύρματης πρόσβασης (Wireless Access) και του οπισθοζευκτικού δικτύου (Wireless Backhaul) καθώς και την ισχύ μετάδοσης των χρηστών και του UAV.

1.2 Σχετική Έρευνα

Η τεχνική των IAB δικτύων είναι πολύ πρόσφατη, ωστόσο υπάρχουν ήδη στην βιβλιογραφία ερευνητικά έργα που ασχολούνται με προβλήματα κατανομής πόρων σε αυτό το πλαίσιο. Στο [LWS20], περιγράφεται ένα IAB δίκτυο πολλαπλών βημάτων το οποίο λειτουργεί με το συνδυασμό πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης χρόνου (TDMA) και συχνότητας (FDMA) συντονίζοντας μεταδόσεις κατά μήκος των διαφορετικών ασυρμάτων συνδέσεων. Το πρόβλημα της κατανομής ισχύος διατυπώνεται με τρόπο ώστε να μεγιστοποιείται η απόδοση του συστήματος, ενώ παρουσιάζονται στοιχεία σχετικά με την βέλτιστη τοποθέτηση των κόμβων στο δίκτυο και την συσχέτιση των χρηστών. Μέσω μιας παρόμοιας τοπολογίας με πολλαπλούς κόμβους IAB, στο [LYX20] αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της εκχώρησης φάσματος στους διαφορετικούς κόμβους μέσω μιας προσέγγισης βαθιάς ενισχυτικής μάθησης ενώ ταυτόχρονα επιδιώκεται η μεγιστοποίηση του αθροίσματος της απόδοσης των χρηστών. Μεταβαίνοντας από τις επίγειες υποδομές δικτύων στην υποσχόμενη ενσωμάτωση των UAVs στην τεχνική του IAB, στο [Taf+20] αναλύονται διαφορετικές προκλήσεις και εκτιμήσεις πίσω από την ιδέα των επικοινωνιών σε συχνότητες μικροκυμάτων (mmWave) που βασίζονται στα UAVs ενώ ερευνάτε η επίδραση της κινητικότητας των χρηστών και των UAVs στην απόδοση του δικτύου. Άλλες έρευνες που ασχολούνται με δίκτυα υποβοηθούμενα από UAV στο backhaul βρίσκονται στα [You+20; ZA20]. Στο πρώτο, το κοινό πρόβλημα της τρισδιάστατης τοποθέτησης UAV, της εκχώρησης υποζώνης στο backhaul και της κατανομής ισχύος στο κατέβασμα μοντελοποιείται έτσι ώστε η ισχύς μετάδοσης των UAVs να ελαχιστοποιηθεί λαμβάνοντας υπόψιν ταυτόχρονα τις προϋποθέσεις των υπηρεσιών ποιότητας των χρηστών (QoS). Από την άλλη πλευρά στο [ZA20], με επικοινωνία ανερχόμενης ζεύξης (uplink) επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος μέσω της συσχέτισης των χρηστών και της εκχώρησης ισχύος και εύρους ζώνης.

Για την περαιτέρω ενίσχυση της ενεργειακής και φασματικής απόδοσης των δικτύων 5^{ης} και μελλοντικών γενεών έχει δοθεί σημαντική προσοχή στην ενσωμάτωση του RIS σε μια πληθώρα διαφορετικών σεναρίων επικοινωνίας. Τα αρχικά έργα, όπως τα [ZWZ20; Guo+20], επικεντρώθηκαν σε απλές περιπτώσεις χρήσης και εξέτασαν από κοινού τα προβλήματα του ελέγχου ισχύος και της βελτιστοποίησης της γωνίας των στοιχείων του RIS. Και στα δύο συγκρίνεται το κέρδος απόδοσης του RIS με διαφορετικές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης ενώ στοχεύουν αντίστοιχα στην ελαχιστοποίηση της ισχύος των χρηστών και την μεγιστοποίηση του ρυθμού δεδομένων. Παρόμοια προβλήματα έχουν διατυπωθεί για πιο σύνθετες υποδομές όπως το δίκτυο πολλαπλών εισόδων και μονής εξόδου (MISO) Μη-Ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (NOMA) στο [Gao+20].

Τέλος έχει μελετηθεί και η ισχύς σε δίκτυα που υποβοηθούνται τόσο από RIS όσο και από UAVs. Στο [Wei+20], εξετάζεται η ανάπτυξη ενός RIS στα όρια μιας περιοχής που εξυπηρετείται από ένα UAV ενώ η κατανομή των πόρων στους χρήστες όπως και η βελτιστοποίηση της τροχιάς του UAV έχει σχεδιαστεί κατάλληλα για να επωφεληθεί από την ύπαρξη του RIS. Αντίθετα, το σενάριο ενός RIS που είναι τοποθετημένο σε ένα UAV ώστε να διατηρηθεί η άμεση οπτική (LOS) επικοινωνία σε συχνότητες μικροκυμάτων μελετάται στο [ZSB20] ενώ ταυτόχρονα σχεδιάζεται μια κοινή κατανομή πόρων και το πρόβλημα κινητικότητας των UAVs. Ωστόσο, από όσα γνωρίζουμε, δεν υπάρχει καμία έρευνα στην τρέχουσα βιβλιογραφία που να προσδιορίζει την προοπτική των RIS σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που λαμβάνει υπόψη του το backhaul, όπως αυτά που αφορούν την περίπτωση του IAB.

1.3 Διάρθρωση της Διπλωματικής Εργασίας

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο ώστε ο αναγνώστης να εισαχθεί στο περιβάλλον του προβλήματος που αφορά η εργασία. Συγκεκριμένα περιγράφονται σύντομα οι βασικές έννοιες των δικτύων ολοκληρωμένης πρόσβασης (IAB), των Προγραμματιζόμενων Έξυπνων Επιφανειών (RIS) καθώς και της θεωρίας παιγνίων που θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του προβλήματος. Στο τρίτο κεφαλαίο παρουσιάζεται το σύστημα επικοινωνίας που θα μελετηθεί στην συνέχεια καθώς και η πλήρης μοντελοποίηση του. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης και παρουσιάζεται αναλυτικά το αλγοριθμικό πλαίσιο που το επιλύει. Στο πέμπτο κεφάλαιο παραθέτουμε τα αριθμητικά αποτελέσματα που λαμβάνουμε από αυτό. Τα τελικά συμπεράσματα συνοψίζονται στο έκτο κεφάλαιο.

2.1 Εισαγωγή

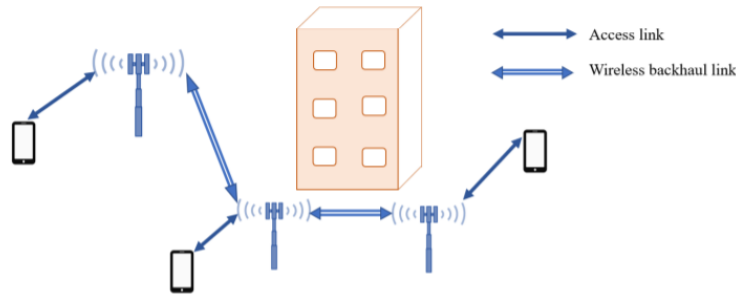
Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται ορισμένες βασικές έννοιες για τις τεχνολογίες των IAB και RIS. Παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική τους καθώς και οι λειτουργίες που προσφέρουν στα ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς. Επιπλέον, θα γίνει μια σύντομη εισαγωγή στην Θεωρία Παιγνίων, και πιο ειδικά στο μοντέλο Stackelberg, που θα χρησιμοποιηθεί στην συνέχεια για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης.

2.2 Integrated Access and Backhaul (IAB)

Τα επόμενα χρόνια αναμένεται μια απότομη αύξηση τόσο του πλήθους των συσκευών που συνδέονται στο Διαδίκτυο μέσω ασύρματης πρόσβασης όσο και της κίνησης σε αυτό. Για να μπορέσουν να ικανοποιηθούν όλες αυτές οι επιπλέον απαιτήσεις τα ασύρματα δίκτυα 5^{ης} γενιάς προτείνουν διάφορους τρόπους για φασματική απόδοση και βελτίωση στην χωρητικότητα του δικτύου. Η πυκνωση του δικτύου αποτελεί μία από τις καλύτερες εναλλακτικές και μπορεί να επιτευχθεί μέσω της ανάπτυξης πολλαπλών σημείων πρόσβασης. Οι νέοι σταθμοί βάσης μπορούν να συνδέονται στο κεντρικό δίκτυο είτε ενσύρματα μέσω οπτικής ίνας είτε ασύρματα. Η ενσύρματη σύνδεση προσφέρει αξιόπιστη μεταφορά υψηλής χωρητικότητας και εξασφαλισμένης ταχύτητας ωστόσο απαιτεί μια σημαντική αρχική επένδυση, η οποία μπορεί να χρειαστεί μεγάλο χρόνο εγκατάστασης ή ακόμη και να μην είναι δυνατή σε ορισμένες περιοχές [Mad+20]. Το IAB (Σχήμα 2.1), από την άλλη πλευρά, αποτελεί μια οικονομικά συμφέρουσα εναλλακτική λύση [Pol+20].

Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στην αποκλειστική χρήση ασυρμάτων συνδέσεων όχι μόνο στο κομμάτι της πρόσβασης αλλά και στο πίσω μέρος του δικτύου. Η χρήση της ασύρματης τεχνολογίας για τις συνδέσεις του backhaul χρησιμοποιείται ήδη εδώ και αρκετά χρόνια. Ωστόσο, αυτή βασίστηκε κυρίως σε τεχνολογίες ραδιοεπικοινωνιών διαφορετικές από αυτές που χρησιμοποιούνται στους συνδέσμους της πρόσβασης [Mad+20]. Το IAB προβλέπει σε μια προηγμένη και ευέλικτη λύση με πολλαπλά βήματα επικοινωνίας, δυναμική πολυπλεξία πόρων και λιγότερο πολύπλοκη ανάπτυξη [Pol+20]. Επιπλέον, η συγκεκριμένη διάταξη προσφέρει

Σχήμα 2.1: Απεικόνιση απλού Δικτύου Integrated Access and Backhaul (IAB) [Mad+20]



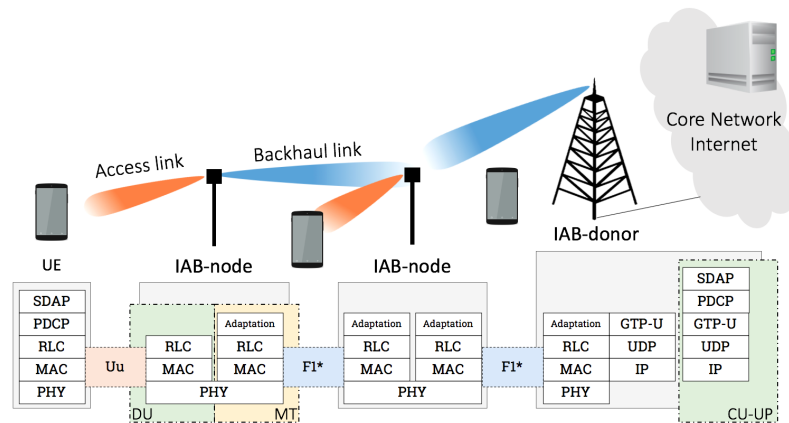
δικαιοσύνη για χρήστες με χειρότερο εξοπλισμό (που διαφορετικά θα είχαν μια αδύναμη σύνδεση) συνδέοντας τους με τον κατάλληλο κόμβο ενώ σε περιπτώσεις που το δίκτυο δεν δέχεται ιδιαίτερα μεγάλη πίεση η απόδοση του είναι σχεδόν ίδια με την περίπτωση του ενσύρματου backhaul [Pol+20].

2.2.1 Αρχιτεκτονική

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας του IAB προτάθηκαν διαφορετικές διαμορφώσεις για την αρχιτεκτονική που θα ακολουθηθεί, με διάφορα επίπεδα αποκέντρωσης και λειτουργίες για το backhaul. Αυτή που τελικά επιλέχθηκε (Σχήμα 2.2) βασίζεται στην εξής λογική:

Οι κόμβοι του IAB (IAB nodes) χρησιμοποιούν ασύρματο backhaul ενώ οι IAB δότες (IAB donors) συνδέονται με το κεντρικό δίκτυο μέσω οπτικής ίνας. Τόσο οι κόμβοι όσο και οι δότες εξυπηρετούν συσκευές που συνδέονται στο δίκτυο αλλά και άλλους κόμβους. Η επιλογή αυτή προσφέρει την μικρότερη δυνατή επίδραση στο κεντρικό δίκτυο και μικρή πολυπλοκότητα επεξεργασίας στην μετάδοση [Pol+20]. Ο κάθε κόμβος χωρίζεται σε ένα τερματικό (Mobile Termination - MT) και μία κατανεμημένη μονάδα (DU). Με το πρώτο πραγματοποιείται η ασύρματη σύνδεση στο backhaul με προηγούμενους κόμβους του δικτύου ή το δότη από τον οποίο ξεκινά η επικοινωνία. Η κατανεμημένη μονάδα έχει ακριβώς τον αντίθετο ρόλο. Πραγματοποιεί την σύνδεση με τον τελικό εξοπλισμό καθώς και τους υπόλοιπους κόμβους που ακολουθούν από την πλευρά των χρηστών. Οι δότες του IAB δικτύου μοιάζουν στην αρχιτεκτονική αρκετά με τους κόμβους του. Παρουσιάζουν ωστόσο δύο σημαντικές διαφορές. Αντί για το τερματικό περιλαμβάνουν μία κεντρική μονάδα (CU) ενώ οι κατανεμημένες μονάδες (DU) μπορεί να είναι πολλαπλές. Στην κεντρική μονάδα περιλαμβάνονται τα πρωτόκολλα υψηλότερου επιπέδου για τις συσκευές των χρηστών και γίνεται ο έλεγχος των κατανεμημένων μονάδων μέσω κατάλληλης διεπαφής. Στις κατανεμημένες, από την άλλη, φιλοξενούνται τα πρωτόκολλα χαμηλότερων επιπέδων για την σύνδεση του εξοπλισμού. Με τον διαχωρισμό αυτό που έχει επιλεγεί επιτρέπεται η αποδοτική υλοποίηση της επικοινωνίας πολλαπλών βημάτων (multihop) [Ron+21; Pol+20].

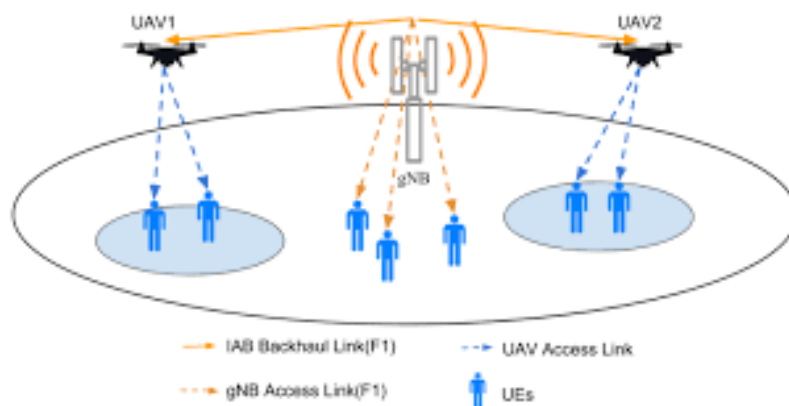
Σχήμα 2.2: Αρχιτεκτονική Δικτύων Integrated Access and Backhaul (IAB) [Pol+20]



2.2.2 Δίκτυα Ολοκληρωμένης Πρόσβασης Υποβοηθούμενα από Μη-Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (UAVs)

Τα τελευταία χρόνια, η υποστήριξη και η ενσωμάτωση μη-επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAVs) στα ασύρματα δίκτυα έχει λάβει σημαντικό βιομηχανικό ενδιαφέρον. Το 3GPP έχει ήδη ενσωματώσει τις σημαντικές δυνατότητες τους στην τυποποίηση των κινητών επικοινωνιών [Taf+19]. Στο πλαίσιο αυτό, έχει εισαχθεί και η χρήση τους στην τεχνολογία του IAB. Πιο συγκεκριμένα, τα UAVs ενσωματώνονται ως σταθμοί βάσης της επικοινωνίας, δηλαδή κόμβοι του IAB (Σχήμα 2.3).

Σχήμα 2.3: Δίκτυο IAB Υποβοηθούμενο από UAVs [PFI19]



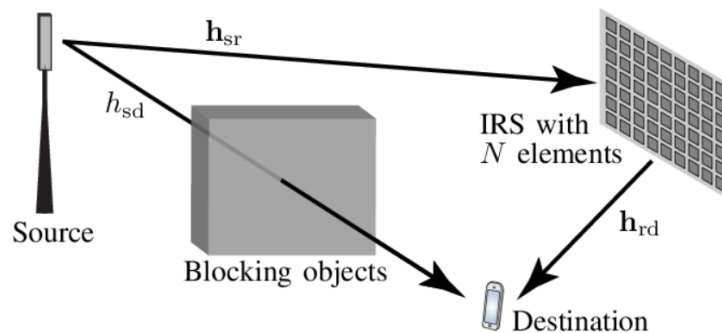
Η προσθήκη αυτή προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις στην κάλυψη, την συνδεσιμότητα αλλά και την χωρητικότητα του ασυρμάτου δικτύου. Εκτός αυτών, αποτελεί για τα δίκτυα νέας γενιάς (5G and beyond) μια δυναμική λύση για την μείωση τόσο του κόστους όσο και της κατανάλωσης ενέργειας. Από την μία πλευρά προσφέρουν την ευελιξία να ενσωματωθούν εύκολα στις κινητές επικοινωνίες ενώ από την άλλη πλευρά μπορούν να επιτύχουν μεταδόσεις με υψηλούς ρυθμούς αλλά και μικρότερες ανάγκες ισχύος λόγω των αποτελεσματικών δυνα-

τοτήτων τους στην άμεση οπτική (LOS) επικοινωνία [Fou+18]. Για να είναι δυνατή ωστόσο η πλήρης αξιοποίηση των UAVs συνεχίζεται από την επιστημονική κοινότητα η διερεύνηση τρόπων για την περαιτέρω υποστήριξη τους. Αυτή περιλαμβάνει εργασίες για την βελτίωση της απόδοσης της κινητικότητας τους, της ασφάλειας και των μεθόδων ταυτοποίησης των χρηστών [Taf+19].

2.3 Προγραμματιζόμενες Έξυπνες Επιφάνειες (RIS)

Τα ασύρματα κινητά δίκτυα επόμενης γενιάς θα βασίζονται αναπόφευκτα σε υψηλές συχνότητες μικροκυμάτων (mmWave) προκειμένου να καλυφθεί η αυξανόμενη ανάγκη χωρητικότητας στα δίκτυα. Ωστόσο, η επικοινωνία σε αυτές τις συχνότητες αντιμετωπίζει πολλές προκλήσεις [Van+20]. Μια από τις βασικές είναι η ευαισθησία των συνδέσμων λόγω των εμποδίων που δημιουργούνται από διάφορα αντικείμενα, όπως δέντρα και ανθρώπινα σώματα, τα οποία μπορούν να εξασθενίσουν τα σήματα επικοινωνίας και δυσχεραίνεται επομένως η ευρείας κλίμακας εμπορική χρήση των mmWave. Για να ξεπεραστούν αυτά τα μειονεκτήματα μία από τις βασικές τεχνολογίες που έχουν πρόσφατα προταθεί είναι οι ανακλαστικές των σημάτων. Με την χρήση τους ακόμη και ένας σύνδεσμος χωρίς οπτική επαφή (NLOS) μπορεί να αντισταθμιστεί δημιουργώντας πολλαπλούς συνδέσμους LOS επικοινωνίας [ZSB19; Van+21].

Σχήμα 2.4: Απλό Δίκτυο με RIS [BÖL20a]



Η τεχνολογία αυτή έχει βρει εφαρμογή στις προγραμματιζόμενες έξυπνες επιφάνειες (RIS) (Σχήμα 2.4). Το RIS έχει προσελκύσει μεγάλη προσοχή για την βελτίωση τόσο του περιβάλλοντος διάδοσης των σημάτων όσο και για την γενικότερη βελτίωση της ποιότητας των επικοινωνιών. Αποτελείται από πολλαπλά αναδιαμορφώσιμα ανακλαστικά στοιχεία (elements) που είναι ενεργειακά και οικονομικά αποδοτικά. Καθένα από αυτά τα στοιχεία μπορεί να ανακλά το σήμα που λαμβάνει προκαλώντας του ταυτόχρονα και μια κατάλληλη αλλαγή φάσης. Οι αλλαγές φάσης όλων των στοιχείων μπορούν να προσαρμοστούν από κοινού για να επιτευχθεί η ευθυγράμμιση των σημάτων από διαφορετικές διαδρομές μετάδοσης σε ένα επιθυμητό δέκτη με σκοπό να αυξηθεί η ενέργεια του σήματος και να βελτιωθεί ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης. Είναι σημαντικό επιπλέον πως σε αντίθεση με το συμβατικό ρελέ ενίσχυσης και προώθησης (amplify-and-forward relay) ανακλά τα σήματα μέσω των παθητικών στοιχείων με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μια χαμηλή κατανάλωση ενέργειας ενώ τα ίδια τα στοιχεία έχουν ιδιαίτερα

χαμηλό κόστος μειώνοντας συνεπώς το συνολικό κόστος του δικτύου [Li+20].

2.3.1 Αρχιτεκτονική

Γενικότερα ως προγραμματιζόμενη έξυπνη επιφάνεια μπορεί να οριστεί οποιαδήποτε παθητική επιφάνεια που μπορεί να ρυθμιστεί δυναμικά για να χειριστεί τα λαμβανόμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και να αλλάξει τις συνθήκες του καναλιού επικοινωνίας. Ο ορισμός αυτός ισχύει ανεξάρτητα από την υλοποίηση που θα επιλεγεί για να επιτευχθεί αυτό. Στην βιβλιογραφία δύο είναι οι κύριες αρχιτεκτονικές που έχουν ερευνηθεί για τα RIS. Η μία βασίζεται στους κλασικούς ανακλαστήρες (reflectarrays - Σχήμα 2.5α') ενώ η δεύτερη στις μετα-επιφάνειες (metasurfaces - Σχήμα 2.5β').

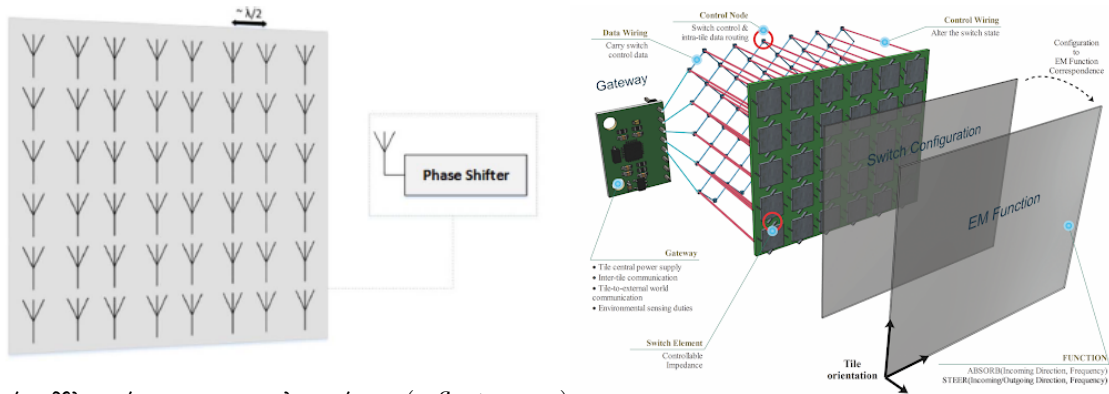
Υλοποίηση με Ανακλαστήρες (ReflectArrays)

Η χρήση των παθητικών ανακλαστήρων αποτελεί τον απλούστερο τρόπο για την κατασκευή μιας έξυπνης επιφάνειας. Η υλοποίηση αυτή βασίζεται στο γεγονός πως οι κεραίες των στοιχείων αυτών μπορούν να ελεγχθούν ηλεκτρονικά και να εκτελεστεί η οπισθοσκέδαση και η κατάλληλη μετατόπιση φάσης για το λαμβανόμενο σήμα. Τα elements έχουν διάσταση συγκρίσιμη με το μήκος κύματος και το καθένα ξεχωριστά λειτουργεί ως σκεδαστής διάχυσης. Το κάθε στοιχείο ξεχωριστά έχει πολύ περιορισμένη επίδραση στα κύματα, ωστόσο ένας αρκετά μεγάλος αριθμός στοιχείων μπορεί να τα χειριστεί αποτελεσματικά με έναν ελεγχόμενο τρόπο. Για να έχει συνεπώς αυτή η αρχιτεκτονική κάποιο αποτέλεσμα θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα μεγάλο πλήθος από στοιχεία κεραίων.

Με αυτήν την υλοποίηση κάθε ανακλαστήρας λειτουργεί παρόμοια με έναν αναμεταδότη σε ένα σύστημα επικοινωνίας. Ωστόσο, παρουσιάζει δύο σημαντικές διαφορές. Αρχικά, στην περίπτωση των έξυπνων επιφανειών κάθε στοιχείο βοηθά απλώς στην συνεχή μετάδοση των σημάτων που λαμβάνει και δεν μεταφέρει δικές του πληροφορίες. Επιπλέον, λειτουργούν συλλογικά με στόχο την καλύτερη αντίληψη του περιβάλλοντος διάδοσης και την ευκολότερη μετάδοση των σημάτων αντίθετα με τις απλές επικοινωνίες όπου κάθε στοιχείο δρα αυτόνομα [EIM+20].

Υλοποίηση με Μετα-Επιφάνειες (MetaSurfaces)

Η υλοποίηση αυτή αποτελεί μια πιο εξελιγμένη μορφή των RIS. Οι Μετα-επιφάνειες αποτελούν σύνθετα στρώματα υλικών που είναι σχεδιασμένα και βελτιστοποιημένα με τέτοιο τρόπο ώστε να λειτουργούν ως εργαλείο για τον έλεγχο και την διαμόρφωση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Συνήθως δομούνται με ένα επαναλαμβανόμενο αγωγίμο μοτίβο πάνω από ένα διηλεκτρικό υπόστρωμα και αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό στενών δομών συντονισμού που ονομάζονται pixels ή μετα-άτομα. Τα μεμονωμένα μετα-άτομα καθώς και το κενό μεταξύ των γειτονικών είναι πολύ μικρότερα από το μήκος κύματος. Το πολύ μικρό αυτό μέγεθος τους και το μεγάλο πλήθος τους προσφέρουν ένα τεράστιο βαθμό ελευθερίας χειρισμού των λαμβανόμενων σημάτων [EIM+20]. Η αρχή λειτουργίας των MetaSurfaces είναι η εξής [Lia+18]:



α': Υλοποίηση με ανακλαστήρες (reflectarrays)
[EIM+20]

β': Υλοποίηση με Metasurfaces [Lia+18]

Σχήμα 2.5: Διαφορετικές Υλοποιήσεις RIS

Όταν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα προσκρούουν σε αυτές μέσω της επαγωγής δημιουργείται ρεύμα. Στην περίπτωση στατικών μετα-ατόμων η δομή του συνολικού ρεύματος μέσα στην επιφάνεια είναι πλήρως καθορισμένη από την γεωμετρία και την σύνθεση αυτών. Διαφορετικά εξαρτάται από τις καταστάσεις των στοιχείων μεταγωγής. Το επαγωγικό ρεύμα επίσης δημιουργεί ένα πεδίο απόκρισης, σύμφωνα με τους νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού ενώ τα μετα-άτομα σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούν ένα τεχνητό πεδίο απόκρισης. Στο Σχήμα 2.5β' παρουσιάζονται και πιο αναλυτικά τα διαφορετικά στρώματα που δομούν το RIS στην υλοποίηση με χρήση μεταεπιφανειών.

Ανεξάρτητα από την υλοποίηση που θα επιλεγεί για ένα RIS αυτό που είναι απαραίτητο είναι να είναι παθητικό. Δηλαδή, δεν θα πρέπει να εκπέμπει καθόλου δική του ισχύ αλλά να στοχεύει αποκλειστικά στον χειρισμό των υφιστάμενων μεταδιδόμενων κυμάτων [EIM+20].

2.3.2 Περιπτώσεις χρήσης (Use Cases)

Οι έξυπνες επιφάνειες είναι μια τεχνολογία που πολύ πρόσφατα άρχισε να απασχολεί την επιστημονική κοινότητα. Απαιτούνται μεγάλες επενδύσεις και χρόνος για να εφαρμοστεί, όπως και κάθε νέα τεχνολογία, από την θεωρία στην πράξη. Θα πρέπει να κατατεθούν πειστικά οφέλη που έχουν (ακόμη και 10 φορές βελτιώσεις σε μετρικές απόδοσης και όχι απλώς ένα μικρό κέρδος που μπορεί εύκολα να χαθεί κατά την εκτέλεση της ιδέας [BÖL20b]) σε σύγκριση με τις υπάρχουσες μεθόδους. Για παράδειγμα, οι τεχνολογίες των πολλαπλών εισόδων και εξόδων (Massive MIMO) και των mmWave επικοινωνιών πέρασαν αυτό το τεστ για την καθιέρωση τους στα δίκτυα 5G ενώ άλλες απέτυχαν καθώς τα κέρδη τους ήταν πολύ περιορισμένα. Τα RIS προσφέρουν πολλά νέα τεχνικά χαρακτηριστικά ωστόσο θα πρέπει να υπάρξουν συγκεκριμένες και πειστικές περιπτώσεις που η χρήση τους κρίνεται σκόπιμη. Αν και η έρευνα είναι ακόμη ανοιχτή ορισμένες από τις περιπτώσεις χρήσης των έξυπνων επιφανειών είναι οι εξής [Gon+20a; BÖL20b; Di +20]:

1. Ο χειρισμός των κυμάτων από τα RIS έχει την ευελιξία να δημιουργεί ταυτόχρονα ε-

νισχυμένες ακτίνες προς έναν επιθυμητό δέκτη και καταπιεσμένες προς δέκτες που δεν αναμενόταν να λάβουν την πληροφορία. Αυτό μπορεί να συμβάλει στην ενίσχυση της ασφάλειας στο φυσικό επίπεδο των ασύρματων επικοινωνιών [Li+21; ZB13; Tsi+16]. Παράδειγμα μιας τέτοιας εφαρμογής παρουσιάζεται στο [YXS19], όπου για την προστασία από τους υποκλοπείς χρησιμοποιείται ένα RIS τοποθετημένο κοντά στον δέκτη μέσω του οποίου ελέγχονται τα ανακλώμενα σήματα με αποτέλεσμα να μεγιστοποιείται ο ρυθμός απορρήτου (ποσότητα ανά μονάδα χρόνου που μπορεί να αποσταλεί με ασφάλεια μέσω ενός καναλιού επικοινωνίας).

2. Μία από τις βασικές χρήσεις των RIS αποτελεί η επίτευξη επικοινωνίας μεταξύ δύο σταθμών η οποία επιβαρύνεται λόγω της ύπαρξης εμποδίων. Αν για παράδειγμα, ο σύνδεσμος μεταξύ δύο σταθμών βάσης του δικτύου εμποδίζεται από κάποιο αντικείμενο, ο πομπός έχει την δυνατότητα να μεταδώσει το σήμα προς ένα ενδιάμεσο RIS και στην συνέχεια αυτό να το ανακατευθύνει μέσω της επιλογής κατάλληλης γωνίας στον δέκτη.
3. Μέχρι τώρα είδαμε πως το RIS χρησιμοποιείται κυρίως ως ένας βοηθητικός τρόπος για την βελτίωση της απόδοσης μετάδοσης στους υπάρχοντες πομποδέκτες. Ωστόσο, καθένα από τα στοιχεία του μπορεί να ρυθμιστεί ξεχωριστά και να δείχνει συνεπώς διαφορετική ευαισθησία στα λαμβανόμενα σήματα από διαφορετικές κατευθύνσεις. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένας πίνακας από συσκευές αισθητήρων που είναι έτσι διαμορφωμένες ώστε να παρακολουθούν παθητικά το ασύρματο περιβάλλον. Όλες αυτές οι πληροφορίες από τα διαφορετικά στοιχεία μπορούν να συλλεχθούν και να αναλυθούν με έναν ενεργειακά αποδοτικό τρόπο και το RIS να λειτουργήσει ως μέσο για πολλές εφαρμογές αισθητήρων.
4. Το RIS έχει ρυθμιστεί με κατάλληλο τρόπο ώστε να βελτιστοποιεί την χωρητικότητα του συστήματος επικοινωνίας. Το πλεονέκτημα αυτής της εφαρμογής είναι ότι η συγκεκριμένη κατάσταση των μετα-ατόμων των στοιχείων αξιοποιείται για την διαμόρφωση επιπρόσθετων πληροφοριών. Η πρόκληση ωστόσο σε αυτήν την διαδικασία είναι πως ο πομπός του συστήματος θα πρέπει να βελτιστοποιηθεί από κοινού με το RIS.

2.3.3 Προκλήσεις και Μελλοντικές Έρευνες

Από ολόκληρη την παραπάνω ανάλυση αποδεικνύεται πως τα ασύρματα δίκτυα που υποστηρίζονται από τα RIS μπορούν να βελτιωθούν σημαντικά σε αρκετούς τομείς που διαφορετικά θα υστερούσαν. Ωστόσο, συνεχίζουν να υπάρχουν ορισμένα ανοικτά ζητήματα και ερευνητικές κατευθύνσεις που θα πρέπει να μελετηθούν από την επιστημονική κοινότητα. Μερικά από αυτά είναι τα εξής [Gon+20a; Lia+18]:

- Ως προς την αρχιτεκτονική των επιφανειών σημαντική είναι η βελτιστοποίηση του μεταατομικού σχεδιασμού τους ώστε να μεγιστοποιηθεί το υποστηριζόμενο εύρος λειτουργίας του κάθε πλακιδίου. Ο σχεδιασμός αυτός θα πρέπει να επιλεχθεί ώστε να επιτραπεί στα πλακίδια να αλληλεπιδρούν ταυτόχρονα με ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων (π.χ. από 1 έως 60 GHz).

- Το RIS, όπως αναφέραμε, αποτελείται από ένα μεγάλο πίνακα παθητικών στοιχείων σκέδασης τα οποία ελέγχονται συνήθως από έναν κεντρικό ελεγκτή. Το βασικό του πλεονέκτημα είναι η αναδιαμόρφωση της μετατόπισης φάσης του κάθε στοιχείου ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού. Η διαδικασία αυτή απαιτεί την ικανότητα ανίχνευσης και επεξεργασίας σήματος, κάτι εξαιρετικά απαιτητικό για τα μη εξειδικευμένα παθητικά στοιχεία. Η εύρεση συνεπώς μιας πρακτικής, αποτελεσματικής και βιώσιμης μεθόδου για την εκτίμηση του καναλιού αποτελεί μια από τις σημαντικότερες κατευθύνσεις για την βελτίωση των ασυρμάτων δικτύων που υποβοηθούνται από τα RIS.
- Το λογισμικό ελέγχου των επιφανειών απαιτείται να βελτιστοποιηθεί ως προς την πολυπλοκότητα και τις δυνατότητες διεπικοινωνίας του. Η επίτευξη γρήγορης βελτιστοποίησης της αναδιαμόρφωσης μπορεί να συμβάλει στην γρηγορότερη προσαρμογή των επικοινωνιών με το περιβάλλον.
- Οι επικοινωνίες Device-to-Device (D2D) αναμένεται να κάνουν δυνατή τη σύνδεση δισεκατομμυρίων συσκευών χαμηλής ισχύος [KTP17b]. Αντίθετα από τις κλασικές μεταδόσεις πολλαπλών κεραιών οι επικοινωνίες D2D γίνονται πιο αποκεντρωμένα και οδηγούν σε νέα ερευνητικά προβλήματα σχετικά με την υποστήριξη τους από τα RIS. Οι έξυπνες επιφάνειες μπορούν να προγραμματιστούν δυναμικά ώστε να ενισχύσουν τις ατομικές συνδέσεις δεδομένων σε επικοινωνίες από συσκευή σε συσκευή. Από την άλλη πλευρά οι κατανεμημένες μονάδες RIS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καλύτερη κατανόηση ολόκληρου του προφίλ του συστήματος επικοινωνίας. Οι πληροφορίες που περιέχονται σε αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τα D2D δίκτυα για την βελτιστοποίηση της ανάπτυξής τους και την κατάλληλη τοποθέτηση των κόμβων και των σταθμών τους [KTP17a; KTP15].

2.4 Βασικές Έννοιες Θεωρίας Παιγνίων

Η Θεωρία Παιγνίων αποτελεί κλάδο των εφαρμοσμένων μαθηματικών που παρέχει εργαλεία για την ανάλυση καταστάσεων στις οποίες τα μέλη που συμμετάσχουν ονομάζονται παίχτες και λαμβάνουν αποφάσεις που αλληλεξαρτώνται μεταξύ τους. Η αλληλεξάρτηση αυτή αναγκάζει κάθε παίχτη να εξετάσει τις πιθανές αποφάσεις ή στρατηγικές των υπολοίπων ώστε να διαμορφώσει και την ατομική του στρατηγική [BD21; ZG11]. Συνεπώς, ένας γενικός ορισμός που μπορεί να δοθεί για την θεωρία παιγνίων είναι ο εξής [Lev07]:

Ορισμός 2.1. *Η Θεωρία Παιγνίων είναι μια συστηματική μελέτη στρατηγικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ λογικών οντοτήτων.*

Χαρακτηριστική έννοια για την θεωρία παιγνίων είναι η συνάρτηση ωφέλειας (payoff function). Η συνάρτηση αυτή αποτελεί μέτρο του κέρδους που θα έχει κάθε παίχτης του παίγνιου από την στρατηγική που θα επιλέξει σε αυτό.

Ένα παίγνιο ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του μπορεί να καταχωρηθεί σε διάφορες κατηγορίες. Ορισμένες από τις πιο σημαντικές είναι:

1. **Συνεργατικά (Cooperative) και Μη-Συνεργατικά (Non-Cooperative):** Η κατηγοριοποίηση αυτή γίνεται με βάση του αν η στρατηγική που ακολουθεί κάθε παίκτης εξαρτάται από την κίνηση των υπολοίπων. Στην περίπτωση που εξαρτάται, το παίγνιο είναι συνεργατικό [HLS16].
2. **Συμμετρικά (Symmetric) και Μη-Συμμετρικά (Asymmetric):** Ένα παίγνιο είναι συμμετρικό αν όλοι οι παίκτες που συμμετέχουν σε αυτό έχουν το ίδιο σύνολο στρατηγικής και το όφελος κάθε μίας εξαρτάται μόνο από την ίδια και όχι από το ποιος την επιλέγει [Che+04].
3. **Τέλειας (Perfect) και Ατελούς (Imperfect) Πληροφορίας:** Ένα παίγνιο είναι τέλειας πληροφορίας αν οι παίκτες γνωρίζουν κάθε στιγμή τα πάντα για το παιχνίδι. Διαφορετικά, αν οι παίκτες δεν γνωρίζουν τις κινήσεις των αντιπάλων το παίγνιο είναι ατελούς πληροφορίας [BD21].

2.4.1 Παίγνια σε Κανονική Μορφή Αναπαράστασης

Στη Θεωρία Παιγνίων η κανονική μορφή αποτελεί μία μέθοδο περιγραφής. Η αναπαράσταση στον τρόπο αυτό δεν είναι γραφική αλλά αντίθετα γίνεται με χρήση ενός πίνακα. Η προσέγγιση αυτή έχει μεγάλη χρησιμότητα στον εντοπισμό των αυστηρά κυρίαρχων στρατηγικών (strictly dominant strategies) και των ισορροπιών Nash, ωστόσο είναι πιθανόν να οδηγήσει στην απώλεια ορισμένων πληροφοριών του παίγνιου. Ένας πιο αυστηρός ορισμός που μπορεί να δοθεί είναι ο εξής [Tsi+15]:

Ορισμός 2.2. Ένα μη-συνεργατικό παίγνιο βρίσκεται σε **Κανονική Μορφή Αναπαράστασης** όταν αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία [TVP17a]:

- Ένα πεπερασμένων σύνολο $S = \{1, 2, \dots, N\}$ παικτών που συμμετέχουν στο παίγνιο
- Ένα καθαρό σύνολο στρατηγικής A_j για κάθε παίκτη j
- Μία συνάρτηση ωφέλειας U_j , η οποία δίνει την ωφέλεια $U_j(a)$ για κάθε παίκτη j και κάθε στρατηγικό προφίλ $a = (a_1, a_2, \dots, a_N)$

Εκτός από τις υποθέσεις ότι οι παίκτες είναι λογικοί και παίζουν ταυτόχρονα, θεωρούμε επιπλέον ότι η δομή του παιχνιδιού είναι απόλυτα γνωστή. Δηλαδή κάθε παίκτης γνωρίζει για κάθε άλλον το σύνολο των δυνατών στρατηγικών του και την συνάρτησης ωφέλειας του [Osb09].

2.4.2 Ισορροπία Nash

Η ισορροπία κατά Nash αποτελεί μια από τις βασικότερες έννοιες της Θεωρίας Παιγνίων. Προσφέρει μια σταθερή, προβλέψιμη και καθορισμένη λύση σε ένα μη-συνεργατικό παίγνιο,

όπου πολλοί παίχτες με δυνητικά αντιχρουόμενα συμφέροντα ανταγωνίζονται για την ατομική τους βελτιστοποίηση και φτάνουν σε ένα σημείο όπου κανένας δεν επιθυμεί να παρεκκλίνει. Χαρακτηριστικό της ισορροπίας είναι πως κανένας παίκτης, όταν το παίγνιο έχει έρθει σε αυτή δεν πρόκειται να αλλάξει την στρατηγική του [TVP13]. Ένας πιο αυστηρός ορισμός που μπορεί να δοθεί είναι ο εξής [Osb09]:

Ορισμός 2.3. Το στρατηγικό προφίλ a^* σε ένα παίγνιο είναι **Nash Equilibrium** αν, για κάθε παίκτη i και κάθε στρατηγική a_i του παίκτη i , το a^* είναι τουλάχιστον όσο καλό (σύμφωνα με τις προτιμήσεις του παίκτη i) όσο και το στρατηγικό προφίλ (a_i, a_{-i}^*) στο οποίο ο παίκτης i επιλέγει το a_i ενώ κάθε άλλος παίκτης j επιλέγει το a_j^* . Ισοδύναμα, για κάθε παίκτη i ισχύει,

$$u_i(a^*) \geq u_i(a_i, a_{-i}^*) \text{ για κάθε στρατηγική } a_i \text{ του παίκτη } i,$$

όπου u_i είναι η συνάρτηση ωφέλειας του παίκτη i και a_{-i}^* οι στρατηγικές όλων των παικτών εκτός του i .

Ένα παίγνιο μπορεί να έχει μία, πολλαπλές ή και καμία ισορροπία κατά Nash. Στην περίπτωση που δεν έχει, σημαίνει ότι το σύστημα είναι εγγενώς ασταθές [TVP13]. Από τον ορισμό φαίνεται επίσης πως για να μελετήσουμε το πως ένα σύστημα αποκρίνεται αρκεί να δούμε πως συμπεριφέρεται στις ισορροπίες κατά Nash και όχι σε κάθε πιθανό συνδυασμό στρατηγικών [TKP09].

2.4.3 Μοντέλο Stackelberg

Τα παίγνια Stackelberg, τα οποία ονομάζονται επίσης και παίγνια ηγέτη-ακολούθου, προτάθηκαν αρχικά από τον Stackelberg το 1952 και βασίστηκαν σε κάποια φαινόμενα οικονομικού μονοπωλίου. Τα επόμενα χρόνια άρχισαν να αποκτούν περισσότερο ενδιαφέρον για τις διάφορες εφαρμογές χάρις τον δυναμικό χαρακτήρα που απέκτησαν σταδιακά [NZ08; VTP18; ATP18]. Έχουν συχνή εφαρμογή σε τηλεπικοινωνιακά και υπολογιστικά συστήματα για την υποστήριξη των αποφάσεων τους. Αποτελούν μη-συμμετρικά παίγνια όπου ένας παίκτης ή μια συγκεκριμένη ομάδα παικτών έχει μια προνομιακή θέση και λαμβάνει αποφάσεις πριν από τους υπόλοιπους. Χαρακτηρίζονται από την ιεραρχική λήψη αποφάσεων και οι παίχτες χωρίζονται σε διαφορετικούς ρόλους, ως ηγέτες (leaders) και ακόλουθοι (followers). Οι leaders μπορούν να επιβάλουν την στρατηγική τους στους followers διατηρώντας με αυτόν τον τρόπο την ισχυρή θέση στα παιχνίδια ενώ οι ακόλουθοι απαντούν στις αποφάσεις τους [Yif15].

Ο leader μπορεί να κρατάει την στρατηγική του σταθερή ενώ οι followers αντιδρούν εξαρτώμενοι από την στρατηγική αυτή. Πιο αυστηρά ένα παίγνιο Stackelberg με N παίχτες μπορεί να οριστεί ως ένα μοντέλο παιχνιδιού δύο επιπέδων όπου οι παίχτες ενεργούν διαδοχικά ως εξής:

- (i) Ο leader είναι ο μόνος παίκτης που ενεργεί στο πρώτο επίπεδο και επιλέγει την στρατηγική βέλτιστης απόκρισης.

- (ii) Στο δεύτερο επίπεδο οι followers αντιδρούν λογικά στην δράση του leader. Δηλαδή, προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν το ατομικό τους κόστος βασιζόμενοι πάντα στην επιλογή του leader.
- (iii) Τέλος, ο leader ενημερώνει την στρατηγική του ώστε να ελαχιστοποιήσει το συνολικό κόστος του παιχνιδιού.

Η λύση ενός παίγνιου Stackelberg ονομάζεται **Stackelberg Equilibrium**. Στην περίπτωση αυτή, κάθε ακόλουθος παρατηρεί την στρατηγική x του ηγέτη και απαντά με μια στρατηγική $f(x) : x \rightarrow y$ που είναι η βέλτιστη σύμφωνα με την συνάρτηση ωφέλειας που έχει επιλεχθεί. Μπορούν να οριστούν δύο σημεία ισορροπίας Stackelberg. Αυτά είναι η ισχυρή (Strong Stackelberg Equilibrium - SSE) και η ασθενής (Weak Stackelberg Equilibrium - WSE) ισορροπία. Με την πρώτη ο ακόλουθος επιλέγει την βέλτιστη του στρατηγική, η οποία είναι όμως βέλτιστη και από την πλευρά του leader. Στην δεύτερη, η στρατηγική που επιλέγεται από τον ακόλουθο είναι η χειρότερη για την πλευρά του ηγέτη. Πιο αυστηρά ο ορισμός για τις ισορροπίες Stackelberg είναι [WJK16]:

Ορισμός 2.4. Ένα ζευγάρι στρατηγικών $(x, f(x))$ ορίζεται ως **Ισχυρή Ισορροπία Stackelberg** αν ικανοποιούνται οι εξής συνθήκες:

- (i) Ο leader επιλέγει την στρατηγική βέλτιστης απόκρισης:

$$u_{leader}(x, f(x)) \geq u_{leader}(x', f(x')),$$

για κάθε στρατηγική x' του leader.

- (ii) Ο follower επιλέγει την στρατηγική βέλτιστης απόκρισης:

$$u_{follower}(x, f(x)) \geq u_{follower}(x, f(y')),$$

για κάθε στρατηγική y' του follower.

- (iii) Ο follower επιλέγει την βέλτιστη στρατηγική που είναι βέλτιστη και για την πλευρά του leader:

$$u_{leader}(x, f(x)) \geq u_{leader}(x, y'),$$

για κάθε βέλτιστη στρατηγική y' του follower.

Σε ένα παίγνιο Stackelberg η ισορροπία δεν είναι πάντα βέβαιο πως υπάρχει ενώ ακόμη και αν υπάρχει δεν είναι σίγουρο πως είναι μοναδική. Για να υπάρχει μοναδικό Stackelberg Equilibrium για ένα τέτοιο παίγνιο θα πρέπει να ικανοποιούνται ορισμένες προϋποθέσεις, οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά στο παρακάτω θεώρημα [Mah+13]:

Θεώρημα 2.1 (Θεώρημα Έπαρξης Μοναδικού Stackelberg Equilibrium). Για ένα παίγνιο Stackelberg ενός leader και N ακολούθων υπάρχει μοναδικό Stackelberg Equilibrium μεταξύ follower και leader αν ικανοποιούνται οι εξής συνθήκες:

1. Το στρατηγικό σύνολο y κάθε παίκτη είναι μη-κενό, κυρτό (*convex*) και συμπαγές υποσύνολο κάποιου Ευκλείδειου χώρου R^K .
2. Η συνάρτηση ωφέλειας $u(y)$ κάθε παίκτη είναι συνεχής.
3. Η συνάρτηση ωφέλειας $u(y)$ κάθε παίκτη είναι κοίλη (*concave*) στο $y_k, \forall k \in K$.

2.4.4 Κοίλα Παίγνια (Convave Games)

Μια τελευταία κατηγορία παίγνιων που θα μελετήσουμε είναι τα κοίλα. Όπως είδαμε, κάθε παίγνιο χαρακτηρίζεται από μία συνάρτηση ωφέλειας για καθέναν από τους παίκτες του [TVP12], η οποία αποτελεί μέτρο του κέρδους που θα έχει από την στρατηγική που θα επιλέξει. Αν η συνάρτηση αυτή είναι κοίλη τότε και το παίγνιο ονομάζεται κοίλο (Convave). Πιο αυστηρά μπορεί να αποδοθεί ο εξής ορισμός [GP19]:

Ορισμός 2.5. Έστω $G = (N, \{\Omega^p\}_{p \in N}, \{U^p\}_{p \in N})$ ένα παίγνιο, όπου $N = \{1, \dots, N\}$ το σύνολο των παικτών του, $\Omega^p \subseteq R^{n_p}$ το σύνολο των στρατηγικών του παίκτη p και $U^p : \Omega \rightarrow R$ η συνάρτηση ωφέλειας του παίκτη p . Ορίζουμε επιπλέον το Ω^{-p} ως το σύνολο των στρατηγικών των αντιπάλων του παίκτη p και x^p, x^{-p} τα στρατηγικά προφίλ του παίκτη p και των αντιπάλων του αντίστοιχα. Το παίγνιο G λέμε ότι είναι **Κοίλο (Convave)** αν ικανοποιούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- (i) Το Ω^p είναι μη-κενό, κλειστό, κυρτό, υποσύνολο του R^{n_p} .
- (ii) Η συνάρτηση $U^p(x^p; x^{-p})$ είναι συνεχής στο $x = (x^p; x^{-p})$.
- (iii) Η συνάρτηση $U^p(x^p; x^{-p})$ είναι κοίλη και συνεχώς διαφορίσιμη σε κάθε x^p , για κάθε $x^{-p} \in \Omega^{-p}$.

Σχετικά με την ισορροπία σε ένα τέτοιο παίγνιο ισχύει το παρακάτω θεώρημα [ATP20]:

Θεώρημα 2.2. Ένα Convave παίγνιο N παικτών έχει τουλάχιστον ένα *Pure Nash Equilibrium (PNE)*.

όπου το Pure Nash Equilibrium ορίζεται ως [ATP20]:

Ορισμός 2.6. Το στρατηγικό προφίλ a^* σε ένα μη-συνεργατικό παίγνιο είναι **Pure Nash Equilibrium** αν, για κάθε παίκτη i και κάθε στρατηγική a_i του παίκτη i ισχύει,

$$u_i(a_i^*, a_{-i}^*) \geq u_i(a_i, a_{-i}^*) \text{ για κάθε στρατηγική } a_i \text{ του παίκτη } i,$$

όπου u_i είναι η συνάρτηση ωφέλειας του παίκτη i και a_{-i}^* οι στρατηγικές όλων των παικτών εκτός του i [TVP17β].

Μοντελοποίηση Προβλήματος

Στο παρόν κεφάλαιο, θα παρουσιαστεί το σύστημα, στο οποίο στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής θα επιλυθεί στην συνέχεια το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Παράλληλα, θα αναπτυχθεί αναλυτικά τόσο το επικοινωνιακό όσο και το μοντέλο απώλειας διαδρομής για ολόκληρη την επικοινωνία στο δίκτυο αυτό.

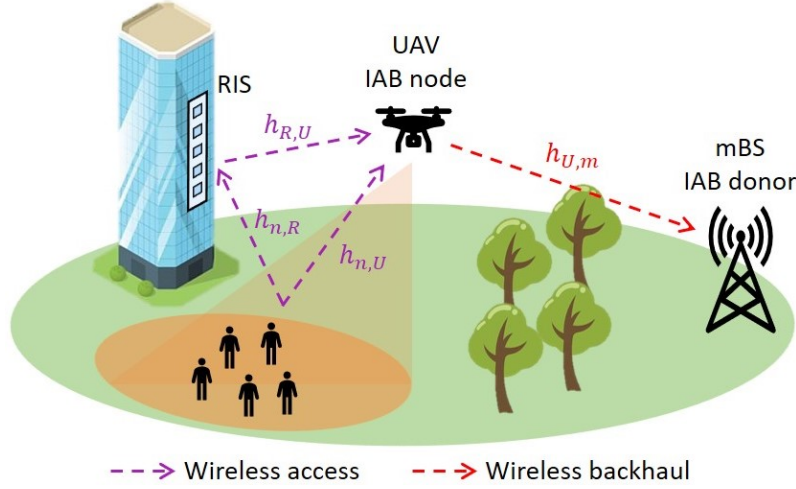
Σημείωση Σε όλες τις σχέσεις που θα ακολουθήσουν θα χρησιμοποιηθούν οι εξής συμβολισμοί: Τα διανύσματα και οι πίνακες σημειώνονται με έντονα γράμματα και συνοδεύονται από το μέγεθός τους. Ο $\mathbb{C}^{X \times Y}$ ορίζει ένα πίνακα με μιγαδικές τιμές και μέγεθος $X \times Y$. Για κάθε πίνακα \mathbf{G} , οι \mathbf{G}^T και \mathbf{G}^H δηλώνουν αντίστοιχα τον ανάστροφο και τον Ερμιτιανό συζυγή του ενώ το $G_{i,j}$ το (i, j) στοιχείο. Για κάθε διάνυσμα \mathbf{g} , το $\text{diag}(\mathbf{g})$ αναφέρεται στο διαγώνιο πίνακα, τα στοιχεία του οποίου στην κύρια διαγώνιο είναι τα στοιχεία του διανύσματος αυτού. Επιπλέον, το $\mathcal{CN}(\mu, \sigma^2)$ ορίζει την Κυκλικά Συμμετρική Σύνθετη Γκαουσιανή κατανομή (CSCG) με μέση τιμή μ και διακύμανση σ^2 ενώ το \sim δηλώνει ότι μια μεταβλητή ακολουθεί κάποια κατανομή. Για έναν μιγαδικό αριθμό g , το $|g|$ είναι το μέτρο του και το $\angle g$ η φάση του. Τέλος για κάθε συνάρτηση f , το dom ορίζει το πεδίο ορισμού της.

3.1 Περιγραφή Συστήματος Μοντελοποίησης

Θεωρούμε την επικοινωνία ανερχόμενης ζεύξης (uplink communication) σε ένα Integrated Access and Backhaul Δίκτυο δύο επιπέδων υποβοηθούμενο από ένα μη επανδρωμένο εναέριο όχημα (UAV) και με υποστήριξη προγραμματιζόμενης έξυπνης επιφάνειας (RIS), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1. Το δίκτυο αυτό αποτελείται από $|N|$ χρήστες, όπου $N = \{1, \dots, n, \dots, |N|\}$ το σύνολο των χρηστών, ένα UAV και ένα μικρό σταθμό βάσης (micro Base Station - mBS) [VTP19d].

Το UAV λειτουργώντας ως ένας κόμβος του IAB συλλέγει τα δεδομένα των χρηστών στο πρώτο επίπεδο και στο δεύτερο τα προωθεί στο mBS (ή IAB donor) μέσω του ασύρματου backhaul. Όλες οι οντότητες του δικτύου που είτε αποστέλλουν είτε λαμβάνουν πληροφορίες (χρήστες, UAV, mBS), φέρουν πομπούς και δέκτες μιας κεραίας αντίστοιχα. Επιπλέον, το

Σχήμα 3.1: Δίκτυο Ολοκληρωμένης Πρόσβασης (IAB) υποβοηθούμενο από UAV και υποστήριξη RIS



δίκτυο IAB βρίσκεται σε λειτουργία εκτός ζώνης, δηλαδή η σύνδεση της πρόσβασης (Access) χρησιμοποιεί διαφορετική ζώνη συχνοτήτων από το backhaul.

Συνεπώς το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης του συστήματος W [Hz] χωρίζεται σε δύο τμήματα μW και $(1 - \mu)W$ [Hz] για την διευκόλυνση της ασύρματης πρόσβασης και του backhaul αντίστοιχα. Το $\mu \in [0, 1]$ είναι το ποσοστό διαχωρισμού του εύρους ζώνης. Τέλος, θεωρούμε πως οι μεταδόσεις των χρηστών στο πρώτο επίπεδο πολυπλέκονται χρησιμοποιώντας τον συνδυασμό των τεχνικών της power-domain NOMA [VTP19e] και της Διαδοχικής Ακύρωσης Παρεμβολών (Successive Interference Cancellation -SIC) [VTP19c; Dia+20].

3.2 Μοντέλο Απωλειών Διαδρομής (Path-Loss)

Στο IAB δίκτυο που θα εξετάσουμε, οι απώλειες διαδρομής μεταξύ του UAV και κάθε οντότητας του δικτύου οφείλεται τόσο στην περίπτωση της άμεσης οπτικής επικοινωνίας (Line Of Sight - LoS) όσο και της μη άμεσης επικοινωνίας (non LoS - NLoS) [ZA20]. Η πιθανότητα η ασύρματη επικοινωνία μεταξύ μιας οντότητας και του UAV να είναι LoS δίνεται από την συνάρτηση:

$$Pr^{LoS}(z_U, d) = \frac{1}{1 + \psi e^{-\beta(\theta - \psi)}}, \quad (3.1)$$

όπου $\theta = \frac{180}{\pi} \sin^{-1}(\frac{z_U}{d})$ [rad] η γωνία ανύψωσης μεταξύ UAV και οντότητας, d [m] η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ τους και z_U [m] το ύψος που βρίσκεται το UAV. Επιπλέον, τα $\psi, \beta \in \mathbb{R}^+$ είναι σταθερές που εξαρτώνται από την συχνότητα του φέροντος και τον τύπο του περιβάλλοντος επικοινωνίας (αγροτικό, αστικό, προαστιακό).

Οι απώλειες διαδρομής για την περίπτωση της LoS επικοινωνίας μεταξύ του UAV και της οντότητας του δικτύου ορίζεται ως συνάρτηση της ευκλείδειας απόστασης d μεταξύ τους:

$$PL^{LoS}(d) = \eta_{LoS} \left(\frac{4\pi f_c d}{c} \right)^{a_U}, \quad (3.2)$$

ενώ αντίστοιχα το Path Loss για την περίπτωση της NLoS επικοινωνίας:

$$PL^{NLoS}(d) = \eta_{NLoS} \left(\frac{4\pi f_c d}{c} \right)^{a_U}, \quad (3.3)$$

όπου f_c [Hz] η συχνότητα του φέροντος, c [m/s] η ταχύτητα του φωτός, a_U ο εκθέτης του path loss και η_{LoS}, η_{NLoS} [dB] οι συντελεστές του path loss, οι οποίοι ικανοποιούν και την σχέση $\eta_{NLoS} > \eta_{LoS} > 1$.

Συνεπώς το συνολικό αναμενόμενο path loss δίνεται πιθανοτικά από την σχέση:

$$\overline{PL}(z_U, d) = P_r^{LoS} PL^{LoS} + (1 - P_r^{NLoS}) PL^{NLoS}. \quad (3.4)$$

Στην συνέχεια θα ασχοληθούμε με την μοντελοποίηση καθενός εκ των δύο επιπέδων επικοινωνίας ξεχωριστά.

3.2.1 Πρώτο Επίπεδο Επικοινωνίας

Στο πρώτο επίπεδο πραγματοποιείται η επικοινωνία μεταξύ των χρηστών και του UAV με την βοήθεια της έξυπνης επιφάνειας (RIS). Θα ξεκινήσουμε εξετάζοντας την προοπτική του RIS στο σύστημα αυτό. Θεωρούμε έναν ομοιόμορφο γραμμικό πίνακα (Uniform Linear Array - ULA), ο οποίος αποτελείται από ένα σύνολο $M = \{1, \dots, m, \dots, |M|\}$ ανακλαστικών στοιχείων και είναι τοποθετημένος σε ύψος z_R [m] από το έδαφος. Για κάθε ανακλαστικό στοιχείο m του RIS, ορίζουμε ως $\omega_m \in [0, 2\pi)$ την αλλαγή φάσης της ανάκλασης και υποθέτουμε πως δεν πραγματοποιείται καμία αλλαγή στο πλάτος του λαμβανόμενου σήματος (δηλαδή το πλάτος του συντελεστή ανάκλασης είναι ίσο με μονάδα). Επιπλέον, για το διαγώνιο πίνακα αλλαγής φάσης των στοιχείων του RIS επιλέγεται ο συμβολισμός $\mathbf{\Omega} = \text{diag}(e^{j\omega_1}, \dots, e^{j\omega_{|M|}}) \in \mathbb{C}^{|M| \times |M|}$, ενώ το πρώτο στοιχείο του RIS χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για τους υπολογισμούς που θα ακολουθήσουν.

Η απευθείας επικοινωνιακή ζεύξη μεταξύ ενός χρήστη και του UAV ακολουθεί την πιθανοτική μοντελοποίηση απωλειών διαδρομής, έτσι ώστε να ισχύει πως:

$$PL_{n,U} = \overline{PL}(z_U, d_{n,U}), \quad (3.5)$$

όπου $d_{n,U}$ [m] η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ του χρήστη n και του UAV. Συνεπώς, ο αντίστοιχος συντελεστής κέρδους του καναλιού $h_{n,U} \in \mathbb{C}$ δίνεται από τον τύπο:

$$h_{n,U} = \sqrt{\frac{1}{PL_{n,U}}} \tilde{h}, \quad (3.6)$$

όπου το $\tilde{h} \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ δηλώνει το τυχαίο στοιχείο σκέδασης το οποίο αποδίδεται από μία μιγαδική γκαουσιανή τυχαία μεταβλητή μηδενικής μέσης τιμής και μοναδιαίας διακύμανσης.

Το path loss, από την άλλη, μεταξύ ενός χρήστη n και του RIS είναι ίσο με:

$$PL_{n,R} = \rho(d_{n,R})^{\alpha_R}, \quad (3.7)$$

όπου ρ [dB] το path loss στην απόσταση αναφοράς του ενός μέτρου, $d_{n,R}$ [m] η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ του χρήστη n και του σημείου αναφοράς του RIS και α_R ο συντελεστής του path loss [WZ19].

Επομένως, θεωρώντας ότι το RIS είναι στην εγγύτητα των χρηστών, ο συντελεστής κέρδους του καναλιού $\mathbf{h}_{n,R} \in \mathbb{C}^{|M| \times 1}$ μεταξύ του χρήστη n και του RIS δίνεται από τον τύπο:

$$\mathbf{h}_{n,R} = \sqrt{\frac{1}{PL_{n,R}}} [1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d_s\phi_{n,R}}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(|M|-1)d_s\phi_{n,R}}]^T, \quad (3.8)$$

όπου λ [m] το μήκος κύματος του φέροντος, d_s [m] ο διαχωρισμός των κεραιών και $\phi_{n,R}$ το συνημίτονο την γωνίας άφιξης του σήματος του χρήστη στο RIS.

Αντίστοιχα, το κέρδος $\mathbf{h}_{R,U} \in \mathbb{C}^{|M| \times 1}$ της ζεύξης RIS-UAV θα είναι:

$$\mathbf{h}_{R,U} = \sqrt{\frac{1}{PL_{R,U}}} \left(\sqrt{\frac{\kappa}{1+\kappa}} \mathbf{h}_{R,U}^{LoS} + \sqrt{\frac{1}{1+\kappa}} \mathbf{h}_{R,U}^{NLoS} \right), \quad (3.9)$$

όπου $PL_{R,U} = \overline{PL}(z_U - z_R, d_{R,U})$ το path loss της ζεύξης που έχει προσδιορισθεί πιθανοτικά και κ ο συντελεστής Rician. Επιπλέον, $\mathbf{h}_{R,U}^{LoS} = [1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d_s\phi_{R,U}}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(|M|-1)d_s\phi_{R,U}}]^T$ είναι η συνιστώσα του LoS, με $\phi_{R,U}$ το συνημίτονο την γωνίας αναχώρησης του σήματος από το RIS στο UAV, και $\mathbf{h}_{R,U}^{NLoS} \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ η συνιστώσα του NLoS που ακολουθεί την μιγαδική γκαουσιανή κατανομή.

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, το συνολικό κέρδος ισχύος του καναλιού μεταξύ του χρήστη n και του UAV δίνεται μέσω της σχέσης:

$$G_n = |h_{n,U} + \mathbf{h}_{R,U}^H \mathbf{\Omega} \mathbf{h}_{n,R}|^2. \quad (3.10)$$

3.2.2 Δεύτερο Επίπεδο Επικοινωνίας

Το δεύτερο επίπεδο του IAB δικτύου αφορά την επικοινωνία μεταξύ του UAV και του mBS. Το path loss στην ασύρματη αυτή ζεύξη του backhaul χρησιμοποιεί το πιθανοτικό μοντέλο και ορίζεται ως:

$$PL_{U,m} = \overline{PL}(z_U, d_{U,m}), \quad (3.11)$$

όπου $d_{U,m}$ [m] η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ του UAV και του mBS.

Αντίστοιχα, ο συντελεστής κέρδους του καναλιού $h_{U,m} \in \mathbb{C}$ δίνεται από:

$$h_{U,m} = \sqrt{\frac{1}{PL_{U,m}}} \tilde{h}', \quad (3.12)$$

όπου το $\tilde{h}' \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ δηλώνει το τυχαίο στοιχείο σκέδασης.

Βάση αυτών το συνολικό κέρδος ισχύος του καναλιού μεταξύ του UAV και του mBS δίνεται μέσω της σχέσης:

$$G_U = |h_{U,m}|^2. \quad (3.13)$$

3.3 Επικοινωνιακό Μοντέλο

Στην τελευταία ενότητα αυτού του κεφαλαίου θα ορίσουμε το επικοινωνιακό μοντέλο στα δύο επίπεδα του δικτύου.

Αρχικά για την επικοινωνία μεταξύ των χρηστών και του UAV θεωρούμε, όπως έχουμε αναφέρει πως στον δέκτη του UAV έχει χρησιμοποιηθεί η τεχνική SIC για την αποκωδικοποίηση των λαμβανόμενων σημάτων. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, θεωρούμε πως τα συνολικά κέρδη G_n των χρηστών στο κανάλι είναι ταξινομημένα $G_1 \leq \dots \leq G_n \leq \dots \leq G_{|N|}$ και πως η αποκωδικοποίηση ξεκινά από τον χρήστη με το μεγαλύτερο κέρδος [Vam+17]. Επομένως, ο ρυθμός δεδομένων που έχει επιτευχθεί από τον χρήστη n μέσω της ασύρματης πρόσβασης (R_n^{AC}) θα είναι:

$$R_n^{AC} = \mu W \log_2 \left(1 + \frac{G_n P_n}{\sum_{n'=1}^{n-1} (G_{n'} P_{n'}) + \mu W N_0} \right) [bps], \quad (3.14)$$

όπου $P_n [W]$ η ισχύς μετάδοσης ανερχόμενης ζεύξης του χρήστη n και $N_0 [dBm/Hz]$ η φασματική πυκνότητα ισχύος του Πρόσθετου Γκαουσιανού Λευκού Θορύβου Μηδενικής Μέσης Τιμής (zero-mean Additive White Gaussian Noise - AWGN).

Έστω $P_U [W]$ η ισχύς μετάδοσης του UAV που χρησιμοποιεί για να προωθήσει τα δεδομένα των χρηστών στο mBS, συνεπώς ο ρυθμός δεδομένων που έχει επιτευχθεί από το UAV μέσω της ασύρματου backhaul (R_U^{BH}) θα είναι:

$$R_U^{BH} = (1 - \mu) W \log_2 \left(1 + \frac{G_U P_U}{(1 - \mu) W N_0} \right) [bps]. \quad (3.15)$$

Από τον αθροιστικό ρυθμό δεδομένων R_U^{BH} του UAV, υιοθετούμε μια αναλογικά δίκαιη προσέγγιση και συμπεραίνουμε πως ο ρυθμός δεδομένων που θα επιτύχει κάθε χρήστης n στο ασύρματο backhaul (R_n^{BH}) δίνεται από:

$$R_n^{BH} = \frac{R_n^{AC}}{\sum_{n=1}^{|N|} R_n^{AC}} R_U^{BH} [bps]. \quad (3.16)$$

Με αυτόν τον τρόπο, είναι βέβαιο πως σε ένα χρήστη που θα επιτύχει υψηλό ρυθμό μετάδοσης στην ασύρματη πρόσβαση, θα παραχωρηθεί και ένας ανάλογα υψηλός ρυθμός στο ασύρματο backhaul, έτσι ώστε ο ρυθμός μετάδοσης των χρηστών σε ολόκληρη την επικοινωνία να διατηρηθεί. Αντίστοιχα, ο ρυθμός μετάδοσης του χρήστη n σε ολόκληρη την επικοινωνία (End-to-End) R_n^{E2E} θα είναι ίσος με:

$$R_n^{E2E} = \min(R_n^{AC}, R_n^{BH})[bps]. \quad (3.17)$$

Περιγραφή Προβλήματος και Αλγόριθμου Επίλυσης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί αναλυτικά το πρόβλημα βελτιστοποίησης καθώς και ο αλγόριθμος με τα βήματα που θα το επιλύσει. Στόχος μας είναι να αναπτύξουμε ένα δυναμικό και αναδιαμορφώσιμο πλαίσιο κατανομής πόρων το οποίο θα εξασφαλίζει την παροχή υπηρεσιών στους χρήστες του δικτύου από άκρο σε άκρο [Pap+20]. Για το σκοπό αυτό θα μελετήσουμε δύο διαφορετικές περιπτώσεις, όπου η κάθε μία θα στοχεύει σε διαφορετικές παραμέτρους για το δίκτυο. Στην πρώτη στόχος είναι η μέγιστη ενεργειακή απόδοση στην τοπολογία ενώ στην δεύτερη η επίτευξη βέλτιστου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Και για τις δύο θα περιγραφεί το κατάλληλο αλγοριθμικό πλαίσιο και θα αναδειχθούν με αυτόν τον τρόπο τα οφέλη που παρουσιάζονται για τους χρήστες και το UAV σε κάθε περίπτωση.

4.1 Βελτιστοποίηση Ενεργειακής Απόδοσης Συστήματος

Αρχικά, θα μελετήσουμε την περίπτωση όπου επιδίωξη στο δίκτυο είναι η βέλτιστη ενεργειακή απόδοση από άκρο σε άκρο.

4.1.1 Σχεδιασμός Πλαισίου Επίλυσης

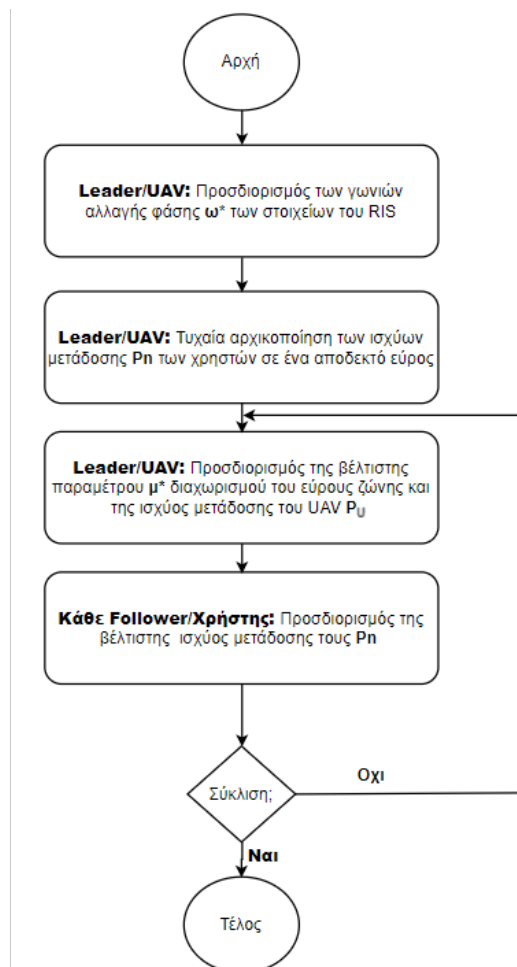
Θα ξεκινήσουμε αναπτύσσοντας το προτεινόμενο δυναμικό και αναδιαμορφώσιμο πλαίσιο διαχείρισης πόρων που μελετάμε. Πιο συγκεκριμένα, επιδιώκουμε να κατανεύουμε δυναμικά τους διαθέσιμους πόρους φάσματος και ισχύος μεταξύ της ασύρματης πρόσβασης και του backhaul. Στο πλαίσιο αυτό, το αντίστοιχο πρόβλημα από κοινού βελτιστοποίησης διατυπώνεται ελέγχοντας ταυτόχρονα:

- (i) Την αλλαγή φάσης ω κάθε στοιχείου του RIS,
- (ii) Την παράμετρο διαχωρισμού εύρους ζώνης μ ,
- (iii) Το διάνυσμα \mathbf{P}_n της ισχύος μετάδοσης των χρηστών στο UAV,
- (iv) Την ισχύ μετάδοσης P_U του UAV προς το mBS.

Το συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης θα μοντελοποιηθεί ως ένα παίγνιο Stackelberg μοναδικού ηγέτη και πολλαπλών ακολούθων. Περιλαμβάνει τρία στάδια, τα οποία είναι ακολουθιακά και περιγράφονται ως εξής:

1. Το UAV, λειτουργώντας ως leader, προσδιορίζει στο πρώτο στάδιο τις βέλτιστες γωνίες αλλαγής φάσης κάθε στοιχείου του RIS, οι οποίες βελτιώνουν την συνολική ισχύ του λαμβανόμενου σήματος και μεταδίδουν τα κατάλληλα σήματα ελέγχου στον ελεγκτή του RIS.
2. Στο δεύτερο στάδιο, το UAV υπολογίζει την παράμετρο διαχωρισμού του εύρους ζώνης και την ισχύς μετάδοσης στο mBS που μεγιστοποιούν την ενεργειακή απόδοση.
3. Τα αποτελέσματα αυτά τροφοδοτούνται στο τρίτο και τελευταίο στάδιο στους χρήστες, οι οποίοι λειτουργούν ως followers, και αυτοί προσδιορίζουν με έναν κατανεμημένο και αυτόνομο τρόπο την ισχύ μετάδοσης τους στην ανερχόμενη ζεύξη ώστε να μεγιστοποιείται και πάλι η ενεργειακή απόδοση.

Σχήμα 4.1: Πλαίσιο Διαχείρισης Πόρων του Δικτύου Από-Άκρο-Σε-Άκρο



Τα δύο τελευταία επίπεδα του παίγνιου Stackelberg παίζονται επαναληπτικά ώστε το σύστημα να συγκλίνει τελικά στο σημείο Ισορροπίας Stackelberg. Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται με την βοήθεια ενός block διαγράμματος το συνολικό πλαίσιο διαχείρισης των πόρων από άκρο σε άκρο και τα στάδια που το δομούν.

Στο πλαίσιο που περιγράφουμε, το περιβάλλον διάδοσης σταματά να αποτελεί μια παθητική εξωγενή οντότητα και μετατρέπεται σε ένα ελεγχόμενο και αναδιαμορφώσιμο στοιχείο με προγραμματιστικές ιδιότητες χάρις την έξυπνη προσαρμογή που πραγματοποιεί το RIS στις γωνίες του. Με αυτόν τον τρόπο, η ποιότητα της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος βελτιώνεται, καταπολεμώντας έτσι τις δυσμενείς συνθήκες διάδοσης λόγω της εξασθένισης στα ασύρματα κανάλια επικοινωνίας, ενώ επιτυγχάνονται ταυτόχρονα μειωμένες παρεμβολές και τιμές στην ισχύ μετάδοσης. Επιπλέον, λόγω της εμφάνισης των RIS και των προηγμένων μεθόδων έξυπνης λήψης αποφάσεων που έχουν υιοθετηθεί, το ασύρματο περιβάλλον και οι πόροι του συστήματος αντιμετωπίζονται ως τμήμα του συνολικού σχεδιασμού του ασύρματου δικτύου, που μπορούν να προσαρμοστούν ώστε να ικανοποιούν συγκεκριμένες απαιτήσεις του συστήματος [VTP19a] και των χρηστών με έναν δυναμικό τρόπο.

4.1.2 Προσαρμογή Γωνιών Αλλαγής Φάσης RIS

Στο πρώτο στάδιο του αλγορίθμου, το UAV προσδιορίζει τις βέλτιστες γωνίες αλλαγής φάσης $\omega^* = [\omega_1, \dots, \omega_m, \dots, \omega_{|M|}]$ των $|M|$ στοιχείων του RIS, οι οποίες βελτιώνουν την συνολική ισχύ του σήματος που λαμβάνει από τους χρήστες. Η επιλογή αυτή έχει σκοπό την υποστήριξη της βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος μέσω της βέλτιστης παραμέτρου διαχωρισμού του εύρους ζώνης μ^* και της βέλτιστης ισχύος P_U^* μετάδοσης του προς το mBS. Για να επιτύχει το UAV να μεγιστοποιήσει την ισχύ του σήματος αρκεί να υπολογίσει τις γωνίες του RIS που μεγιστοποιούν το συνολικό κέρδος ισχύος του καναλιού. Συνεπώς, το UAV καλείται να επιλύσει το εξής πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\max_{\omega} \sum_{n=1}^{|N|} |h_{n,U} + \mathbf{h}_{R,U}^H \Omega \mathbf{h}_{n,R}|^2 \quad (4.1\alpha')$$

$$\text{s.t. } 0 \leq \omega_m < 2\pi, \forall m \in M. \quad (4.1\beta')$$

Για να χειριστούμε πιο εύκολα το πρόβλημα των εξισώσεων (4.1α'),(4.1β'), θέτουμε ως $v_m = e^{j\omega_m}, \forall m \in M$ και ορίζουμε το αντίστοιχο διάνυσμα αλλαγής φάσης $\mathbf{v} = [v_1, \dots, v_m, \dots, v_{|M|}] \in \mathbb{C}^{|M| \times 1}$. Επομένως αντικαθιστώντας το $\hat{\mathbf{h}}_{n,R}^H = \mathbf{h}_{R,U}^H \text{diag}(\mathbf{h}_{n,R}) \in \mathbb{C}^{1 \times |M|}$, το πρόβλημα των εξισώσεων (4.1α'),(4.1β') γράφεται ισοδύναμα ως:

$$\max_{\mathbf{v}} \sum_{n=1}^{|N|} |h_{n,U} + \hat{\mathbf{h}}_{n,R}^H \mathbf{v}|^2 \quad (4.2\alpha')$$

$$\text{s.t. } |v_m| = 1, \forall m \in M, \quad (4.2\beta')$$

όπου η (4.2β') είναι η μοναδιαίου μέτρου ισοδύναμη συνθήκη της (4.1β') και η (4.2α') είναι μια μη-κοίλη (non-concave) συνάρτηση του διανύσματος \mathbf{v} η οποία μαζί με την συνθήκη (4.2β') ορίζει ένα μη-κυρτό (non-convex) σύνολο.

Επομένως, το πρόβλημα βελτιστοποίησης των εξισώσεων (4.2α')-(4.2β') είναι γενικά μη κοίλο και δεν υπάρχει τυπική μέθοδος για να εξάγουμε μια ολική βέλτιστη λύση [WZ19; JYL21]. Για αυτόν τον λόγο, θα υιοθετήσουμε μια αποτελεσματική και χαμηλής πολυπλοκότητας ευριστική μέθοδο [ZWZ20], όπως θα παρουσιαστεί και στην συνέχεια.

Θα θεωρήσουμε την περίπτωση όπου στο σύστημα μας υπάρχει μόνο ένας χρήστης, συμβολίζοντας με $n = 1$. Σε αυτήν την περίπτωση γενικότερα ισχύει πως το κέρδος ισχύος του καναλιού αυτού του μοναδικού χρήστη μεγιστοποιείται όταν τα σήματα του (το απευθείας σήμα (direct) και το σήμα που δημιουργείται από ανάκλαση στο RIS) φτάνοντας στον δέκτη του UAV από διαφορετικά μονοπάτια συνδυάζονται λογικά [ZWZ20; Li+20]. Αυτό συμβαίνει όταν:

$$\angle h_{1,U} = -\angle \hat{\mathbf{h}}_{1,R} + \angle \mathbf{v} \iff \angle \mathbf{v} = \angle h_{1,U} + \angle \hat{\mathbf{h}}_{1,R} \quad (4.3)$$

Ωστόσο, μπορεί εύκολα να εξαχθεί από την σχέση (4.3) πως στην περίπτωση των πολλαπλών χρηστών, υπάρχει ένα διαφορετικό διάνυσμα αλλαγής φάσης \mathbf{v}_n για κάθε χρήστη n το οποίο μεγιστοποιεί το ατομικό κέρδος ισχύος καναλιού του καθένα ξεχωριστά. Το διάνυσμα αυτό δίνεται από την σχέση:

$$\mathbf{v}_n = e^{j h_{n,U}} e^{j \hat{\mathbf{h}}_{n,R}}, \forall n \in N. \quad (4.4)$$

Προφανώς, το διάνυσμα αλλαγής φάσης \mathbf{v}_n διαφέρει για κάθε χρήστη. Επομένως, δεν υπάρχει ένα κοινό διάνυσμα \mathbf{v} το οποίο να μεγιστοποιεί ταυτόχρονα το κέρδος ισχύος του καναλιού για όλους τους $|N|$ χρήστες.

Για επιτύχουμε ισορροπία μεταξύ των διαφορετικών διανυσμάτων \mathbf{v}_n των χρηστών και να εντοπίσουμε μια ολική λύση για το πρόβλημα προσαρμογής αλλαγής φάσης όλων των στοιχείων του RIS, ορίζουμε για κάθε χρήστη n ένα κατάλληλο συντελεστή βάρους $w_n \in [0, 1]$ και υπολογίζουμε τον γραμμικό συνδυασμό των συνολικών διανυσμάτων \mathbf{v}_n των χρηστών ως εξής:

$$\mathbf{v} = \sum_{n=1}^{|N|} w_n \mathbf{v}_n, \quad (4.5)$$

έτσι ώστε να ισχύει πως $\sum_{n=1}^{|N|} w_n = 1$.

Ο τελικός μας σκοπός είναι να προσδιορίσουμε την βέλτιστη τιμή του συντελεστή βάρους w_n κάθε όρου του διανύσματος στη σχέση (4.5) που θα οδηγήσει σε μια υψηλή τιμή για το άθροισμα του κέρδους ισχύος των χρηστών, όπως απαιτείται και από την εξίσωση (4.2α'). Έτσι, το αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης που πρέπει να επιλυθεί για να επιτύχουμε μια αποδοτική και αποτελεσματική προσαρμογή των μετατοπίσεων φάσης των στοιχείων του RIS διατυπώνεται ως:

$$\max_{\mathbf{w}} \sum_{n=1}^{|N|} |h_{n,U} + \mathbf{h}_{R,U}^H \mathbf{\Omega} \mathbf{h}_{n,R}|^2 \quad (4.6\alpha')$$

$$\text{s.t. } 0 \leq w_n \leq 1, \forall n \in N. \quad (4.6\beta')$$

$$\sum_{n=1}^{|N|} w_n = 1, \quad (4.6\gamma')$$

όπου ο πίνακας αλλαγής φάσης $\mathbf{\Omega}$ υπολογίζεται με αντίστροφη επαγωγή ως $\mathbf{\Omega} = \text{diag}(e^{j\angle \mathbf{v}})$. Επιπλέον, το $\mathbf{w} = [w_1, \dots, w_n, \dots, w_{|N|}]$ είναι το διάνυσμα των συντελεστών βάρους που ανατίθενται σε κάθε χρήστη.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που ορίζεται από τις εξισώσεις (4.6α')-(4.6γ') περιλαμβάνει την μη-αρνητική αντικειμενική συνάρτηση (4.6α'), η οποία μπορεί να βελτιστοποιηθεί με έναν ευθύ τρόπο ώστε να καταλήξουμε στα βέλτιστα βάρη \mathbf{w}^* .

4.1.3 Βελτιστοποίηση Ηγέτη (Leader)

Αφού πραγματοποιηθεί η προσαρμογή των μετατοπίσεων φάσης των στοιχείων του RIS, το UAV έχοντας τον ρόλο του leader στο παίγνιο Stackelberg, υπολογίζει την βέλτιστη αναλογία εύρους ζώνης μ^* και την βέλτιστη ισχύ μετάδοσης P_U^* προς το mBS για αυτό. Το UAV θεωρεί γνωστό το διάνυσμα $\mathbf{P}_n = [P_1, \dots, P_n, \dots, P_{|N|}]$ με τις ισχύς μετάδοσης ανερχόμενης ζεύξης των χρηστών και επιδιώκει να μεγιστοποιήσει την ενεργειακή απόδοση. Το αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης, που πρέπει να λυθεί από τον leader, διατυπώνεται ως εξής:

$$\max_{\mu, P_U} EE_U(\mu, P_U) = \frac{\sum_{n=1}^{|N|} R_n^{AC} + R_U^{BH}}{P_U} \quad (4.7\alpha')$$

$$\text{s.t. } 0 \leq \mu \leq 1 \quad (4.7\beta')$$

$$P_U \leq P_U^{max}, \quad (4.7\gamma')$$

$$R_n^{E2E} \geq R_{min}, \forall n \in N. \quad (4.7\delta')$$

Το UAV έχοντας την ικανότητα να ελέγχει τις παραμέτρους του δικτύου που αφορούν τόσο την πρόσβαση όσο και το backhaul, επιδιώκει την μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού δεδομένων που επιτυγχάνεται σε ολόκληρο το δίκτυο ενώ προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει την

ισχύ μετάδοσης του προς το mBS (Σχέση (4.7α')). Η συνθήκη (4.7β') προσδιορίζει το εφικτό εύρος τιμών της παραμέτρου μ διαχωρισμού του εύρους ζώνης ενώ η συνθήκη (4.7γ') εγγυάται ότι η βέλτιστη ισχύς μετάδοσης του UAV δεν θα ξεπεράσει την μέγιστη διαθέσιμη ισχύ του P_U^{max} . Τέλος, η συνθήκη (4.7δ') εξασφαλίζει ότι η βέλτιστη αναλογία διαχωρισμού του εύρους ζώνης ικανοποιεί την απαίτηση QoS για τον από άκρο σε άκρο ρυθμό μετάδοσης των χρηστών R_{min} .

Από την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης που προκύπτει από το σύστημα εξισώσεων (4.7α')-(4.7β') θα προκύψει ο βέλτιστος συντελεστής μ^* διαχωρισμού εύρους ζώνης και η βέλτιστη ισχύς μετάδοσης P_U^* του UAV στο mBS. Για να αποδείξουμε την ύπαρξη μιας βέλτιστης λύσης (μ^*, P_U^*) για το συγκεκριμένο πρόβλημα, παρατηρούμε ότι ο αριθμητής του $EE_U(\mu, P_U)$ αποτελείται από δύο όρους, τα $\sum_{n=1}^{|N|} R_n^{AC}$ και R_U^{BH} . Ωστόσο, βασιζόμενοι στις σχέσεις (3.14) και (3.15), διαπιστώνουμε πως η κοιλότητα του ενός όρους ως προς το μ οδηγεί στην κυρτότητα του άλλου όρου ως προς το μ . Συνεπώς, η συνολική συνάρτηση $EE_U(\mu, P_U)$ δεν μπορεί να καταλήξει σε αυστηρή κυρτότητα κοιλότητας ως προς τις μεταβλητές (μ, P_U) [DPK17].

Για να αντιμετωπίσουμε αυτό το πρόβλημα και να εντοπίσουμε εύκολα μια λύση, αποσυνθέτουμε το πρόβλημα βελτιστοποίησης που παρουσιάζεται στις (4.7α')-(4.7β') σε μια εξαντλητική αναζήτηση της βέλτιστης τιμής του μ πάνω στο χώρο στρατηγικής του και ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με στόχο την εύρεση της βέλτιστης τιμής του P_U . Για πρακτικούς λόγους, ο διαχωρισμός του εύρους ζώνης εκτελείται συνήθως σε ένα πεπερασμένο διακριτό ορισμό (κομμάτια προκαθορισμένων τιμών), και επομένως το μ παίρνει διακριτές τιμές σε ένα πεπερασμένο σύνολο στρατηγιών. Άρα, μπορούμε να θεωρήσουμε κάποιες ενδεικτικές διακριτές τιμές του μ , όπως $\mu = 0.05, 0.1, 0.15, \dots, 1$, και στην συνέχεια να προσδιορίσουμε τις αντίστοιχες βέλτιστες τιμές του P_U^* όπως θα εξηγήσουμε στη συνέχεια.

Αρχικά, θα πρέπει να αποδείξουμε μια σειρά λημμάτων που θα εγγυηθούν την ύπαρξη βέλτιστης λύσης στο πρόβλημα βελτιστοποίησης ως προς το P_U .

Λήμμα 4.1. *Ο αριθμητής της συνάρτησης ενεργειακής απόδοσης EE_U στην σχέση (4.7α'), το $\sum_{n=1}^{|N|} R_n^{AC} + R_U^{BH}$, είναι αυστηρά κοίλη συνάρτηση ως προς το P_U .*

Απόδειξη. Παρατηρώντας τον όρο $\sum_{n=1}^{|N|} R_n^{AC}$ διαπιστώνουμε πως είναι ανεξάρτητος του P_U . Επιπλέον, ο όρος R_U^{BH} είναι κοίλη συνάρτηση ως προς το P_U . Συνεπώς, η συνολική συνάρτηση $\sum_{n=1}^{|N|} R_n^{AC} + R_U^{BH}$ θα είναι αυστηρά κοίλη ως προς το P_U . ■

Λήμμα 4.2. *Η συνάρτηση ενεργειακής απόδοσης EE_U στην σχέση (4.7α') είναι αυστηρά σχεδόν-κοίλη (quasi-concave) ως προς το P_U .*

Απόδειξη. Όπως ορίζεται και στο [BV04], μια συνάρτηση $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ είναι αυστηρά quasi-concave αν το σύνολο υποεπιπέδων της $S_\alpha = \{\mathbf{x} | \mathbf{x} \in \text{dom} f, f(\mathbf{x}) \geq \alpha\}$ είναι αυστηρά κυρτό (convex) για κάθε α , όπου το \mathbf{x} είναι το αντίστοιχο διάνυσμα μεταβλητών.

Αντίστοιχα το σύνολο S_α για την συνάρτηση EE_U της σχέσης (4.7α') ορίζεται ως:

$$S_\alpha = \{P_U | P_U \in \text{dom}EE_U, \frac{g(P_U)}{P_U} \geq \alpha\} \quad (4.8)$$

όπου $g(P_U) = \sum_{n=1}^{|N|} R_n^{AC} + R_U^{BH}$ η συνάρτηση του αθροίσματος των ρυθμών μετάδοσης που αναφέρθηκε και στο Λήμμα 4.1.

Για $\alpha \leq 0$, το S_α είναι προφανώς κυρτό ως προς P_U . Στην περίπτωση που $\alpha > 0$, το σύνολο της σχέσης (4.8) γράφεται ως:

$$S_\alpha = \{P_U | P_U \in \text{dom}EE_U, \alpha P_U - g(P_U) \leq 0\}. \quad (4.9)$$

Όπως αποδείξαμε και στο Λήμμα 4.1 η συνάρτηση $g(P_U)$ είναι αυστηρά κοίλη ως προς P_U . Επομένως, η συνάρτηση $-g(P_U)$ είναι αυστηρά κυρτή ως προς P_U ενώ ο όρος αP_U αυξάνεται γραμμικά με το P_U . Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα, το σύνολο S_α της σχέσης (4.8) να είναι ένα αυστηρά κυρτό σύνολο.

Από όλα τα παραπάνω αποδεικνύεται πως η συνάρτηση EE_U είναι quasi-concave. ■

Λήμμα 4.3. Οι συνθήκες (4.7β')-(4.7δ') σχηματίζουν ένα συμπαγές (κλειστό και οριοθετημένο) και κυρτό σύνολο.

Απόδειξη. Η συνθήκη (4.7β') είναι προφανές πως σχηματίζει ένα συμπαγές σύνολο. Για τις υπόλοιπες συνθήκες θεωρούμε τις εξής συναρτήσεις:

$$\begin{aligned} s^{(1)} &= P_U - P_U^{max} \\ s_n^{(2)} &= R_{min} - R_n^{E2E}, \forall n \in N. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Μπορεί εύκολα να αποδειχθεί πως η συνάρτηση $s^{(1)}$ είναι κυρτή ως προς P_U ενώ οι συναρτήσεις $s_n^{(2)}$ είναι κυρτές ως προς $P_U \forall n \in N$. Συνεπώς τα σύνολα επιπέδων της, που μπορούν να οριστούν γενικά ως:

$$S_0 = \{\mathbf{x} | \mathbf{x} \in \text{dom}f, f(\mathbf{x}) = 0\}. \quad (4.11)$$

για κάθε συνάρτηση f και κάθε διάνυσμα μεταβλητών \mathbf{x} που μπορούμε να θεωρήσουμε, είναι κυρτά σύνολα. Από αυτό αποδεικνύεται και το ζητούμενο. ■

Βασιζόμενοι στα Λήμματα 4.1-4.3 και την προηγούμενη ανάλυση, το πρόβλημα βελτιστοποίησης που ορίζεται από τις σχέσεις (4.7α')-(4.7β') έχει μια βέλτιστη λύση P_U^* , η οποία μπορεί να εντοπιστεί χρησιμοποιώντας υπάρχοντα εργαλεία βελτιστοποίησης κυρτών συναρτήσεων [CBG90]. Επομένως, συνδυάζοντας το αποτέλεσμα της βέλτιστης λύσης P_U^* με την αντίστοιχη τιμή του μ από την οποία προέκυψε, καταλήγουμε στο βέλτιστο συνδυασμό (μ^*, P_U^*) ο οποίος μεγιστοποιεί την ενεργειακή απόδοση $EE_U(\mu, P_U)$.

4.1.4 Βελτιστοποίηση Ακολούθων (Followers)

Στο τελευταίο στάδιο, οι χρήστες αφού έχουν ενημερωθεί από το UAV για το διαχωρισμό του εύρους ζώνης ξεκινούν την δική τους διαδικασία αποφάσεων. Πιο συγκεκριμένα, κάθε χρήστης στοχεύει στην μεγιστοποίηση της ατομικής του ενεργειακής απόδοσης στο τμήμα της πρόσβασης του δικτύου, βελτιστοποιώντας την ισχύ μετάδοσης του στην ανερχόμενη ζεύξη προς το UAV. Επομένως η συνάρτηση ωφέλειας για κάθε χρήστη n μπορεί να εκφραστεί ως:

$$EE_n(P_n, \mathbf{P}_{-n}) = \frac{R_n^{AC}}{P_n}, \quad (4.12)$$

όπου $\mathbf{P}_{-n} = [P_1, \dots, P_{n-1}, P_{n+1}, \dots, P_{|N|}]$ είναι το διάνυσμα με την ισχύ μετάδοσης όλων των χρηστών εκτός του n .

Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ χρηστών περιγράφονται μέσω ενός μη-συνεργατικού παίγνιου G που ορίζεται ως:

$$G = [N, \{A_n\}_{\forall n \in N}, \{EE_n\}_{\forall n \in N}], \quad (4.13)$$

όπου N το σύνολο των παιχτών (στην περίπτωση μας οι χρήστες του δικτύου), $A_n = [0, P_n^{max}]$ το σύνολο στρατηγικών του κάθε χρήστη (το σύνολο των επιτρεπτών επιπέδων για την ισχύ μετάδοσης των χρηστών με μέγιστη διαθέσιμη τιμή την P_n^{max}) και EE_n η συνάρτηση ωφέλειας κάθε χρήστη (η ενεργειακή του απόδοση).

Το μη-συνεργατικό παίγνιο G θα αντιμετωπιστεί ως ένα καταναμημένο πρόβλημα μεγιστοποίησης, στο οποίο κάθε χρήστης n ανανεώνει την τιμή της ισχύος μετάδοσης του P_n ιδιοτελώς, έχοντας ήδη πληροφορίες για την ισχύ μετάδοσης \mathbf{P}_{-n} όλων των υπόλοιπων χρηστών που μεταδίδουν προς το UAV. Στόχος κάθε χρήστη είναι να μεγιστοποιήσει την ενεργειακή του απόδοση.

Το αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης που επιλύει κάθε χρήστης μπορεί να μοντελοποιηθεί ως εξής:

$$\max_{P_n} EE_n(P_n, \mathbf{P}_{-n}) = \frac{R_n^{AC}}{P_n}, \forall n \in N \quad (4.14\alpha')$$

$$\text{s.t. } P_n \leq P_n^{max}, \forall n \in N \quad (4.14\beta')$$

$$G_n P_n - \sum_{n'=1}^{n-1} G_{n'} P_{n'} \geq P_{tot}, n = 2, \dots, |N| \quad (4.14\gamma')$$

$$R_n^{AC} \geq R_{min}, \forall n \in N. \quad (4.14\delta')$$

Εκτός από τον περιορισμό του μέγιστου προϋπολογισμού ισχύος που πρέπει να ικανοποιεί η ισχύς μετάδοσης των χρηστών προς το UAV (συνθήκη 4.14β'), οι συνθήκες (4.14γ')-(4.14δ') ορίζουν μια επιπλέον ομάδα περιορισμών που πρέπει η στρατηγική των χρηστών P_n να ικανοποιεί. Η (4.14γ') εξασφαλίζει ότι η τεχνική SIC πραγματοποιείται με επιτυχία στον δέκτη του UAV, σύμφωνα με την ευαισθησία P_{tot} , ενώ η (4.14δ') εγγυάται την ελάχιστη επιτρεπτή QoS απαίτηση για τον ρυθμό μετάδοσης των χρηστών R_{min} .

Ορίζουμε ως Γ_n τον χώρο στρατηγικών κάθε χρήστη, που σχηματίζεται αν συμπεριλάβουμε τις συνθήκες (4.14γ')-(4.14δ'). Δηλαδή $\Gamma_n = \{(P_n) \text{ ικανοποιεί τις (4.14γ')-(4.14δ')}\}$. Με τον συμβολισμό αυτό ο συνολικός εφικτός χώρος στρατηγικών για κάθε χρήστη n μπορεί να αναδιατυπωθεί ως $\Delta_n = A_n \cap \Gamma_n, \forall n \in N$ ενώ αντίστοιχα το παίγνιο G ως:

$$G = [N, \{\Delta_n\}_{\forall n \in N}, \{EE_n\}_{\forall n \in N}]. \quad (4.15)$$

Για την επίλυση του μη-συνεργατικού παίγνιου G , θα χρησιμοποιήσουμε την τεχνική της Ισορροπίας Nash. Το σημείο Ισορροπίας Nash στην περίπτωση μας είναι το διάνυσμα στρατηγικών $\mathbf{P}_n^* = [P_1, \dots, P_n, \dots, P_{|N|}]$ των χρηστών, από το οποίο κανένας χρήστης δεν έχει κίνητρο να αποκλίνει. Βασιζόμενοι στον γενικό ορισμό (Ορισμός 2.4.4) που έχουμε δώσει σε προηγούμενο κεφάλαιο η ισορροπία Nash για αυτήν την περίπτωση ορίζεται:

Ορισμός 4.7. Το διάνυσμα $\mathbf{P}_n^* = [P_1, \dots, P_n, \dots, P_{|N|}] \in \Delta$, όπου $\Delta = \Delta_1 \times \dots \times \Delta_{|N|}$ είναι *Pure Nash Equilibrium* του μη συνεργατικού παίγνιου G αν $\forall n \in N$ ισχύει ότι:

$$EE_n(P_n^*, \mathbf{P}_{-n}^*) \geq EE_n(P_n, \mathbf{P}_{-n}^*), \forall P_n \in \Delta_n.$$

Για να διευκολυνθούμε περισσότερο σχετικά με την ύπαρξη τουλάχιστον ενός σημείου ισορροπίας Nash για το μη-συνεργατικό παίγνιο G και συνεπώς για τη σύγκλιση των στρατηγικών των χρηστών στην ισορροπία Nash, υιοθετούμε τη θεωρία των γενικευμένων κοίλων παίγνιων n παικτών. Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιήσουμε το Θεώρημα 2.1 το οποίο για το πρόβλημα μας αναδιατυπώνεται ως εξής:

Θεώρημα 4.3 (Θεώρημα Ύπαρξης Μοναδικού Nash Equilibrium). Το μη-συνεργατικό παίγνιο G είναι ένα γενικευμένο κοίλο παίγνιο n παικτών και έχει ένα τουλάχιστον Nash Equilibrium, αν ικανοποιούνται οι εξής συνθήκες:

1. Τα στρατηγικά σύνολα $\Delta_1, \dots, \Delta_{|N|}$ είναι μη-κενά, κυρτά (convex) και συμπαγή υποσύνολα κάποιου πεπερασμένου Ευκλείδειου χώρου,
2. Όλες οι συναρτήσεις ωφέλειας $EE_1, \dots, EE_{|N|}$ είναι συνεχείς στο $\Delta = \Delta_1 \times \dots \times \Delta_{|N|}$,
3. Κάθε συνάρτηση ωφέλειας EE_n είναι σχεδόν κοίλη (quasi-concave) συνάρτηση του P_n στο Δ_n αν όλες οι υπόλοιπες στρατηγικές μείνουν σταθερές.

Απόδειξη. Το παραπάνω Θεώρημα θα αποδειχθεί αξιοποιώντας το περιεχόμενο των Λημμάτων 4.1-4.3 που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Θα προσαρμοστούν κατάλληλα για να ταιριάζουν με την συνάρτηση ενεργειακής απόδοσης μίας μεταβλητής (4.14α') και τις συνθήκες (4.14β')-(4.14δ'). Θα αποδείξουμε ότι ισχύει κάθε μία από τις τρεις συνθήκες του Θεωρήματος ξεχωριστά:

1. Ισχύει αν ακολουθήσουμε την ίδια διαδικασία με το Λήμμα 4.3.

2. Η συνάρτηση ενεργειακής απόδοσης είναι εξ ορισμού συνεχής στο χώρο στρατηγικών των χρηστών Δ .
3. Ισχύει αν ακολουθήσουμε την ανάλυση των Λημμάτων 4.1-4.2, αναδιατυπωμένη κατάλληλα για την περίπτωση συνάρτησης μίας μεταβλητής.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε πως το μη-συνεργατικό παίγνιο G είναι ένα γενικευμένο κοίλο παίγνιο n παικτών και υπάρχει μία τουλάχιστον Ισορροπία Nash για αυτό. ■

Αλγόριθμος 1

- 1: Αρχικοποιήστε την τοπολογία δικτύου της προσομοίωσης, συμπεριλαμβανομένων των θέσεων των χρηστών, του RIS, του UAV και του mBS.
 - 2: Αρχικοποιήστε τις παραμέτρους $\psi, \beta, \eta_{LoS}, \eta_{NLoS}, f_c, c, a_U, \rho, a_R, d_s, W, N_0, P_U^{max}, P_n^{max}, P_{tol}, R_{min}$.
 - 3: Θέστε $ite = 0$.
 - 4: Προσδιορίστε την προσαρμογή μετατόπισης φάσης των στοιχείων του RIS επιλύοντας τις εξισώσεις (4.6α')-(4.6γ') και υπολογίστε τα κέρδη $G_n, \forall n \in N$.
 - 5: Αρχικοποιήστε τυχαία τα $P_n \in \Delta_n, \forall n \in N, P_U \in [0, P_U^{max}]$ και $\mu \in [0, 1]$.
 - 6: **repeat**
 - 7: $ite = ite + 1$
 - 8: **UAV:** Προσδιόρισε τη βέλτιστη παράμετρο διαχωρισμού εύρους ζώνης $\mu^{*(ite)}$ και την βέλτιστη ισχύ μετάδοσης επιλύοντας τις εξισώσεις (4.7α')-(4.7δ').
 - 9: **for** $n \in N$ **do**
 - 10: **Χρήστης:** Προσδιόρισε την βέλτιστη ισχύ μετάδοσης επιλύοντας τις εξισώσεις (4.14α')-(4.14δ').
 - 11: **end for**
 - 12: **until** $|P_U^{*(ite)} - P_U^{*(ite-1)}| \leq \epsilon$ και $|P_n^{*(ite)} - P_n^{*(ite-1)}| \leq \epsilon, \forall n \in N$, όπου ϵ μια μικρή θετική σταθερά ($\epsilon = 10^{-5}$).
-

Η σύγκλιση της στρατηγικής των χρηστών στο Nash Equilibrium επιτυγχάνεται μέσω της υλοποίησης ενός Δυναμικού Αλγορίθμου Βέλτιστης Απόκρισης (Best Response Dynamic Algorithm) [Tsi+15]. Αφού οι χρήστες συγκλίνουν, το σύνολο των βέλτιστων ισχύων μετάδοσης ανερχόμενης ζεύξης \mathbf{P}_n^* που επέλεξαν, τροφοδοτούνται στο UAV για να ξεκινήσει η επόμενη επανάληψη του παίγνιου Stackelberg. Με άλλα λόγια, τα προβλήματα βελτιστοποίησης των εξισώσεων (4.7α')-(4.7δ') και (4.14α')-(4.14δ') επιλύονται επαναληπτικά και το αποτέλεσμα του ενός λειτουργεί ως είσοδος για το άλλο, ώστε να υπάρχει συμμόρφωση στην σχέση μεταξύ του ηγέτη και των ακολούθων. Αυτή η επαναληπτική διαδικασία οδηγεί στην Ισορροπία Stackelberg ($\mu^*, P_U^*, \mathbf{P}_n^*$) με την οποία ολοκληρώνεται η μαθηματική ανάλυση των δύο τελευταίων υποενοτήτων.

Η πλήρης διαδικασία βελτιστοποίησης και η λειτουργία του προτεινόμενου πλαισίου δυναμικής διαχείρισης πόρων συνοψίζεται στον Αλγόριθμο 1. Σημειώνεται πως ο εκθέτης (*ite*) στις μεταβλητές χρησιμοποιείται για να υποδείξει την τιμή της μετά την *ite*ⁿ επανάληψη των σταδίων της βελτιστοποίησης του ηγέτη και των ακολούθων.

4.2 Βελτιστοποίηση Ρυθμού Μετάδοσης Συστήματος

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκε αναλυτικά ένα δυναμικό πλαίσιο διαχείρισης φάσματος και ισχύος που σκοπός του ήταν η επίτευξη βέλτιστης ενεργειακής απόδοσης για το δίκτυο που μελετάμε. Θα ολοκληρώσουμε το κεφάλαιο, επεκτείνοντας το πλαίσιο αυτό ώστε να επιτύχει ένα διαφορετικό στόχο. Στην περίπτωση αυτή επιδιώκουμε την μεγιστοποίηση του ρυθμού απόδοσης του δικτύου από άκρο-σε-άκρο. Από την μία πλευρά, στόχος μας είναι να επιβεβαιωθεί η αναδιαμόρφωση και η προσαρμοστικότητα του πλαισίου βελτιστοποίησης που έχουμε περιγράψει κάτω από διαφορετικούς στόχους βελτιστοποίησης, αποκαλύπτοντας παράλληλα τα οφέλη που εισήχθησαν από τον σωστό χειρισμό του ασύρματου περιβάλλοντος. Από την άλλη πλευρά, επιχειρούμε να εντοπιστεί και να αναδειχθεί η σημασία της βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης σε ένα δίκτυο.

Πιο συγκεκριμένα, βασιζόμενοι στο προηγούμενο πλαίσιο διαχείρισης πόρων θα αναπτυχθεί το αντίστοιχο πλαίσιο που έχει στόχο να μεγιστοποιήσει τον ρυθμό μετάδοσης του IAB δικτύου από άκρο-σε-άκρο. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης σε αυτήν την περίπτωση θα επιλυθεί με έναν κατανεμημένο τρόπο, χρησιμοποιώντας και πάλι τις αρχές των παιγνίων Stackelberg. Στην συνέχεια, θα παρουσιαστεί η διαδικασία τριών σταδίων που περιγράφεται και στο Σχήμα 4.1 με ένα περιεκτικό τρόπο, δίνοντας έμφαση κυρίως στις διαφορές από το πρόβλημα βελτιστοποίησης της Ενότητας 4.1.

Στο πρώτο στάδιο του πλαισίου δυναμικής διαχείρισης πόρων, αντίστοιχα με την προηγούμενη μεθοδολογία πραγματοποιείται η προσαρμογή των γωνιών αλλαγής φάσης των στοιχείων του RIS από το UAV, με την οποία επιτυγχάνεται αυξημένη ισχύς για το σήμα που λαμβάνεται από αυτό. Η προσαρμογή των στοιχείων του RIS εκτελείται ακολουθώντας την προτεινόμενη έξυπνη και χαμηλής πολυπλοκότητας προσέγγιση που περιγράφηκε στην υποενότητα 4.1.2. Στην συνέχεια, ξεκινά το δεύτερο στάδιο και το UAV υπολογίζει την βέλτιστη αναλογία διαχωρισμού εύρους ζώνης και την ισχύ μετάδοσης του προς το mBS. Στόχος είναι να μεγιστοποιηθεί το άθροισμα των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων των χρηστών, θεωρώντας γνωστές τις τιμές των ισχύων μετάδοσης ανερχόμενης ζεύξης αυτών. Το αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης που επιλύεται από το UAV περιγράφεται ως εξής:

$$\max_{\mu, P_U} \sum_{n=1}^{|N|} R_n^{E2E} \quad (4.16\alpha')$$

$$\text{s.t. } 0 < \mu < 1 \quad (4.16\beta')$$

$$P_U \leq P_U^{max}, \quad (4.16\gamma')$$

$$R_n^{E2E} \geq R_{min}, \forall n \in N. \quad (4.16\delta')$$

όπου οι συνθήκες (4.16β')-(4.16δ') είναι σύμφωνες με αυτές που εισήχθησαν στο πρόβλημα βελτιστοποίησης ενεργειακής απόδοσης.

Το πρόβλημα που ορίζουν οι εξισώσεις (4.16α')-(4.16δ') επιλύεται ακολουθώντας ίδια φιλοσοφία με αυτήν που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 4.1.3. Συνεπώς καταλήγουμε στην βέλτιστη λύση (μ^*, P_U^*) .

Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο, οι χρήστες βελτιστοποιούν με έναν αυτόνομο και κατανεμημένο τρόπο την ισχύ μετάδοσης τους προς το UAV, έτσι ώστε ο ατομικός τους ρυθμός μετάδοσης στην πρόσβαση του δικτύου να μεγιστοποιηθεί. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που επιλύει κάθε χρήστης είναι:

$$\max_{P_n} R_n^{AC}(P_n, \mathbf{P}_{-n}), \forall n \in N \quad (4.17\alpha')$$

$$\text{s.t. } P_n \leq P_n^{max}, \forall n \in N \quad (4.17\beta')$$

$$G_n P_n - \sum_{n'=1}^{n-1} G_{n'} P_{n'} \geq P_{tot}, n = 2, \dots, |N| \quad (4.17\gamma')$$

$$R_n^{AC} \geq R_{min}, \forall n \in N. \quad (4.17\delta')$$

Και σε αυτήν την περίπτωση, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους συντονίζονται μέσω ενός μη-συνεργατικού παίγνιου, σύμφωνα με το οποίο κάθε χρήστης n ανανεώνει την τιμή της ισχύς μετάδοσης του (δηλαδή την στρατηγική του) με έναν εγωιστικό τρόπο, γνωρίζοντας την στρατηγική των υπόλοιπων παικτών \mathbf{P}_{-n} . Το αποτέλεσμα του μη-συνεργατικού παίγνιου είναι η Ισορροπία Nash για την στρατηγική όλων των χρηστών, δηλαδή το διάνυσμα $\mathbf{P}_n^* = [P_1, \dots, P_n, \dots, P_{|N|}]$. Η ανάλυση, με την οποία η ύπαρξη μιας τουλάχιστον ισορροπίας Nash και η σύγκλιση σε αυτό το σημείο είναι εξασφαλισμένη, χρησιμοποιεί την τεχνική των γενικευμένων κοίλων παίγνιων n παικτών και είναι ανάλογη με αυτή της ενότητας 4.1.4. Το δεύτερο και το τρίτο στάδιο βελτιστοποίησης εκτελούνται επαναληπτικά και προωθούν τα αποτελέσματα τους μεταξύ των χρηστών και του UAV ώστε το σύστημα να οδηγηθεί τελικά στο συνολικό του Stackelberg Equilibrium $(\mu^*, P_U^*, \mathbf{P}_n^*)$.

Αξιολόγηση Αλγορίθμου και Αριθμητικά Αποτελέσματα

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα αξιολογήσουμε μέσω μοντελοποίησης και προσομοιώσεων την απόδοση και την επίδραση στο σύστημα του δυναμικού και πλήρως αναδιαμορφώσιμου πλαισίου διαχείρισης πόρων που προτάθηκε. Αρχικά, θα παρουσιαστεί η καθαρή απόδοση (Pure Performance) του καταναμημένου παίγνιου Stackelberg καθώς η συμπεριφορά του κατά την σύγκλιση στο σημείο του Stackelberg Equilibrium με στόχο την ενεργειακή απόδοση του IAB δικτύου που μελετάμε. Στην συνέχεια, θα ακολουθήσει μια συγκριτική ανάλυση μεταξύ των δύο διαφορετικών στόχων βελτιστοποίησης που περιγράφηκαν στον προηγούμενο κεφάλαιο (η ενεργειακή απόδοση του συστήματος και ο ρυθμός απόδοσης από άκρο σε άκρο). Τέλος, το προτεινόμενο πλαίσιο θα συγκριθεί με άλλες βασικές προσεγγίσεις διαχείρισης πόρων τόσο ως προς την προσαρμογή της αλλαγής φάσης των στοιχείων του RIS όσο και ως προς τις δυναμικές λύσεις διαχείρισης που παρουσιάστηκαν.

5.2 Παράμετροι Προσομοίωσης

Οι παράμετροι της προσομοίωσης που εκτελέστηκε για την εξαγωγή των αριθμητικών αποτελεσμάτων που θα ακολουθήσουν αρχικοποιήθηκαν ως εξής:

Θεωρώντας ένα τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων, οι τρεις βασικές οντότητες του δικτύου (το RIS, το UAV και το mBS) είναι τοποθετημένες κατά μήκος της γραμμής $y = x$ και οι αποστάσεις τους από την αρχή του συστήματος συντεταγμένων είναι αντίστοιχα τα 100 m , 200 m και 400 m . Επιπλέον, το UAV βρίσκεται σε ύψος 150 m από το έδαφος ενώ το RIS, που αποτελείται από $|M| = 100$ στοιχεία (εκτός αν δηλώνεται διαφορετικά) είναι τοποθετημένο σε ύψος 1.5 m σε κοντινή απόσταση από τους χρήστες. Θεωρούμε και μια ομάδα NOMA από $|N| = 4$ χρήστες, οι οποίοι βρίσκονται σε αυξανόμενη απόσταση από το RIS. Πιο συγκεκριμένα, οι χρήστες βρίσκονται αντίστοιχα σε αποστάσεις $d_1 [m]$, $d_1 + 10 [m]$, $d_1 + 20 [m]$ $d_1 + 30 [m]$ από το RIS, όπου $d_1 = 5\text{ m}$ (εκτός αν δηλώνεται διαφορετικά) η απόσταση του πρώτου χρήστη.

Πίνακας 5.1: Παράμετροι Συστήματος

$\psi = 11.95$	$\beta = 0.14$
$\eta_{LoS} = 3 \text{ dB}$	$\eta_{NLoS} = 23 \text{ dB}$
$f_c = 2 \text{ GHz}$	$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
$\alpha_U = 2$	$\rho = 100$
$\alpha_R = 2.8$	$d_s = \frac{\lambda}{2}$

Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην αξιολόγηση παρουσιάζονται στους πίνακες 5.1 και 5.2. Τέλος, για στατιστικούς λόγους τα αποτελέσματα που θα ακολουθήσουν έχουν προκύψει ως μέσος όρος 100 διαφορετικών εκτελέσεων του μοντέλου των καναλιών.

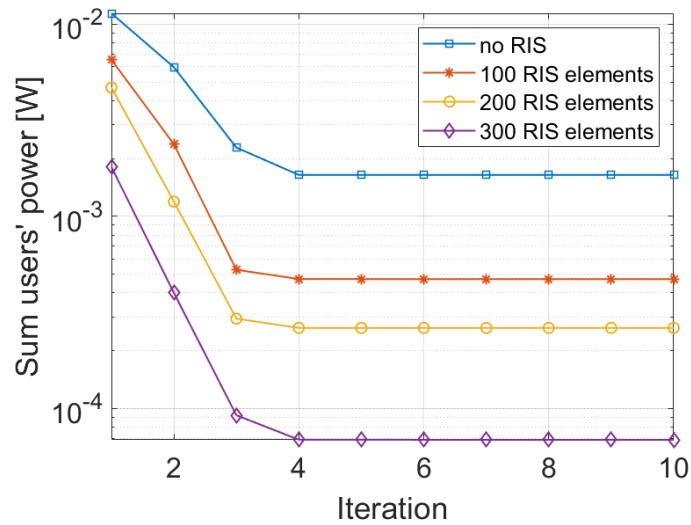
Πίνακας 5.2: Παράμετροι Προσομοίωσης

Παράμετρος	Τιμή
Συνολικό Εύρος Ζώνης Συστήματος	$W = 5 \text{ MHz}$
Φασματική Πυκνότητα Ισχύος	$N_0 = -174 \text{ dBm/Hz}$
Μέγιστη Ισχύς Χρηστών	$P_n^{max} = 24 \text{ dBm}$
Μέγιστη Ισχύς UAV	$P_U^{max} = 46 \text{ dBm}$
Ανοχή δέκτη του UAV	$P_{tol} = -114 \text{ dBm}$
Ελάχιστος Ρυθμός Μετάδοσης Χρηστών	$R_{min} = 1 \text{ Mbps}$

5.3 Καθαρή Αξιολόγηση Διαδικασίας Βελτιστοποίησης

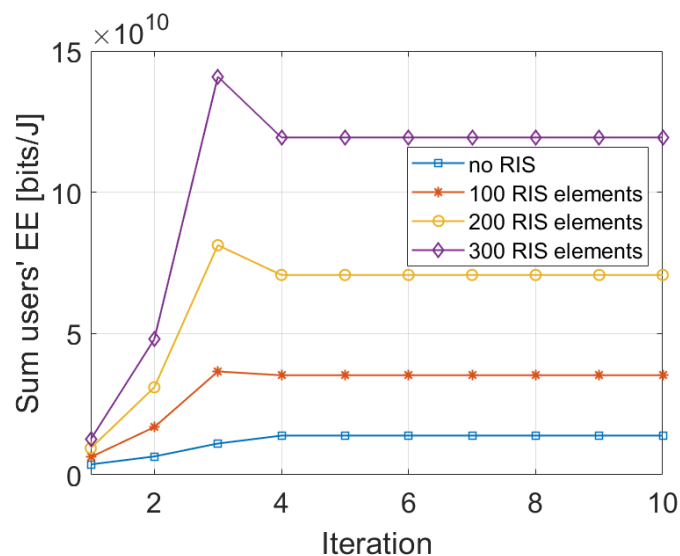
Σε αυτήν την ενότητα, μελετάται η απόδοση της συνολικής διαδικασίας που βασίζεται στο παίγνιο Stackelberg ως προς την ενεργειακή απόδοση του IAB δικτύου. Ταυτόχρονα αξιολογείται η συμπεριφορά της στην σύγκλιση σύμφωνα με τον αριθμό των επαναλήψεων (iterations) που απαιτούνται για να συγκλίνει στο σημείο της Ισοροπίας Stackelberg. Πιο συγκεκριμένα, το γράφημα 5.1 απεικονίζει το άθροισμα των ισχύων μετάδοσης ανερχόμενης ζεύξης των χρηστών ως συνάρτηση των επαναλήψεων που απαιτούνται για την σύγκλιση. Οι διαφορετικές καμπύλες παρουσιάζουν μια ανάλυση ως προς το διαφορετικό πλήθος στοιχείων του RIS $|M| = [100, 200, 300]$, ενώ ο όρος 'no RIS' δηλώνει την περίπτωση όπου δεν υπάρχει RIS στην τοπολογία του δικτύου που προσομοιώνουμε. Από την μια πλευρά, τα αποτελέσματα αναδεικνύουν ότι μετά από ένα μικρό πλήθος επαναλήψεων (4 επαναλήψεις στην συγκεκριμένη περίπτωση) η προτεινόμενη προσέγγιση συγκλίνει στην βέλτιστη λύση. Από την άλλη πλευρά, επιβεβαιώνεται ότι η χρήση του RIS οδηγεί σε σημαντικά μικρότερα επίπεδα ισχύος για τους χρήστες λόγω των αυξημένων τιμών στα κέρδη ισχύος των καναλιών που προκύπτουν από την κατάλληλη προσαρμογή της αλλαγής φάσης των στοιχείων του RIS.

Σχήμα 5.1: Αξιολόγηση της απόδοσης και της συμπεριφοράς σύγκλισης του αλγορίθμου ως προς την ισχύ των χρηστών για διαφορετικό πλήθος στοιχείων του RIS



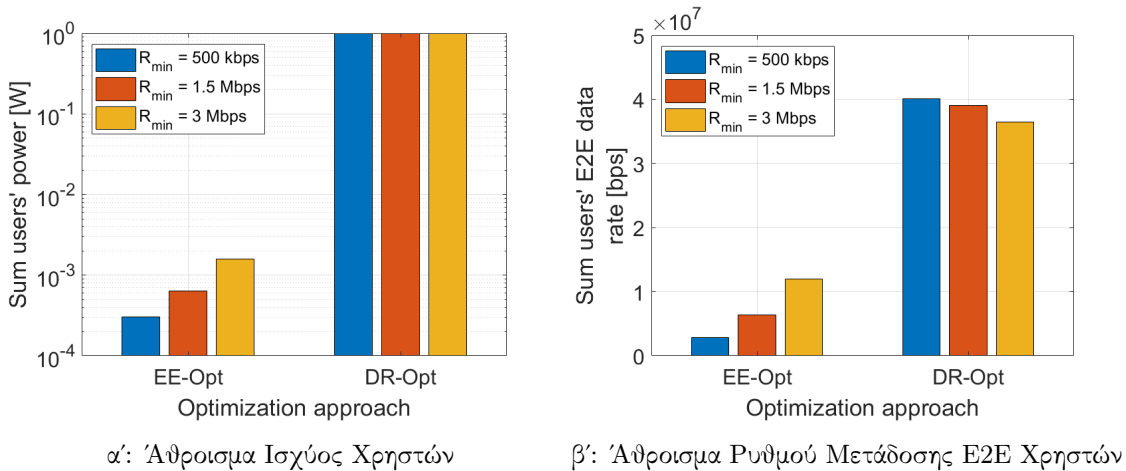
Όπως φαίνεται στο γράφημα 5.2, δεδομένου ότι ο στόχος βελτιστοποίησης είναι η ενεργειακή απόδοση του δικτύου, τα μειωμένα επίπεδα αθροίσματος της ισχύος των χρηστών οδηγεί τελικά σε μια αξιοσημείωτη αύξηση της ενεργειακής τους απόδοσης. Τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου γραφήματος επιδεικνύουν ότι η χρήση του RIS, θεωρώντας $|M| = 300$ στοιχεία σε αυτό, μπορεί να προσφέρει σχεδόν 1.5 τάξεις μεγέθους υψηλότερα αθροίσματα στην ενεργειακή απόδοση των χρηστών σε σύγκριση με την περίπτωση όπου δεν υπάρχει RIS στην τοπολογία.

Σχήμα 5.2: Αξιολόγηση της απόδοσης και της συμπεριφοράς σύγκλισης του αλγορίθμου ως προς την ενεργειακή απόδοση των χρηστών για διαφορετικό πλήθος στοιχείων του RIS



5.4 Συγκριτική Αξιολόγηση Διαφορετικών Στόχων Βελτιστοποίησης

Για να αποκτήσουμε περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την σημασία του στόχου βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης για την συνολική επίδοση του ασυρμάτου δικτύου, θα προχωρήσουμε σε μια συγκριτική μελέτη μεταξύ των ξεχωριστών στόχων βελτιστοποίησης. Δηλαδή την μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης και του ρυθμού μετάδοσης από άκρο σε άκρο που μελετήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα 5.3 εξετάζουμε την απόδοση του δικτύου ως προς το άθροισμα των επιπέδων ισχύος μετάδοσης των χρηστών και το άθροισμα του ρυθμού μετάδοσης τους από άκρο σε άκρο για τους δύο διαφορετικούς στόχους βελτιστοποίησης. Οι στόχοι αυτοί συμβολίζονται αντίστοιχα στα διαγράμματα ως "EE-Opt" και "DR-Opt". Επιπλέον, πραγματοποιείται μελέτη για διαφορετικές τιμές $R_{min} = [0.5, 1.5, 3] Mbps$ της απαίτησης για την ελάχιστη τιμή του ρυθμού μετάδοσης από άκρο σε άκρο. Με αυτόν το τρόπο αναδεικνύεται περισσότερο η βελτιωμένη απόδοση του δικτύου έχοντας ως στόχο βελτιστοποίησης την ενεργειακή απόδοση, θεωρώντας διαφορετικές απαιτήσεις QoS για τους χρήστες.



Σχήμα 5.3: Συγκριτική Αξιολόγηση μεταξύ των δύο στόχων βελτιστοποίησης για διαφορετικές απαιτήσεις ελάχιστου ρυθμού μετάδοσης των χρηστών.

Προφανώς, στην περίπτωση της βελτιστοποίησης "DR-Opt", οι χρήστες αναγκάζονται να μεταδώσουν στην ανερχόμενη ζεύξη χρησιμοποιώντας τη μέγιστη δυνατή τιμή για την ισχύ τους ανεξάρτητα από την ελάχιστη QoS απαίτηση του ρυθμού μετάδοσης R_{min} , όπως φαίνεται και στο γράφημα 5.3α'. Αυτό συμβαίνει διότι, στόχος του αλγορίθμου στην περίπτωση αυτή είναι η μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης των χρηστών χωρίς να λαμβάνει υπόψιν πόσο ενεργειακά αποδοτικό θα είναι το σύστημα και συνεπώς με πόσο μικρή ισχύ θα μεταδίδουν οι χρήστες. Αντίθετα, το άθροισμα των ισχύων μετάδοσης των χρηστών είναι περίπου τριάντα φορές μικρότερο στην περίπτωση του "EE-Opt" σε σχέση με την περίπτωση του "DR-Opt",

ενώ παρατηρείται και μια μικρή αύξηση καθώς ο ελάχιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων αυξάνεται. Η μικρή αυτή αύξηση είναι συνέπεια της απαίτησης που υπάρχει για μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης.

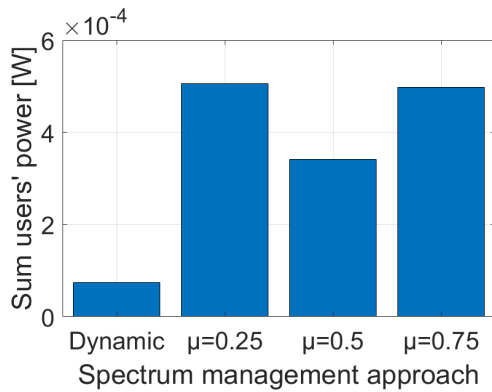
Το άθροισμα των ρυθμών μετάδοσης των χρηστών από άκρο σε άκρο που επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας το άθροισμα ενεργειακών επιπέδων του γραφήματος 5.3α', παρουσιάζεται αντίστοιχα στο διάγραμμα 5.3β'. Μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί πως οι τριάντα φορές αύξηση στα επίπεδα ισχύος των χρηστών έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη ρυθμών μετάδοσης από άκρο σε άκρο σχεδόν μόνο τρία επίπεδα μεγαλύτερους. Έτσι αποδεικνύονται τα σημαντικά οφέλη που προσφέρονται από την βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης. Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρατηρείται μια μικρή μείωση στο άθροισμα των ρυθμών μετάδοσης από άκρο σε άκρο των χρηστών, που προκαλείται καθώς η απαίτηση του R_{min} αυξάνεται. Η μείωση αυτή έρχεται ως αποτέλεσμα της ανάγκης για μεγαλύτερο μέρος του εύρους ζώνης στο τμήμα της πρόσβασης του δικτύου που διαμοιράζεται μεταξύ των χρηστών, οι οποίοι παρεμβάλουν ο ένας στον άλλο. Ταυτόχρονα αυτό οδηγεί στην μείωση του υπολειπόμενου εύρους ζώνης για το τμήμα του backhaul του δικτύου.

5.5 Αξιολόγηση της Δυναμικής Διαχείρισης Φάσματος

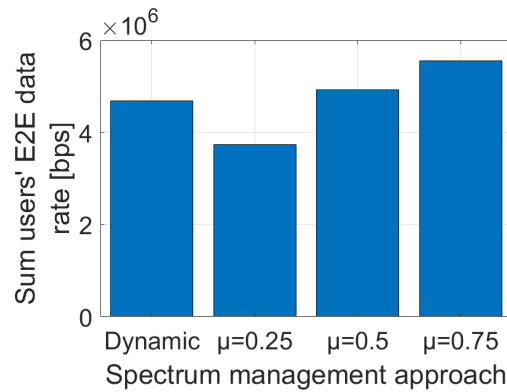
Σε αυτήν την ενότητα, στοχεύουμε στο να διερευνήσουμε την αποτελεσματικότητα και την απόδοση του προτεινόμενου κατανεμημένου πλαισίου διαχείρισης πόρων, όσον αφορά τον δυναμικό διαχωρισμό του φάσματος στην πρόσβαση και το backhaul του δικτύου για την περίπτωση που στόχος βελτιστοποίησης είναι η ενεργειακή απόδοση. Προς αυτήν την κατεύθυνση, η λύση δυναμικής διαχείρισης φάσματος που προτείναμε συγκρίνεται με άλλους ευριστικούς μηχανισμούς που θεωρούν ένα σταθερό διαχωρισμό μεταξύ των δύο τμημάτων του δικτύου (Access και Backhaul). Θεωρούμε συνολικά τρία διαφορετικά σταθερά σχήματα διαχωρισμού του εύρους ζώνης με αντίστοιχους συντελεστές διαχωρισμού ίσους με $\mu = [0.25, 0.5, 0.75]$. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης αυτής παρουσιάζονται στο γράφημα 5.4, όπου ο όρος "Dynamic" αναφέρεται στην προτεινόμενη δυναμική διαδικασία διαχωρισμού. Αυτά έχουν προκύψει παίρνοντας τον μέσο όρο μεταξύ 300 διαφορετικών τοπολογιών IAB δικτύων, θεωρώντας διαφορετικές θέσεις για το mBS, οι οποίες κυμαίνονται από 400m έως 700m μακριά από την αρχή του τρισδιάστατου συστήματος συντεταγμένων. Η διαδικασία αυτή έχει πραγματοποιηθεί για να ληφθούν υπόψιν οι πιθανές διαφορετικές ανάγκες ως προς τον διαχωρισμό του εύρους ζώνης.

Όπως εύκολα μπορούμε να διαπιστώσουμε από το γράφημα 5.4α', η προτεινόμενη δυναμική λύση διαχείρισης φάσματος καταλήγει σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα ισχύος των χρηστών σε σύγκριση με όλα τα σχήματα σταθερού διαχωρισμού του bandwidth. Επιπλέον, παρατηρούμε πολύ μικρές διαφορές στο άθροισμα των ρυθμών μετάδοσης των χρηστών από άκρο σε άκρο που επιτυγχάνονται με τις διαφορετικές προσεγγίσεις διαχείρισης φάσματος (Γράφημα 5.4β'). Ωστόσο, η κυριαρχία της δυναμικής κατανομής φάσματος αναδεικνύεται σαφώς από την ενεργειακή απόδοση που επιτυγχάνεται σε αυτήν την περίπτωση, όπως φαίνεται και στο γράφημα 5.4γ'. Οι τιμές της ενεργειακής απόδοσης με την συγκεκριμένη προσέγγιση ξεπερνούν κατά

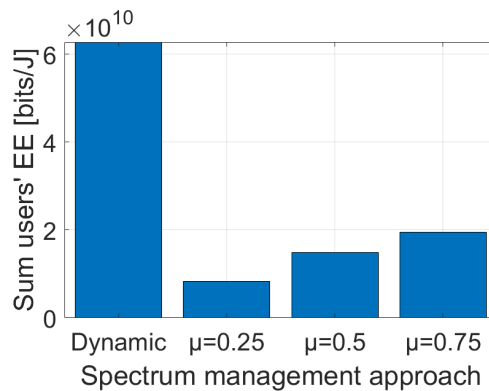
πολύ τις υπόλοιπες και σε συνδυασμό με την μικρή ισχύ μετάδοσης για τους χρήστες κάνει τα οφέλη της πολύ σημαντικά.



α: Άθροισμα Ισχύος Χρηστών



β: Άθροισμα Ρυθμού Μετάδοσης E2E Χρηστών



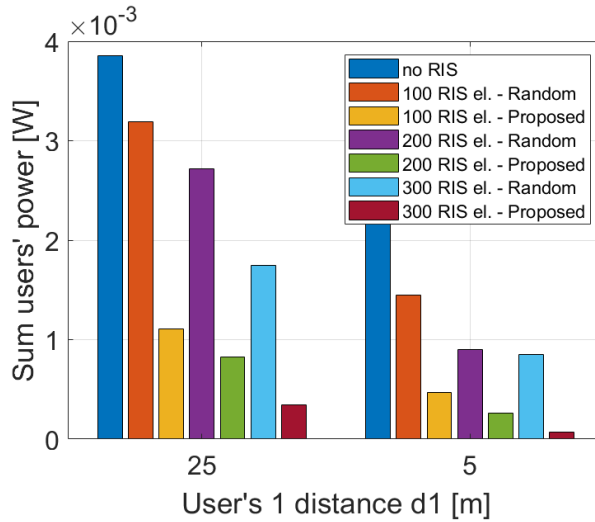
γ: Άθροισμα Ενεργειακής Απόδοσης Χρηστών

Σχήμα 5.4: Συγκριτική Αξιολόγηση μεταξύ της προτεινόμενης δυναμικής λύσης διαχωρισμού φάσματος και προσεγγίσεις σταθερού διαχωρισμού.

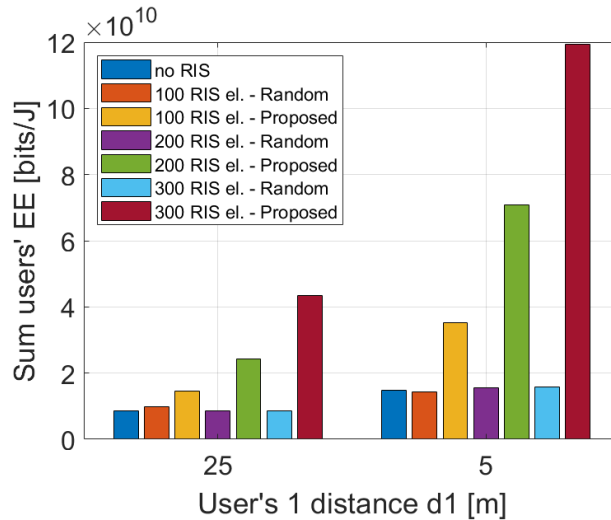
5.6 Αξιολόγηση Προτεινόμενης Προσαρμογής Αλλαγής Φάσης Στοιχείων του RIS

Θα ολοκληρώσουμε την αξιολόγηση του προτεινόμενου πλαισίου με μια εκτενή μελέτη σχετικά με το κέρδος απόδοσης που προσφέρεται χάρις την εισαγωγή του RIS στην τοπολογία του δικτύου καθώς και από την σωστή διαμόρφωση και προσαρμογή της αλλαγής φάσης των στοιχείων του, όπως περιγράφηκε και στην υποενότητα 4.1.2. Για αυτό το σκοπό, θα συγκρίνουμε την προτεινόμενη μέθοδο προσαρμογής της αλλαγής φάσης των στοιχείων του RIS με μια βασική προσέγγιση, όπου επιλέγεται μια τυχαία διαμόρφωση αλλαγής φάσης. Για τη βασική αυτή προσέγγιση στα διαγράμματα έχουμε χρησιμοποιήσει τον συμβολισμό "Random". Στο γράφημα 5.5, κατάλληλα αποτελέσματα που αντιστοιχούν στα δύο διαφορετικά

σχήματα προσαρμογής εξάγονται θεωρώντας διαφορετικό πλήθος για τα στοιχεία του RIS $M = [100, 200, 300]$ και διαφορετικές αποστάσεις των χρηστών από αυτό. Τα διαφορετικά σενάρια αποστάσεων των χρηστών υποδεικνύονται μέσω της απόστασης $d_1[m]$ του πρώτου χρήστη από το RIS κατά μήκος του άξονα x . Επιπλέον, περιλαμβάνεται η γενική περίπτωση, όπου δεν υπάρχει RIS στην τοπολογία του δικτύου που προσομοιώνουμε, ως σενάριο αναφοράς.



α': Άθροισμα Ισχύος Χρηστών



β': Άθροισμα Ενεργειακής Απόδοσης Χρηστών

Σχήμα 5.5: Συγκριτική Αξιολόγηση μεταξύ της προτεινόμενης προσαρμογής της αλλαγής φάσης των στοιχείων του RIS και τυχαίων διαμορφώσεων των γωνιών, για διαφορετικά πλήθη στοιχείων του RIS και διαφορετικές αποστάσεις των χρηστών από το UAV.

Πιο συγκεκριμένα, στο γράφημα 5.5α' το άθροισμα των επιπέδων της ισχύος των χρηστών απεικονίζεται ως συνάρτηση των διαφορετικών σχημάτων προσαρμογής της αλλαγής φάσης και τις διαφορετικές αποστάσεις των χρηστών. Προφανώς, καθώς το πλήθος των στοιχείων

του RIS αυξάνεται, το άθροισμα της ισχύος μετάδοσης ανερχόμενη ζεύξης των χρηστών μειώνεται, οδηγώντας αντίστοιχα στο υψηλό άθροισμα για την ενεργειακή απόδοση όπως φαίνεται και στο γράφημα 5.5β'. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρείται επίσης καθώς μειώνεται η απόσταση των χρηστών από το RIS. Γενικότερα, τα παραπάνω διαγράμματα αναδεικνύουν τα οφέλη της προτεινόμενης προσέγγισης για τις γωνίες του RIS σε σχέση με την τυχαία επιλογή γωνιών.

6.1 Σύνοψη

Μεγάλο πλήθος τεχνολογιών εμφανίστηκαν πρόσφατα, οι οποίες διαμορφώνουν σταδιακά την εποχή των μελλοντικών ασύρματων δικτύων. Πιθανοί υποψήφιοι τέτοιων τεχνολογιών αποτελούν το πρότυπο ανάπτυξης δικτύων Ολοκληρωμένης Πρόσβασης (Integrated Access and Backhaul - IAB) και οι Προγραμματιζόμενες Έξυπνες Επιφάνειες (Reconfigurable Intelligent Surfaces). Στην παρούσα διπλωματική, προσδιορίσαμε τις δυνατότητες που προσφέρει η από κοινού ένταξη τους στα μελλοντικά περιβάλλοντα ασυρμάτων δικτύων, μέσω της μελέτης ενός IAB δικτύου που περιλαμβάνει UAV και υποβοηθάται από ένα RIS. Στόχος ήταν η βελτίωση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης του δικτύου κατά μήκος της ασύρματης πρόσβασης και του backhaul του δικτύου. Για το σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε ένα δυναμικό πλαίσιο διαχείρισης πόρων, που βασίστηκε κυρίως στις έννοιες της αναδιαμόρφωσης και της προσαρμογής, το οποίο ελέγχει κατάλληλα την αλλαγή φάσης των στοιχείων του RIS, τον διαχωρισμό του εύρους ζώνης μεταξύ της ασύρματης πρόσβασης και του backhaul και τις τιμές της ισχύς μετάδοσης τόσο των χρηστών όσο και του UAV. Για να αντιμετωπίσουμε αποδοτικά το από κοινού πρόβλημα βελτιστοποίησης, προτείναμε μια κατανεμημένη διαδικασία βελτιστοποίησης η οποία ακολουθεί τις αρχές των παίγνιων Stackelberg και πραγματοποιεί την κατανομή των πόρων του δικτύου σε διαφορετικά στάδια.

6.2 Συμπεράσματα

Από την υλοποίηση του αλγοριθμικού πλαισίου που περιγράφηκε και την πραγματοποίηση μιας σειράς προσομοιώσεων καταλήξαμε σε ένα μεγάλο πλήθος αριθμητικών αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα αυτά αναδεικνύουν τα πλεονεκτήματα και τα κέρδη στην απόδοση που προκύπτουν από την παραπάνω διαδικασία και την δυναμική διαχείριση πόρων στο IAB δίκτυο που περιλαμβάνει UAV και υποβοηθείται από ένα RIS. Πιο συγκεκριμένα προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

1. Το αλγοριθμικό πλαίσιο που παρουσιάστηκε συγκλίνει πάντα στην βέλτιστη λύση μετά από μικρό αριθμό επαναλήψεων.
2. Η χρήση του RIS στο δίκτυο μειώνει σημαντικά τις ενεργειακές απαιτήσεις των χρηστών. Η παρουσία του βοηθά ώστε οι χρήστες να μεταδώσουν τα δεδομένα με μικρότερη ισχύ ενώ βελτιώνεται ταυτόχρονα με αυτόν τον τρόπο και η ενεργειακή τους απόδοση.
3. Τόσο η αύξηση των στοιχείων (elements) του RIS όσο και μείωση της απόστασης του από τους χρήστες οδηγεί σε μειωμένα επίπεδα ισχύος για τους χρήστες.
4. Η επιλογή της βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης του δικτύου προσφέρει συνολικά περισσότερα οφέλη σε σχέση με την βελτιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης από άκρο σε άκρο.
5. Η προτεινόμενη δυναμική προσέγγιση διαχωρισμού του εύρους ζώνης είναι ενεργειακά αποδοτικότερη συγκριτικά με την επιλογή του σταθερού διαχωρισμού.
6. Η μεθοδολογία για την προσαρμογή της αλλαγής φάσης των στοιχείων του RIS που χρησιμοποιήθηκε είναι πιο επικερδής για το δίκτυο καθώς αυξάνει σε μεγάλο βαθμό την ενεργειακή απόδοση των χρηστών του. Η επιλογή τυχαίων γωνιών από την άλλη περιορίζει σε μεγάλο βαθμό τα οφέλη αυτά.

6.3 Μελλοντική Έρευνα

Μελλοντικές επεκτάσεις την παρούσας διπλωματικής περιλαμβάνουν την εισαγωγή πολλών UAVs και RISs στην τοπολογία του δικτύου, υπονοώντας την ανάγκη για έξυπνες λύσεις διαχείρισης πόρων που λαμβάνουν υπόψιν τους αυξημένους βαθμούς ελευθερίας του δικτύου, την πολυπλοκότητα αυτού καθώς και την ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας. Άλλες μελλοντικές έρευνες περιλαμβάνουν την χρήση του RIS ως μια οντότητα του δικτύου που διευκολύνει την προληπτική μεταβίβαση διαχείρισης της κίνησης δεδομένων των χρηστών, αντί να χρησιμοποιείται απλά για να βελτιστοποιεί διαφορετικές μετρικές του δικτύου. Τέλος, η πρόκληση της εύρεσης των άνω και κάτω ορίων για την βέλτιστη προσαρμογή φάσης των στοιχείων του RIS, αποτελεί ένα άλλο σημαντικό και άλυτο πρόβλημα στην παρούσα βιβλιογραφία που πρέπει να αντιμετωπιστεί προκειμένου αποκομίσουμε πλήρως τα οφέλη των RIS και να τα εκμεταλλευτούμε στο έπακρο.

Βιβλιογραφία

- [3GP18] 3GPP. *Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Study on Integrated Access and Backhaul; (Release 16)*. Technical Specification (TS) 38.874. Version 16.0.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Dec. 2018.
- [ATP18] Pavlos Athanasios Apostolopoulos, Eirini Eleni Tsiropoulou, and Symeon Papavassiliou. “Demand response management in smart grid networks: A two-stage game-theoretic learning-based approach”. In: *Mobile Networks and Applications* (2018), pp. 1–14.
- [ATP20] Pavlos Athanasios Apostolopoulos, Eirini Eleni Tsiropoulou, and Symeon Papavassiliou. “Risk-Aware Data Offloading in Multi-Server Multi-Access Edge Computing Environment”. In: *IEEE/ACM Transactions on Networking* 28.3 (2020), pp. 1405–1418. DOI: 10.1109/TNET.2020.2983119.
- [BD21] S. J. Brams and . Morton D. Davis. “Game theory”. In: *Encyclopedia Britannica* (2021).
- [BÖL20 α] Emil Björnson, Özgecan Özdogan, and E. Larsson. “Intelligent Reflecting Surface Versus Decode-and-Forward: How Large Surfaces are Needed to Beat Relaying?”. In: *IEEE Wireless Communications Letters* 9 (2020), pp. 244–248.
- [BÖL20 β] Emil Björnson, Özgecan Özdogan, and Erik G. Larsson. “Reconfigurable Intelligent Surfaces: Three Myths and Two Critical Questions”. In: *IEEE Communications Magazine* 58.12 (2020), pp. 90–96. DOI: 10.1109/MCOM.001.2000407.
- [BV04] Stephen Boyd and Lieven Vandenberghe. *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004.
- [CBG90] Thomas Coleman, Mary Ann Branch, and Andrew Grace. In: *Optimization Toolbox For Use with MATLAB: User’s Guide, Version 2* (1990).
- [Che+04] Shih-Fen Cheng, Daniel Reeves, Yevgeniy Vorobeychik, and Michael Wellman. “Notes on Equilibria in Symmetric Games”. In: (Jan. 2004).

- [Di +20] Marco Di Renzo, Konstantinos Ntontin, Jian Song, Fadil H. Danufane, Xuewen Qian, Fotis Lazarakis, Julien De Rosny, Dinh-Thuy Phan-Huy, Osvaldo Simeone, Rui Zhang, Meroaune Debbah, Geoffroy Lerosey, Mathias Fink, Sergei Tretyakov, and Shlomo Shamai. “Reconfigurable Intelligent Surfaces vs. Relaying: Differences, Similarities, and Performance Comparison”. In: *IEEE Open Journal of the Communications Society* 1 (2020), pp. 798–807. DOI: 10.1109/OJCOMS.2020.3002955.
- [Dia+20] Maria Diamanti, Georgios Fragkos, Eirini Eleni Tsiropoulou, and Symeon Papavassiliou. “Unified User Association and Contract-Theoretic Resource Orchestration in NOMA Heterogeneous Wireless Networks”. In: *IEEE Open Journal of the Communications Society* 1 (2020), pp. 1485–1502. DOI: 10.1109/OJCOMS.2020.3024778.
- [DPK17] Panagiotis D. Diamantoulakis, Koralia N. Pappi, and George K. Karagiannidis. “Jointly optimal downlink/uplink design for wireless powered networks”. In: *2017 24th International Conference on Telecommunications (ICT)*. 2017, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICT.2017.7998247.
- [ElM+20] Mohamed A. ElMossallamy, Hongliang Zhang, Lingyang Song, Karim G. Seddik, Zhu Han, and Geoffrey Ye Li. “Reconfigurable Intelligent Surfaces for Wireless Communications: Principles, Challenges, and Opportunities”. In: *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking* 6.3 (2020), pp. 990–1002. DOI: 10.1109/TCCN.2020.2992604.
- [Fou+18] Abdurrahman Fouda, Ahmed Ibrahim, Ismail Guvenc, and Monisha Ghosh. “UAV-Based In-Band Integrated Access and Backhaul for 5G Communications”. In: Aug. 2018, pp. 1–5. DOI: 10.1109/VTCFall.2018.8690860.
- [Gao+20] Xinyu Gao, Yuanwei Liu, Xiao Liu, and Zhijin Qin. “Resource Allocation In IRSs Aided MISO-NOMA Networks: A Machine Learning Approach”. In: *GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference*. 2020, pp. 1–6. DOI: 10.1109/GLOBECOM42002.2020.9348009.
- [Gon+20 α] Shimin Gong, Xiao Lu, Hoang Dinh Thai, Dusit Niyato, Lei Shu, Dong In Kim, and Ying-Chang Liang. “Toward Smart Wireless Communications via Intelligent Reflecting Surfaces: A Contemporary Survey”. In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* PP (June 2020), pp. 1–1. DOI: 10.1109/COMST.2020.3004197.
- [Gon+20 β] Shimin Gong, Xiao Lu, Dinh Thai Hoang, Dusit Niyato, Lei Shu, Dong In Kim, and Ying-Chang Liang. “Toward Smart Wireless Communications via Intelligent Reflecting Surfaces: A Contemporary Survey”. In: *IEEE Communications Surveys Tutorials* 22.4 (2020), pp. 2283–2314. DOI: 10.1109/COMST.2020.3004197.

- [GP19] Bolin Gao and Lacra Pavel. “Discounted Mirror Descent Dynamics in Concave Games”. In: *2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC)*. 2019, pp. 5942–5947. DOI: 10.1109/CDC40024.2019.9029722.
- [Guo+20] Yiyu Guo, Zhijin Qin, Yuanwei Liu, and Naofal Al-Dhahir. “Intelligent Reflecting Surface Assisted NOMA Over Fading Channels”. In: *GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference*. 2020, pp. 1–6. DOI: 10.1109/GLOBECOM42002.2020.9322319.
- [HLS16] Maryam Hamidi, Haitao Liao, and Ferenc Szidarovszky. “Non-cooperative and cooperative game-theoretic models for usage-based lease contracts”. In: *European Journal of Operational Research* 255.1 (2016), pp. 163–174. ISSN: 0377-2217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.04.064>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221716303022>.
- [JYL21] Shuaiqi Jia, Xiaojun Yuan, and Ying-Chang Liang. “Reconfigurable Intelligent Surfaces for Energy Efficiency in D2D Communication Network”. In: *IEEE Wireless Communications Letters* 10.3 (2021), pp. 683–687. DOI: 10.1109/LWC.2020.3046358.
- [KTP15] Georgios Katsinis, Eirini Eleni Tsiropoulou, and Symeon Papavassiliou. “On the problem of resource allocation and system capacity evaluation via a blocking queuing model in D2D enabled overlay cellular networks”. In: *International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless*. Springer. 2015, pp. 76–89.
- [KTP17α] Georgios Katsinis, Eirini Eleni Tsiropoulou, and Symeon Papavassiliou. “Joint resource block and power allocation for interference management in device to device underlay cellular networks: A game theoretic approach”. In: *Mobile Networks and Applications* 22.3 (2017), pp. 539–551.
- [KTP17β] Georgios Katsinis, Eirini Eleni Tsiropoulou, and Symeon Papavassiliou. “Multicell interference management in device to device underlay cellular networks”. In: *Future Internet* 9.3 (2017), p. 44.
- [Lev07] Efe A Ok Levent Kockesen. “An introduction to game theory”. In: *University Efe A. Ok New York University July 8* (2007).
- [Li+20] Sixian Li, Bin Duo, Xiaojun Yuan, Ying-Chang Liang, and Marco Di Renzo. “Reconfigurable Intelligent Surface Assisted UAV Communication: Joint Trajectory Design and Passive Beamforming”. In: *IEEE Wireless Communications Letters* 9.5 (2020), pp. 716–720. DOI: 10.1109/LWC.2020.2966705.
- [Li+21] Sixian Li, Bin Duo, Marco Di Renzo, Meixia Tao, and Xiaojun Yuan. “Robust secure UAV communications with the aid of reconfigurable intelligent surfaces”. In: *IEEE Transactions on Wireless Communications* (2021).

- [Lia+18] Christos Liaskos, Shuai Nie, Ageliki Tsioliaridou, Andreas Pitsillides, Sotiris Ioannidis, and Ian Akyildiz. “A New Wireless Communication Paradigm through Software-Controlled Metasurfaces”. In: *IEEE Communications Magazine* 56.9 (2018), pp. 162–169. DOI: 10.1109/MCOM.2018.1700659.
- [LWS20] Jiun Y. Lai, Wu-Hsiu Wu, and Yu T. Su. “Resource Allocation and Node Placement in Multi-Hop Heterogeneous Integrated-Access-and-Backhaul Networks”. In: *IEEE Access* 8 (2020), pp. 122937–122958. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3007501.
- [LYX20] Wanlu Lei, Yu Ye, and Ming Xiao. “Deep Reinforcement Learning-Based Spectrum Allocation in Integrated Access and Backhaul Networks”. In: *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking* 6.3 (2020), pp. 970–979. DOI: 10.1109/TCCN.2020.2992628.
- [Mad+20] Charitha Madapatha, Behrooz Makki, Chao Fang, Oumer Teyeb, Erik Dahlman, Mohamed-Slim Alouini, and Tommy Svensson. “On Integrated Access and Backhaul Networks: Current Status and Potentials”. In: *IEEE Open Journal of the Communications Society* 1 (2020), pp. 1374–1389. DOI: 10.1109/OJCOMS.2020.3022529.
- [Mah+13] Sabita Maharjan, Quanyan Zhu, Yan Zhang, Stein Gjessing, and Tamer Basar. “Dependable demand response management in the smart grid: A Stackelberg game approach”. In: *IEEE Transactions on Smart Grid* 4.1 (2013), pp. 120–132.
- [NZ08] Pu-yan Nie and Pei-ai Zhang. “A note on Stackelberg games”. In: *2008 Chinese Control and Decision Conference*. 2008, pp. 1201–1203. DOI: 10.1109/CCDC.2008.4597505.
- [Osb09] Martin J. Osborne. *Introduction to Game Theory: International Edition*. OUP Catalogue 9780195322484. Oxford University Press, 2009.
- [Pap+20] Symeon Papavassiliou, Eirini Eleni Tsiropoulou, Panagiotis Promponas, and Panagiotis Vamvakas. “A Paradigm Shift Toward Satisfaction, Realism and Efficiency in Wireless Networks Resource Sharing”. In: *IEEE Network* (2020).
- [PFI19] Alberto Perez, Abdurrahman Fouda, and Ahmed S. Ibrahim. “Ray Tracing Analysis for UAV-Assisted Integrated Access and Backhaul Millimeter Wave Networks”. In: *2019 IEEE 20th International Symposium on “A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks” (WoWMoM)*. 2019, pp. 1–5. DOI: 10.1109/WoWMoM.2019.8792969.
- [Pol+20] Michele Polese, Marco Giordani, Tommaso Zugno, Arnab Roy, Sanjay Goyal, Douglas Castor, and Michele Zorzi. “Integrated Access and Backhaul in 5G mmWave Networks: Potential and Challenges”. In: *IEEE Communications Magazine* 58.3 (2020), pp. 62–68. DOI: 10.1109/MCOM.001.1900346.

- [Ron+21] Henrik Ronkainen, Jonas Edstam, Anders Ericsson, and Christer Östberg. “Integrated Access and Backhaul: A New Type of Wireless Backhaul in 5G”. In: *Frontiers in Communications and Networks* 2 (Apr. 2021), p. 636949. DOI: 10.3389/frcmn.2021.636949.
- [Taf+19] Nikita Tafintsev, Dmitri Moltchanov, M. Gerasimenko, Margarita Gapeyenko, Jing Zhu, Shu-ping Yeh, N. Himayat, Sergey Andreev, Yevgeni Koucheryavy, and Mikko Valkama. “Aerial Access and Backhaul in mmWave B5G Systems: Performance Dynamics and Optimization”. In: (Nov. 2019).
- [Taf+20] Nikita Tafintsev, Dmitri Moltchanov, Mikhail Gerasimenko, Margarita Gapeyenko, Jing Zhu, Shu-ping Yeh, Nageen Himayat, Sergey Andreev, Yevgeni Koucheryavy, and Mikko Valkama. “Aerial Access and Backhaul in mmWave B5G Systems: Performance Dynamics and Optimization”. In: *IEEE Communications Magazine* 58.2 (2020), pp. 93–99. DOI: 10.1109/MCOM.001.1900318.
- [TKP09] Eirini Eleni Tsiropoulou, Timotheos Kastrinogiannis, and Symeon Papavassiliou. “Uplink power control in qos-aware multi-service cdma wireless networks”. In: *Journal of Communications* 4.9 (2009), pp. 654–668.
- [Tsi+15] Eirini Eleni Tsiropoulou, Panagiotis Vamvakas, Georgios K Katsinis, and Symeon Papavassiliou. “Combined power and rate allocation in self-optimized multi-service two-tier femtocell networks”. In: *Computer Communications* 72 (2015), pp. 38–48.
- [Tsi+16] Eirini Eleni Tsiropoulou, John S Baras, Symeon Papavassiliou, and Gang Qu. “On the mitigation of interference imposed by intruders in passive RFID networks”. In: *International Conference on Decision and Game Theory for Security*. Springer. 2016, pp. 62–80.
- [TVP12] Eirini Eleni Tsiropoulou, Panagiotis Vamvakas, and Symeon Papavassiliou. “Energy efficient uplink joint resource allocation non-cooperative game with pricing”. In: *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. IEEE. 2012, pp. 2352–2356.
- [TVP13] Eirini Eleni Tsiropoulou, Panagiotis Vamvakas, and Symeon Papavassiliou. “Joint utility-based uplink power and rate allocation in wireless networks: A non-cooperative game theoretic framework”. In: *Physical Communication* 9 (Dec. 2013), pp. 299–307. DOI: 10.1016/j.phycom.2012.04.006.
- [TVP17α] Eirini Eleni Tsiropoulou, Panagiotis Vamvakas, and Symeon Papavassiliou. “Joint customized price and power control for energy-efficient multi-service wireless networks via S-modular theory”. In: *IEEE Transactions on Green Communications and Networking* 1.1 (2017), pp. 17–28.

- [TVP17β] Eirini Eleni Tsiropoulou, Panagiotis Vamvakas, and Symeon Papavassiliou. “Supermodular Game-Based Distributed Joint Uplink Power and Rate Allocation in Two-Tier Femtocell Networks”. In: *IEEE Transactions on Mobile Computing* 16.9 (2017), pp. 2656–2667. DOI: 10.1109/TMC.2016.2622263.
- [Vam+17] Panagiotis Vamvakas, Eirini Eleni Tsiropoulou, Symeon Papavassiliou, and John S Baras. “Optimization and resource management in NOMA wireless networks supporting real and non-real time service bundling”. In: *2017 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*. IEEE. 2017, pp. 697–703.
- [Van+20] Trinh Van Chien, Thuong Nguyen Canh, Emil Björnson, and Erik G Larsson. “Power control in cellular massive MIMO with varying user activity: A deep learning solution”. In: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 19.9 (2020), pp. 5732–5748.
- [Van+21] Trinh Van Chien, Hien Quoc Ngo, Symeon Chatzinotas, Marco Di Renzo, and Björn Ottersten. “Reconfigurable Intelligent Surface-Assisted Cell-Free Massive MIMO Systems Over Spatially-Correlated Channels”. In: *arXiv preprint arXiv:2104.08648* (2021).
- [VTP18] Panagiotis Vamvakas, Eirini Eleni Tsiropoulou, and Symeon Papavassiliou. “Dynamic provider selection & power resource management in competitive wireless communication markets”. In: *Mobile Networks and Applications* 23.1 (2018), pp. 86–99.
- [VTP19α] Panagiotis Vamvakas, Eirini Eleni Tsiropoulou, and Symeon Papavassiliou. “Dynamic spectrum management in 5G wireless networks: A real-life modeling approach”. In: *IEEE INFOCOM 2019-IEEE Conference on Computer Communications*. IEEE. 2019, pp. 2134–2142.
- [VTP19β] Panagiotis Vamvakas, Eirini Eleni Tsiropoulou, and Symeon Papavassiliou. “Exploiting prospect theory and risk-awareness to protect UAV-assisted network operation”. In: *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2019.1 (2019), pp. 1–20.
- [VTP19Ϸ] Panagiotis Vamvakas, Eirini Eleni Tsiropoulou, and Symeon Papavassiliou. “On controlling spectrum fragility via resource pricing in 5g wireless networks”. In: *IEEE Networking Letters* 1.3 (2019), pp. 111–115.
- [VTP19δ] Panagiotis Vamvakas, Eirini Eleni Tsiropoulou, and Symeon Papavassiliou. “On the prospect of uav-assisted communications paradigm in public safety networks”. In: *IEEE INFOCOM 2019-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. IEEE. 2019, pp. 762–767.

- [VTP19ε] Panagiotis Vamvakas, Eirini Eleni Tsiropoulou, and Symeon Papavassiliou. “Risk-aware resource control with flexible 5G access technology interfaces”. In: *2019 IEEE 20th International Symposium on “A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks” (WoWMoM)*. IEEE. 2019, pp. 1–9.
- [Wei+20] Zhiqiang Wei, Yuanxin Cai, Zhuo Sun, Derrick Wing Kwan Ng, and Jinhong Yuan. “Sum-Rate Maximization for IRS-Assisted UAV OFDMA Communication Systems”. In: *GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference*. 2020, pp. 1–7. DOI: 10.1109/GLOBECOM42002.2020.9322325.
- [WJK16] Andrzej Wilczyński, Agnieszka Jakóbiak, and Joanna Kołodziej. “Stackelberg Security Games: Models, Applications and Computational Aspects”. In: *Journal of Telecommunications and Information Technology* 3 (Sept. 2016), pp. 70–79.
- [WZ19] Qingqing Wu and Rui Zhang. “Intelligent Reflecting Surface Enhanced Wireless Network via Joint Active and Passive Beamforming”. In: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 18.11 (2019), pp. 5394–5409. DOI: 10.1109/TWC.2019.2936025.
- [Yif15] Mu Yifen. “Equilibrium in repeated Stackelberg Public Goods game with two-leaders-one-follower and one-step-memory”. In: *2015 34th Chinese Control Conference (CCC)*. 2015, pp. 9157–9162. DOI: 10.1109/ChiCC.2015.7261088.
- [You+20] Marie-Josepha Youssef, Joumana Farah, Charbel Abdel Nour, and Catherine Douillard. “Full-Duplex and Backhaul-Constrained UAV-Enabled Networks Using NOMA”. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 69.9 (2020), pp. 9667–9681. DOI: 10.1109/TVT.2020.3001432.
- [YXS19] Xianghao Yu, Dongfang Xu, and Robert Schober. “Enabling Secure Wireless Communications via Intelligent Reflecting Surfaces”. In: *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/GLOBECOM38437.2019.9014322.
- [ZA20] Liang Zhang and Nirwan Ansari. “Optimizing the Deployment and Throughput of DBSs for Uplink Communications”. In: *IEEE Open Journal of Vehicular Technology* 1 (2020), pp. 18–28. DOI: 10.1109/OJVT.2019.2954390.
- [ZB13] Quanyan Zhu and T Başar. *Decision and Game Theory for Security*. 2013.
- [ZG11] Yan Zhang and Mohsen Guizani. *Game theory for wireless communications and networking*. CRC press, 2011.
- [ZSB19] Qianqian Zhang, Walid Saad, and Mehdi Bennis. “Reflections in the Sky: Millimeter Wave Communication with UAV-Carried Intelligent Reflectors”. In: *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/GLOBECOM38437.2019.9013626.

- [ZSB20] Qianqian Zhang, Walid Saad, and Mehdi Bennis. “Distributional Reinforcement Learning for mmWave Communications with Intelligent Reflectors on a UAV”. In: *GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference*. 2020, pp. 1–6. DOI: 10.1109/GLOBECOM42002.2020.9348040.
- [ZWZ20] Beixiong Zheng, Qingqing Wu, and Rui Zhang. “Intelligent Reflecting Surface-Assisted Multiple Access With User Pairing: NOMA or OMA?”. In: *IEEE Communications Letters* 24.4 (2020), pp. 753–757. DOI: 10.1109/LCOMM.2020.2969870.

Απόδοση

Δίκτυο Ολοκληρωμένης Πρόσβασης
Προγραμματιζόμενες Έξυπνες Επιφάνειες
Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα
Δότης του IAB
Κόμβος του IAB
Ασύρματη Πρόσβαση
Οπισθοζευτικό Δίκτυο
Υπηρεσίες Ποιότητας Χρηστών
Ανερχόμενη Ζεύξη
Μη Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση
Επικοινωνία Πολλαπλών Βημάτων
Εύρος Ζώνης
Κέρδος Καναλιού
Άμεση Οπτική Επικοινωνία
Μετα-Επιφάνειες
Συνάρτηση Ωφέλειας
Μη-Συνεργατικά Παίγνια
Ισορροπία Nash
Ηγέτης
Ακόλουθος
Κοίλα Παίγνια

Ξενόγλωσσος όρος

Integrated Access and Backhaul (IAB) Network
Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS)
Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)
IAB donor
IAB node
Wireless Access
Backhaul
QoS
Uplink
NOMA
Multihop
Bandwidth
Channel Gain
LOS Communication
Metasurfaces
Payoff Function
Non-Cooperative Games
Nash Equilibrium
Leader
Follower
Concave Games

