



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ενεργειακά Αποδοτικές Επικοινωνίες
Πολλαπλών Χρηστών υποβοηθούμενες από
Έξυπνες Επαναπρογραμματιζόμενες Επιφάνειες
και Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Μαρίας Α. Τσαμπάζη

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

Ενεργειακά Αποδοτικές Επικοινωνίες
Πολλαπλών Χρηστών υποβοηθούμενες από
Έξυπνες Επαναπρογραμματιζόμενες Επιφάνειες
και Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Μαρίας Α. Τσαμπάζη

Επιβλέπων: Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 1η 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 Μαρία Α. Τσαμπάζη, 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)

.....

ΜΑΡΙΑ Α. ΤΣΑΜΠΑΖΗ

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

© 2021– All rights reserved

Αναμφίβολα, η 5η γενιά κυψελοειδούς κινητής τηλεφωνίας (5G), αναμένεται να καλύψει τις ανάγκες για μαζική συνδεσιμότητα των χρηστών στα επερχόμενα δίκτυα πραγμάτων (Internet of Things), τα οποία και αναμένονται να αποτελέσουν τον κορμό των σύγχρονων έξυπνων πόλεων (smart cities). Επομένως, τα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα πρέπει να σχεδιάζονται με τρόπο κατάλληλο έτσι ώστε να ανταποκρίνονται στις παραπάνω ανάγκες με τρόπο ενεργειακά αποδοτικό. Τα Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (Unmanned Aerial Vehicles – UAV), χρησιμοποιούνται ήδη στα παραπάνω περιβάλλοντα έξυπνων πόλεων ως εναέριοι κινητοί σταθμοί βάσης προσφέροντας άμεση (on-demand) συνδεσιμότητα και εξαλείφοντας ταυτόχρονα πιθανά κενά κάλυψης (coverage holes), ακόμα και όταν οι συνθήκες μετάδοσης είναι δυσμενείς. Από την άλλη πλευρά, οι Έξυπνες Επαναπρογραμματιζόμενες Επιφάνειες (Reconfigurable Intelligent Surfaces – RISs), προσφέρουν τη δυνατότητα για έλεγχο του ασύρματου περιβάλλοντος διάδοσης, περιορίζοντας φαινόμενα όπως η σκίαση και οι διαλείψεις που προκαλούν την ανεπιθύμητη εξασθένιση του σήματος. Επιπλέον, η Μη Ορθογωνική Τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης (Non-Orthogonal Multiple Access – NOMA), που χρησιμοποιείται κατά κόρον στα 5G δίκτυα, επιτρέπει τη μαζική σύνδεση και εξυπηρέτηση των χρηστών από τους σταθμούς βάσης. Η αντιμετώπιση του προβλήματος κατανομής πόρων στα ασύρματα δίκτυα μπορεί να πραγματοποιηθεί με μία παιγνιοθεωρητική προσέγγιση, όπως το μη-συνεργατικό παιχνίδι Stackelberg ενός αρχηγού-πολλαπλών ακολούθων, έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί από κοινού τόσο η συνολικά λαμβανόμενη ένταση σήματος των χρηστών στο UAV όσο και η ενεργειακή απόδοση που λαμβάνουν οι χρήστες. Το UAV, ο αρχηγός του προαναφερθέντος παιχνιδιού που είναι και ο σταθμός βάσης, μπορεί με έξυπνο τρόπο να προσδιορίσει κατάλληλα τις βέλτιστες μετατοπίσεις των γωνιών φάσης του RIS έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η προσθετική συλλογή (beamforming) των ανακλώμενων σημάτων, και κατά συνέπεια να μεγιστοποιηθεί η λαμβανόμενη ένταση σήματος στο σταθμό βάσης. Από την άλλη, οι χρήστες, ως ακόλουθοι του παραπάνω παιχνιδιού, έχοντας λάβει γνώση των παραπάνω βέλτιστων γωνιών, μπορούν να βελτιστοποιήσουν την ενεργειακή απόδοση που λαμβάνουν εκπέμποντας με κατάλληλη ισχύ μετάδοσης. Η παρούσα εργασία, διαμέσου μιας μεθοδολογίας προσομοίωσης, καταδεικνύει τη

συνεισφορά των παραπάνω τεχνολογιών ως προς τη λαμβανόμενη ικανοποίηση των χρηστών και την αποταμίευση ενέργειας (power saving).

Λέξεις Κλειδιά

Διαδίκτυο των Πραγμάτων, 5η, 6η και μετέπειτα Γενιές Κυψελοειδών Δικτύων, Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα, Επαναπρογραμματιζόμενες Έξυπνες Επιφάνειες, Έλεγχος Ισχύος, Θεωρία Παιγνίων, Παιχνίδι Στάκελμπεργκ, Μη Ορθογωνική Τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης

Abstract

Undeniably, the 5th Generation of wireless cellular networks (5G) is expected to meet the demands for massive user connectivity in the forthcoming Internet of Things networks, which are expected to become a core component of the smart city environments. Therefore, modern telecommunication systems must be properly designed so as for the aforementioned needs to be met in an energy efficient way. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are already being used in smart cities environments as flying mobile base stations which provide on-demand connectivity and at the same time eradicate presumptuous coverage holes, even in the case where the propagation conditions are unfavorable. On the other hand, Reconfigurable Intelligent Surfaces (RISs) provide the advantage of control over the wireless propagation environment, since they mitigate phenomena such as shadowing and fading which cause undesirable signal attenuation. In addition, the Non-Orthogonal Multiple Access Technique (NOMA), which is widely used in 5G networks, permits the massive connectivity and service of users by the base stations. The distributed resource allocation in wireless networks can be achieved through a game-theoretic approach, such as the non-cooperative Stackelberg Game of a single-leader and multiple-followers, in a way that the achieved signal strength at the UAV and the users' energy efficiency get simultaneously optimized. The UAV, the leader of the Stackelberg Game, is the base station which can determine the optimal phase shifts of the RIS' elements in an intelligent manner so as for the beamforming of the reflected waves to be realized. The outcome of the former action will be the maximization of the total signal strength at the base station. On the other hand, the followers of the aforementioned game, i.e., the users, are already aware of the optimal phase shifts' values, and thus, can optimize their achieved energy efficiency by transmitting with a proper transmission power. In this work, we demonstrate the contribution of the aforementioned technologies towards the received satisfaction of the users and their power savings via a detailed theoretical analysis and numerical results stemming from simulations.

Keywords

Internet of Things, 5G, 6G, B5G, Unmanned Aerial Vehicles, Reconfigurable Intelligent Surfaces, Power Control, Game Theory, Stackelberg Game, Non-Orthogonal Multiple Access Technique

Ευχαριστίες

Ξεκινώντας το κομμάτι των ευχαριστιών, θα ήθελα πρωτίστως να αναφερθώ στον Καθηγητή κ. Συμεών Παπαβασιλείου και να τον ευχαριστήσω για τη δυνατότητα που μου πρόσφερε να εκπονήσω διπλωματική σε ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον ερευνητικό θέμα, που αποτέλεσε το αντικείμενο της διπλωματικής μου, δίνοντάς μου τη δυνατότητα να συνεργαστώ με αξιόλογους ερευνητές όπως η Επικ. Καθηγήτρια κα. Ειρήνη Ελένη Τσιροπούλου και η υποψήφια διδάκτορας κα. Μαρία Διαμαντή. Επιπλέον, εκτός από τους παραπάνω επιστήμονες, θα ήθελα να ευχαριστήσω και όλους τους καθηγητές της σχολής μου για τη γνώση και τα εφόδια που μου προσέφεραν καθόλη τη διάρκεια του κύκλου των σπουδών μου, αλλά κυρίως για την αγάπη που μου εμφύσησαν για το αντικείμενο του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και την έρευνα. Τέλος, θα ήθελα ακόμα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους συμφοιτητές μου Σταύρο Σταύρου, Ανδρέα Χαδούμελλη, Ηλία Τριανταφυλλόπουλο, Χριστόδουλο Σαντοριναίο, Γιώργο Γιαννιό και Δανάη Ευσταθίου για τη συνεργασία και τη βοήθεια που μου πρόσφεραν κατά τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων.

Θα ήθελα όμως κυρίως να αναφερθώ στους δικούς μου ανθρώπους που με στήριξαν με την αγάπη τους καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Θα ξεκινήσω την αναφορά τους εστιάζοντας στην αδελφική μου φίλη Αθανασία Ψωρογιάννη, η οποία στάθηκε στο πλευρό μου τόσο στις δύσκολες όσο και στις ευχάριστες στιγμές, διδάσκοντάς με την έννοια της θυσιαστικής και αληθινής φιλίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμα τους Παναγιώτη Χρ., Χριστίνα Γ., Μαρία Φρ., Γεωργία Χ., Χριστούλα Λ., Καλλιόπη Κ., Ειρήνη Γ., Χαρά Γ., Βασιλεία Ι. και Βασιλεία Λ., για το γεγονός ότι εκτός από εξαιρετικοί άνθρωποι είναι και θαυμάσιοι φίλοι, στους οποίους οφείλω άπειρη ευγνωμοσύνη γιατί ομόρφυναν τη ζωή μου και με βοήθησαν να γίνω ένας καλύτερος άνθρωπος. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω ολόψυχα τον πνευματικό μου πατέρα, π. Αθανάσιο Πολύζο, για το γεγονός ότι βρισκόταν πάντα στο πλευρό μου ενισχύοντας την πίστη μου και προσφέροντάς μου δύναμη και υποστήριξη οποιαδήποτε στιγμή τη ζήτησα.

Κυρίως όμως θα ήθελα να ευχαριστήσω τη μητέρα μου, η οποία πάντα με ενίσχυε και με υποστήριζε σε όλες τις επιλογές μου διδάσκοντάς με το θάρρος και το δυναμισμό που τη

διακρίνει, αλλά και τους αγαπημένους μου παππούδες Σταυρούλα και Αθανάσιο, που όσο ήταν στη ζωή με μεγάλωσαν με περίσσειμα αγάπης και φροντίδας.

Κλείνοντας το κομμάτι των ευχαριστιών, θα ήθελα να αναφέρω πως είναι πάρα πολλοί οι άνθρωποι στους οποίους οφείλω απεριόριστη ευγνωμοσύνη τόσο για τις συμβουλές όσο και για τη βοήθειά τους. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στους κα. Γ. Τόγια, κα. Alice Barneche-Pappas, κο. Ε. Χριστοφόρου, κο. Κ. Πεχμεστζή, π. Αθανάσιο Μελισσάρη, κο. Ν. Πατρικαλάκη, κο. Χ. Φραντζή και κο. Τ. Σινάνη για τη βαθύτατη υποστήριξη και καθοδήγηση. Ήταν τεράστια τιμή για εμένα που γνώρισα τους παραπάνω εξαιρετικούς ανθρώπους και επιστήμονες.

Ωστόσο, αισθάνομαι βαθύτατη ηθική υποχρέωση να ευχαριστήσω ολόθερμα τον καθηγητή μου κύριο Παναγιώτη Κωττή. Ο κύριος Κωττής τόσο με την υψηλή ποιότητα γνώσεων που μου πρόσφερε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου στο Πολυτεχνείο, όσο και με το κύρος και την αμέριστη υποστήριξή του διαδραμάτισε καθοριστικό ρόλο στο ξεκίνημα της μετέπειτα Πολυτεχνείου ακαδημαϊκής μου πορείας. Τον ευχαριστώ βαθύτατα γιατί με δίδαξε πως ο πνευματικός άνθρωπος, εκτός από επιστημονική γνώση διαθέτει αρετές όπως ήθος, καλοσύνη, ευαισθησία και ευγένεια ψυχής, αποτελώντας έτσι για μένα πρότυπο επιστήμονα και κυρίως πρότυπο ενάρετου ανθρώπου.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ από τα βάθη της ψυχής μου σε όλους τους προαναφερθέντες ανθρώπους.

«Υποχρέωσή σου είναι να δουλεύεις πάνω στον εαυτό σου: γι' αυτό έχεις
επιλεχθεί, τα υπόλοιπα είναι στα χέρια του Θεού.
Αυτός που ταπεινώνει τον εαυτό του, θα εξυψωθεί».
-Όσιος Θεοφάνης ο Έγκλειστος-

*Στη μνήμη των ανθρώπων μου, και στο Νικόλαο Φίλη που έκαναν το παραπάνω ρητό πράξη
ζωής*

"Your job is to work upon yourself: for this you are chosen;
the rest is in the hands of God.
He who humbles himself shall be exalted".
-St. Theophan the Recluse-

*Dedicated to the memory of my loved ones who lived by the aforementioned adage, and to
Nikolaos Filis in grateful appreciation*

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract	3
Ευχαριστίες	5
Περιεχόμενα	10
Κατάλογος Σχημάτων	11
1 Εισαγωγή	13
1.1 Πρόλογος	13
1.2 Σχετική Έρευνα	13
1.3 Διάρθρωση της Διπλωματικής Εργασίας	14
2 Κατανομή πόρων στα Ασύρματα 5G και Μετέπειτα Γενεών Δίκτυα	17
2.1 Συνοπτική Περιγραφή των Ασύρματων Κυβελοειδών Δικτύων	17
2.1.1 Γενιές Κυβελωτών Δικτύων στα Ασύρματα Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών	17
2.1.2 Πρώτη Γενιά Κυβελοειδούς Κινητής Τηλεφωνίας (1G)	18
2.1.3 Δεύτερη Γενιά Κυβελοειδούς Κινητής Τηλεφωνίας (2G)	18
2.1.4 Τρίτη Γενιά Κυβελοειδούς Κινητής Τηλεφωνίας (3G)	19
2.1.5 Τέταρτη Γενιά Κυβελοειδούς Κινητής Τηλεφωνίας (4G)	20
2.1.6 Πέμπτη Γενιά Κυβελοειδούς Κινητής Τηλεφωνίας (5G)	20
2.1.7 Μετέπειτα Γενεές Κυβελοειδούς Κινητής Τηλεφωνίας (B5G)	21
2.2 Περιγραφή Μη Επανδρωμένων Εναέριων Οχημάτων	21
2.3 Έξυπνες Επαναπρογραμματιζόμενες Επιφάνειες	23
2.4 Μη Ορθογωνική Τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης	25

2.4.1	Συνοπτική Περιγραφή Τεχνικών Πολλαπλής Πρόσβασης και Εισαγωγή στη Μη Ορθογωνική Τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης (NOMA)	25
2.4.2	Θεμελιώδη Στοιχεία του NOMA	26
2.4.3	Τα πλεονεκτήματα του NOMA	27
2.5	Η συνύπαρξη των UAV, RIS και της τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης NOMA .	28
3	Συνοπτική Περιγραφή της Θεωρίας Παιγνίων και Εισαγωγή στο παιχνίδι Stackelberg	29
3.1	Περιγραφή της Θεωρίας Παιγνίων	29
3.2	Περιγραφή Παιχνιδιού Stackelberg	30
3.3	Περιγραφή Συνάρτησης Ευχαρίστησης	31
4	Ενεργειακά Αποδοτικές Επικοινωνίες Πολλαπλών Χρηστών υποβοηθούμενες από Έξυπνες Επιφάνειες και Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα	33
4.1	Περιγραφή του Πειραματικού Μοντέλου Συστήματος	33
4.2	Περιγραφή χρήσης της τεχνικής NOMA στο προτεινόμενο Πειραματικό Μοντέλο	35
4.3	Παιγνιο-θεωρητική προσέγγιση στο πρόβλημα της κατανομής και του ελέγχου ισχύος των Ασύρματων Δικτύων	36
4.3.1	Διατύπωση του προβλήματος	37
4.3.2	Λύση του Προβλήματος	38
4.3.3	Προτεινόμενος Αλγόριθμος για την Εύρεση του Σημείου Ισορροπίας Stackelberg	39
5	Αριθμητικά Αποτελέσματα	41
5.1	Περιγραφή Παραμέτρων Μοντελοποίησης	41
5.2	Παρουσίαση και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	42
5.2.1	Αξιολόγηση του προτεινόμενου Πειραματικού Μοντέλου ως προς την κατανάλωση ισχύος και το βαθμό ικανοποίησης	42
5.2.2	Αξιολόγηση του προτεινόμενου Πειραματικού Μοντέλου ως προς την κατανάλωση ισχύος και το βαθμό ικανοποίησης για διαφορετικά σενάρια θέσης χρηστών	45
6	Επίλογος	47
6.1	Σύνοψη	47
6.2	Οφέλη του Προτεινόμενου Μοντέλου	47
6.3	Μελλοντικές Προεκτάσεις	48
	Βιβλιογραφία	49
	Γλωσσάριο	61

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Παράδειγμα χρήσης UAV. Πηγή Αναφοράς: [34].	22
2.2	Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης. Πηγή Αναφοράς: [23].	26
2.3	Παράδειγμα Διαδοχικής Ακύρωσης Παρεμβολής στο δέκτη. Πηγή Αναφοράς: [9].	27
2.4	UAV-επικοινωνίες υποβοηθούμενες από το RIS. Πηγή Αναφοράς: [4]	28
5.1	Αξιολόγηση του προτεινόμενου πειραματικού μοντέλου ως προς την ισχύ κατα- νάλωσης και τη λαμβανόμενη ικανοποίηση ανά χρήστη, κάτω από διαφορετικό πλήθος στοιχείων του RIS.	42
5.2	Συνολική Αξιολόγηση του Συστήματος ως προς την ισχύ μετάδοσης και την λαμβανόμενη ικανοποίηση για διαφορετικό πλήθος στοιχείων του RIS.	44
5.3	Αξιολόγηση του προτεινόμενου μοντέλου κάτω από διαφορετικά σενάρια θέσης χρηστών.	45

1.1 Πρόλογος

Αναμφίβολα, η ραγδαία ανάπτυξη της 5ης Γενιάς Κυψελοειδούς Τηλεφωνίας (5G) και η εξέλιξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things) έχουν οδηγήσει στη δημιουργία ενός μεγάλου πλήθους εφαρμογών με στόχο την κάλυψη των αναγκών για μαζική εξυπηρέτηση και συνδεσιμότητα ενός τεράστιου πλήθους ποικίλων συσκευών [27]. Τα μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχημάτα (Unmanned Aerial Vehicles ή εν συντομία UAV), εξαιτίας των εγγενών χαρακτηριστικών τους, όπως το χαμηλό κόστος συντήρησης, η ευελιξία διαχείρισής τους και οι ισχυρές Line-of-Sight συνδέσεις που προσφέρουν [37], παρουσιάζονται ως μία πολλά υποσχόμενη επιλογή για το περιβάλλον των έξυπνων πόλεων (smart cities) ώστε να λειτουργήσουν ως εναέριοι κινητοί σταθμοί βάσης [16],[83].

Άλλη μία επίσης τεχνολογία που αναμένεται να έχει ευρεία χρήση στις επόμενες γενιές ασύρματων κυψελοειδών δικτύων, είναι οι Έξυπνες Επαναπρογραμματιζόμενες Επιφάνειες (Reconfigurable Intelligent Surfaces ή εν συντομία RIS). Οι παραπάνω επιφάνειες αποτελούνται από ένα πλήθος παθητικών ανακλαστικών στοιχείων που είναι κατασκευασμένα από μεταύλικά, και των οποίων οι ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες μπορούν να ρυθμιστούν κατάλληλα με τη χρήση λογισμικού έτσι ώστε να ελεγχθεί το ασύρματο περιβάλλον διάδοσης. Το RIS μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στη μείωση της ισχύς μετάδοσης από την πλευρά των χρηστών, στη βελτίωση της ισχύς ή έντασης σήματος (signal strength), ενώ παράλληλα μπορεί να συντελέσει στην αύξηση της ακτίνας κάλυψης των συσκευών που εξυπηρετούνται από κάποιο σταθμό βάσης [14], ακόμα και σε περιβάλλοντα όπου οι συνθήκες μετάδοσης μπορεί να είναι δυσμενείς εξαιτίας της Non-Line-of-Sight διάδοσης [57].

1.2 Σχετική Έρευνα

Το πρόβλημα της κατανομής πόρων στα ασύρματα δίκτυα αποτελεί ένα ερευνητικό θέμα που εξετάζεται εκτενώς στη βιβλιογραφία [28],[44],[90],[74]. Πρόσφατα, με προοπτικές για εφαρμογή στις επόμενες Γενιές Ασύρματων Κυψελοειδών Δικτύων, μεγάλο ενδιαφέρον έχουν

προσελκύσει οι Έξυπνες Επαναπρογραμματιζόμενες Επιφάνειες (RISs), έτσι ώστε να συνεισφέρουν στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης (energy efficiency), και συνεπώς της αποταμίευσης ενέργειας (power saving) των υπό μελέτη ασύρματων συστημάτων. Ειδικότερα, το πρόβλημα της βελτιστοποίησης ως προς την ισχύ μετάδοσης δεδομένων στην καθοδική ζεύξη (downlink) με επιβαλλόμενους περιορισμούς ως προς το πλήθος των ανακλαστικών στοιχείων του RIS εξετάζεται, κάτω από διαφορετικά σενάρια σχημάτων πολλαπλής πρόσβασης, τα οποία εντάσσονται στις δύο ευρύτερες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης όπως η Ορθογωνική (Orthogonal Multiple Access Technique) και η Μη Ορθογωνική (Non-Orthogonal Multiple Access Technique) [125],[126]. Μία ακόμα ερευνητική προέκταση πάνω στην τεχνολογία των RIS, σχετίζεται με τον τρόπο ομαδοποίησής τους ως προς το συντελεστή ανάκλασης (reflection coefficient) και τη λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης έτσι ώστε να επιτυγχάνονται μεγαλύτεροι ρυθμοί μετάδοσης [113]. Επιπλέον, εστιάζοντας στην ανοδική ζεύξη (uplink), οι ερευνητές της ακόλουθης εργασίας [122] εργάστηκαν ως προς τη συνολική βελτιστοποίηση των ρυθμών μετάδοσης με δεδομένους τους επιβαλλόμενους περιορισμούς από τη Μη Ορθογωνική Τεχνική Πολλαπλή Πρόσβασης (Non-Orthogonal Multiple Access Technique ή εν συντομία NOMA), ενώ στην ακόλουθη εργασία μελετάται ξανά το πρόβλημα της βελτιστοποίησης της ισχύς μετάδοσης με στόχο την ικανοποίηση των QoS αναγκών των χρηστών και την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης (energy efficiency)[116].

Παράλληλα, εκτενώς στη βιβλιογραφία, εξετάζεται ο συνδυασμός των RIS και UAV τεχνολογιών, με στόχο την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης των ασυρμάτων δικτύων [67]. Συγκεκριμένα, στην ακόλουθη ερευνητική εργασία [124], ένας αλγόριθμος ενισχυτικής μάθησης (reinforcement learning algorithm) ακολουθείται με σκοπό να προσδιοριστούν η βέλτιστη θέση και οι ανακλαστικές παράμετροι (reflecting coefficients) των στοιχείων του RIS, το οποίο είναι ενσωματωμένο στο UAV, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η χωρητικότητα (capacity) της υπό μελέτη καθοδικής ζεύξης (downlink). Επιπλέον, μελετάται και η κίνηση του UAV και τα οφέλη που θα μπορούσε να επιφέρει στο πρόβλημα της κατανομής πόρων [109],[20].

1.3 Διάρθρωση της Διπλωματικής Εργασίας

Στην παρούσα εργασία, μελετάμε ένα σύστημα επικοινωνιών πολλαπλών χρηστών υποβοηθούμενο από RIS και UAV, με στόχο να μεγιστοποιήσουμε τη συνολικά λαμβανόμενη ένταση σήματος στο UAV, ενώ παράλληλα ενισχύουμε την ενεργειακή απόδοση (energy efficiency) των χρηστών. Για τη μελέτη του παραπάνω προβλήματος υιοθετούμε μία παιγνιοθεωρητική προσέγγιση, όπου οι χρήστες και το UAV συμμετέχουν σε ένα παιχνίδι Stackelberg ενός αρχηγού-πολλαπλών ακολούθων.

Ειδικότερα, μελετάμε την ανοδική ζεύξη (uplink) μεταξύ του συστήματος επικοινωνίας χρηστών και UAV, όπου οι πρώτοι επιθυμούν να βελτιστοποιήσουν την ενεργειακή τους απόδοση (energy efficiency), ενώ το UAV στοχεύει στη μεγιστοποίηση της έντασης ισχύος που λαμβάνει από τους χρήστες, συνολικά. Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου της από κοινού βελτιστοποίησης των δύο προαναφερθέντων αντικειμένων, θεωρούμε ένα μη-συνεργατικό παι-

χνίδι Stackelberg ενός αρχηγού, πολλαπλών ακολούθων. Το ρόλο του αρχηγού αναλαμβάνει το UAV, που μεγιστοποιεί τη συνολική ένταση ισχύος που λαμβάνει από τους ακολούθους του (τους χρήστες), οι οποίοι με τη σειρά τους προσπαθούν με τρόπο αυτόνομο και κατανεμημένο να μεγιστοποιήσουν την ενεργειακή τους απόδοση και κατ' επέκταση την ευχαρίστηση/ικανοποίηση που λαμβάνουν από την επικοινωνία τους με το UAV. Λύνοντας το πρόβλημα της βελτιστοποίησης στο UAV, καθορίζουμε τις βέλτιστες μετατοπίσεις των γωνιών φάσης του RIS, ενώ λύνοντας το πρόβλημα βελτιστοποίησης από τη μεριά των χρηστών, καθορίζουμε τη βέλτιστη ισχύ μετάδοσης που μεγιστοποιεί το βαθμό ικανοποίησης/ευχαρίστησης που λαμβάνουν οι χρήστες.

Στο κεφάλαιο 2, γίνεται μία εκτενής παρουσίαση των τεχνολογιών UAV και RIS, στο κεφάλαιο 3 παρέχεται μία συνοπτική περιγραφή της Θεωρίας Παιγνίων και του παιχνιδιού Stackelberg, στο κεφάλαιο 4 γίνεται αναλυτική περιγραφή του προτεινόμενου μοντέλου, στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα εξιολόγησης, ενώ τέλος, το κεφάλαιο 6 συνοψίζει την παρούσα εργασία.

Κατανομή πόρων στα Ασύρματα 5G και Μετέπειτα Γενεών Δίκτυα

2.1 Συνοπτική Περιγραφή των Ασύρματων Κυψελοειδών Δικτύων

2.1.1 Γενιές Κυψελωτών Δικτύων στα Ασύρματα Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών

Η έννοια των ασύρματων δικτύων εισήχθη για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία με την άνοδο των δικτύων 0G (Zero Generation Mobile Technology ή Radio Mobile Telephone Systems ή Pre-Cellular Systems) [71] που αποτελούν τον πρόδρομο της σύγχρονης κινητής κυψελοειδούς τεχνολογίας τηλεφωνίας (Modern Cellular Mobile Telephony Technology). Τα παραπάνω δίκτυα έκαναν τη φυσική εμφάνισή τους για πρώτη φορά μετά το Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο [73] και η βασική τους χρήση αφορούσε την εξυπηρέτηση επικοινωνιών αναλογικής μορφής (Analog System Telecommunication) κυρίως σε οχήματα στρατιωτικού τύπου [89], παρέχοντας αποκλειστικά και μόνο την ανταλλαγή δεδομένων φωνής (Voice Communication). Μεταγενέστερα, η χρήση των 0G δικτύων επεκτάθηκε σε περισσότερες εφαρμογές "Citizens Band Radio (CB-radio)", ενώ οι βασικές παρεχόμενες υπηρεσίες ήταν τα PTT (Push to Talk), MTS (Mobile Telephone System), IMTS (Improved Mobile Telephone Service), AMTS (Advanced Mobile Telephone System), OLT (Offentlig Landmobil Telefoni/ Public Land Mobile Telephony), MTD (Mobile Telephony System). Το τηλεπικοινωνιακό σύστημα αυτών των δικτύων ήταν ιδιαίτερος απλό, καθώς αποτελούταν από ένα πομπό και ένα δέκτη, μία κεραία, ομοαξονικό καλώδιο, ακουστικό τηλεφώνου και μπαταρία. Τα διαθέσιμα κανάλια επικοινωνίας δεν μπορούσαν να ξεπεράσουν τα 25, ενώ μια επιτυχής σύνδεση στο τοπικό τηλεφωνικό δίκτυο απαιτούσε την ύπαρξη ενός ισχυρού πομποδέκτη (transceiver) από τη μεριά του πομπού, ο οποίος έπρεπε απαραίτητα να βρίσκεται εντός μιας περιοχής κάλυψης μικρότερης των 20 χλμ.[76]. Συνεπώς, τόσο οι οικονομικοί όσοι και οι πρακτικοί περιορισμοί που σχετίζονται με την περιοχή κάλυψης, τα διαθέσιμα κανάλια επικοινωνίας και το διαθέσιμο εύρος ζώνης (bandwidth) δεν επέτρεπαν την εξυπηρέτηση μεγάλου πλήθους χρηστών. Τέλος, ένα επίσης

σημαντικό μειονέκτημα που κλήθηκαν να αντιμετωπίσουν οι επόμενες γενιές αποτελούσε η έλλειψη δυνατότητας "Handover" και "Roaming" για κινητούς χρήστες μεταξύ των σταθμών βάσεων εντός και εκτός των κυψελών, αντίστοιχα[73].

2.1.2 Πρώτη Γενιά Κυψελοειδούς Κινητής Τηλεφωνίας (1G)

Η πρώτη γενιά κυψελοειδούς κινητής τηλεφωνίας (First Generation of Wireless Cellural Technology ή First Generation of Wireless Networking ή First Generation Mobile Technology) ήταν η πρώτη τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε για κινητές συσκευές όπως τα κινητά τηλέφωνα (cellphones) το 1980 και ολοκληρώθηκε το 1990 με την άνοδο της τεχνολογίας Δεύτερης Γενιάς (2G). Όπως ο προκάτοχός της, το 0G, έτσι και η Πρώτη Γενιά χρησιμοποιούσε αναλογικά ραδιοκύματα για μετάδοση φωνής, εντός μίας χώρας, η οποία προκειμένου να μεταδοθεί, διαμορφώνοταν σε μια υψηλότερη συχνότητα περίπου 150 MHz. Πράγματι, τα συστήματα πρόσφεραν τη δυνατότητα στους σταθμούς βάσης για "Handover" και "Roaming" εντός μιας μεγάλης έκτασης 10 έως 25 χλμ. χωρισμένης σε κυψέλες, αλλά δεν ήταν εφικτή η μεταγωγή σε σταθμό γειτονικής ή άλλης χώρας. Το διαθέσιμο φάσμα στις κυψέλες χωριζόταν σε ένα πλήθος από κανάλια, τα οποία ήταν συγκεκριμένα για κάθε κυψέλη, και ήταν επιτρεπτή η επαναχρησιμοποίηση συχνότητας εκπομπής (frequency reuse), αλλά μεταξύ κοντινών και όχι γειτονικών κυψελών, ενώ οι ταχύτητες μετάδοσης δεν ξεπερνούσαν τα 2.4kbps [89]. Η μετάδοση γινόταν μεταξύ (σταθερών) σταθμών βάσης (-fixed- radio towers) με μεταγωγή πακέτων (packet switching), ενώ η τεχνική πρόσβασης που χρησιμοποιούταν ήταν η FDMA (frequency division multiple access). Άλλες τεχνολογίες που ήταν διαθέσιμες στο 1G ήταν οι Advance Mobile Phone Service (AMPS-USA), Nordic Mobile Telephone (NMT), Total Access Communication System (TACS), Radio Telefono Mobile Integrato (RTMI), Radiocom2000[76]. Τα βασικά μειονεκτήματα που οδήγησαν στην ανακάλυψη της επόμενης γενιάς ήταν η χαμηλή χωρητικότητα, το χαμηλό QoS - Quality of Service (κακή ποιότητα ήχου και ανεπιθύμητος θόρυβος), το μη αξιόπιστο και μη ευέλικτο handover, η μικρή διάρκεια μπαταρίας, οι μεγάλες και βαριές συσκευές, και τέλος, προβλήματα σχετιζόμενα με την ασφάλεια δικτύων, καθώς το λαμβανόμενο σήμα επαναμεταδιδόταν στο σταθμό βάσης και συνεπώς κάποιος κακόβουλος χρήστης (eavesdropper) με ένα δέκτη all-band receiver μπορούσε να ακούσει όλες τις λαμβανόμενες συχνότητες και να υποκλέψει τα δεδομένα[73][89].

2.1.3 Δεύτερη Γενιά Κυψελοειδούς Κινητής Τηλεφωνίας (2G)

Η Δεύτερη Γενιά κυψελοειδούς κινητής τηλεφωνίας (Second Generation Cellular Network ή Second Generation Wireless Telephone Technology ή Second-Generation Wireless Cellphones) αφορούσε την ψηφιακή μετάδοση δεδομένων και βασίστηκε στην τεχνολογία GSM (Global System for Mobile Communication), η οποία και «έλυσε» το πρόβλημα του "Roaming", επιτρέποντας στους χρήστες να χρησιμοποιούν τα κινητά τους τηλέφωνα σε διάφορα μέρη του πλανήτη [73]. Στα δίκτυα αυτά, για πρώτη φορά εισήχθη η ιδέα της SIM (Subscriber Identity Module), προκειμένου με κάποιο τρόπο να διασφαλιστεί η «ασφάλεια» της επικοινωνίας,

καθώς ο κάθε χρήστης που επικοινωνεί καθορίζεται μοναδικά από ένα αναγνωριστικό κωδικό (identification number) που ονομάζεται International Mobile Subscriber Identity (IMSI) και το οποίο αποτελεί την «ταυτότητα» κάθε συνδρομητή στα κυβελωτά δίκτυα [76]. Το βασικό τους πλεονέκτημα σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές ήταν αφενός η δυνατότητα ψηφιακής κρυπτογράφησης των τηλεφωνικών κλήσεων για τη διασφάλιση της ασφαλούς επικοινωνίας πομπού-δέκτη, αλλά και η περισσότερο αποτελεσματική «εκμετάλλευση» του φάσματος που επέτρεψε ακολούθως τη δημιουργία Data Services, όπως μηνύματα κειμένου SMS (Short Message Service) και μηνύματα εικόνας MMS (Multimedia Messaging Service), με τις ταχύτητες μετάδοσης να φτάνουν μέχρι και τα 384kbps (2.5G)[73]. Οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιούσαν τα 2G δίκτυα ήταν οι TDMA (Time Division Multiple Access) και CDMA (Code Division Multiple Access)[73], ενώ ακόμα υπήρχε η δυνατότητα για error detection και error correction [73]. Τα 2.5G - GPRS (General Packet Radio Service) δίκτυα επέτρεψαν τη βελτίωση των ρυθμών μετάδοσης, τη μεταγωγή κυκλώματος και τη μεταγωγή πακέτων και παρείχαν πρόσβαση στον παγκόσμιο ιστό World Wide Web για διαδικτυακή επικοινωνία όπως το e-mail, ενώ επιπλέον υπήρχε και η δυνατότητα για mobile games. Η τελευταία προσθήκη στο 2G ήταν το 2.75 – EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution), που μείωσε το χρόνο μετάδοσης δεδομένων [76].

2.1.4 Τρίτη Γενιά Κυβελοειδούς Κινητής Τηλεφωνίας (3G)

Το 3G είναι η Τρίτη Γενιά κυβελοειδών κινητών τηλεφωνιών και βασίστηκε στο πρότυπο International Mobile Telephone 2000 (IMT-2000) της ITU (International Telecommunication Union), σύμφωνα με το οποίο επιβάλλεται μία «παγκόσμια» μπάνα συχνοτήτων στο εύρος των 2000 MHz [73]. Η προς μετάδοση πληροφορία είναι ψηφιακής μορφής και μπορεί να υποστηρίξει πολυμεσικό περιεχόμενο, παρέχοντας ευρηζωνικές υπηρεσίες (broadband mobile communications) όπως φωνή, ήχο, βίντεο και γραφικά, με βελτιωμένη ποιότητα και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Συνεπώς, εφαρμογές όπως το Video Conferencing και το IPTV (TV through the Internet) μπορούν να πραγματοποιηθούν παρέχοντας πρόσβαση σε μεγάλο πλήθος χρηστών με χρήση της τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης CDMA (Code Division Multiple Access). Συνεπώς, έχοντας επιτύχει αύξηση της φασματικής απόδοσης (spectral efficiency) και αύξηση της χωρητικότητας δικτύου (network capacity) τα Web και WAP browsing, το GPS (Global Positioning System), το live video streaming (mobile television, YouTube) μπορούν να πραγματοποιηθούν πλέον από κινητούς χρήστες μέσα σε μια μεγάλη περιοχή κάλυψης. Προέκταση στο 3G αποτέλεσε το 3.5G – HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access), το οποίο αύξησε τους ρυθμούς μετάδοσης από 8 έως 20 Mbps (για τα MIMO συστήματα) για διαθέσιμο εύρος ζώνης 5 MHz στο downlink της τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) [73][76]. Επιπλέον, έγινε εφικτή η προσαρμοστική διαμόρφωση (Adaptive Modulation and Coding - AMC), ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος διάδοσης, ενώ όπως αναφέρθηκε εισήχθησαν για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία οι στοιχειωκεραίες MIMO (multiple input multiple output), για επιπλέον αύξηση της χωρητικότητας, ενώ τέλος μπορούν να πραγματοποιηθούν τεχνι-

κές διόρθωσης λαθών (Hybrid Automatic Request - HARQ). Η τελευταία προσθήκη στο 3G ήταν η 3.75G – HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access), η οποία αφορά το uplink, κι επιτυγχάνει ρυθμούς μετάδοσης έως 5.8 Mbps, ενώ ακόμη αυτή σχετίζεται και με άλλα πρωτόκολλα uplink όπως το HSPA (High Speed Packet Access ή αλλιώς Enhanced Uplink (EUL) για την ενίσχυση των real time επικοινωνιών [73][76][80].

2.1.5 Τέταρτη Γενιά Κυψελοειδούς Κινητής Τηλεφωνίας (4G)

Το 4G ή αλλιώς Fourth Generation Wireless υποστηρίζει ευρηζωνικές υπηρεσίες όπως διαδραστικό πολυμεσικό περιεχόμενο (π.χ. real time, high definition video streaming, digital TV), υπηρεσίες φωνής, Internet κ.α. σε υψηλές ταχύτητες και με αυξημένη χωρητικότητα. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης στο 4G είναι 5-20 MHz και μπορεί να «φτάσει» ταχύτητες μετάδοσης έως 20 Mbps. Η χρήση της τεχνολογίας Τέταρτης Γενιάς επιτρέπει packet switching, ενώ είναι συμβατή με τις τεχνολογίες multiple-input and multiple-output (MIMO), IPv6 (Internet Protocol version 6), VoIP (Voice Over Internet Protocol), OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing), και Software Defined Radio (SDR). Η χρήση του 4G απαντάται σε εφαρμογές κινητών τηλεφώνων και δικτύων αισθητήρων (όπως αυτά για έλεγχο της κίνησης στις λεωφόρους)[76].

2.1.6 Πέμπτη Γενιά Κυψελοειδούς Κινητής Τηλεφωνίας (5G)

Το 5G (ή Fifth Generation Wireless Systems ή 5th Generation Mobile Networks) βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.11ac και παρέχει πολύ υψηλότερες ταχύτητες και μεγαλύτερη ακτίνα κάλυψης σε σχέση με τον προκατόχο του, το 4G[76]. Ο σκοπός του 5G είναι η δημιουργία ενός Multi-Bandwidth Data Path που περιλαμβάνει ετερογενή δίκτυα, καθώς και η γρήγορη (σημαντικά μειωμένο latency) και αποτελεσματική απόκριση στις μαζικές απαιτήσεις χρηστών, όπου οι τελευταίοι θα έχουν τη δυνατότητα για επιλογή σύνδεσης στο δίκτυο της αρεσκείας τους (intelligent middleware)[43]. Οι τερματικοί κόμβοι αυτής της Γενιάς Κυψελωτών δικτύων θα είναι software defined (software defined radios)[43] και θα μπορούν να ελέγχουν τα modulation schemes και να πραγματοποιούν error control. Επίσης, παρέχεται η δυνατότητα για πολλαπλή πρόσβαση και εξυπηρέτηση μεγάλου όγκου (κινητών ή μη χρηστών), με κάποιες από τις παρεχόμενες υπηρεσίες να είναι οι CDMA, OFDM, MCCDMA (Multi-Carrier Code Division Multiple Access), UWB (Ultra wideband), IPv6 και NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access), στην οποία θα γίνει εκτενής αναφορά αργότερα.

Δεδομένου ότι η 5η Γενιά Κυψελοειδών Δικτύων αναμένεται να εξυπηρετήσει μεγάλο πλήθος χρηστών, οι απαιτήσεις για QoS έχουν αυξηθεί σημαντικά [101]. Η ακτίνα κάλυψης πρέπει να είναι η μεγαλύτερη δυνατή, το latency οφείλει να είναι σημαντικά μειωμένο ενώ τα signal και spectral efficiency να είναι αισθητά βελτιωμένα και αυξημένα, ενώ παράλληλα ο ρυθμός εξυπηρέτησης των μαζικών αιτημάτων των χρηστών να είναι σημαντικά υψηλός. Επομένως, το 5G αναμένεται να καλύψει τις παραπάνω απαιτήσεις και επιπροσθέτως οι παρεχόμενες υπηρεσίες του να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας και να αυξήσουν τη διάρκεια

της μπαταρίας των συσκευών των χρηστών, να επιτύχουν την ασφαλή μετάδοση δεδομένων από άκρο σε άκρο, παρέχοντας υψηλό scalability και flexibility με χαμηλό κόστος maintenance της υποδομής των δικτύων που το απαρτίζουν και τέλος, κατάλληλη αξιοποίηση του διαθέσιμου bandwidth για επίτευξη ρυθμών μετάδοσης της τάξης των Mbps (uplink) [102] και Gbps (downlink) [43].

2.1.7 Μετέπειτα Γενεές Κυψελοειδούς Κινητής Τηλεφωνίας (B5G)

Οι μετέπειτα Γενεές Κυψελοειδούς Κινητής Τηλεφωνίας (ή αλλιώς 5G Long Term Evolution) [12] πρόκειται να ενσωματώσουν τις υπάρχουσες τεχνολογίες του 5G, παρέχοντας παγκόσμια κάλυψη, ακόμα υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης (της τάξης των terabits) και εκμηδενισμένο latency, αξιοποιώντας πλήρως το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Η χρήση του θα αφορά την ενσωμάτωσή του σε δίκτυα αισθητήρων και σε εφαρμογές Internet of Things (IoT) [95], όπως Smart Homes, Cities [79], Villages, Home-Based ATM Systems, satellite-to-satellite communication, ενώ ακόμη φυσικές καταστροφές δύνανται να προβλεφθούν μετά από τη συλλογή δεδομένων από αισθητήρες και γρήγορη αποστολή τους στο cloud για επεξεργασία και αξιολόγηση.

2.2 Περιγραφή Μη Επανδρωμένων Εναέριων Οχημάτων

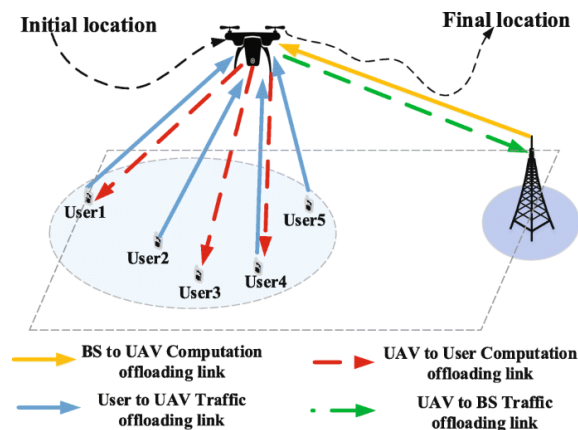
Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που αναμένεται να αντιμετωπίσουν τα 5G και τα μετέπειτα γενεών δίκτυα (beyond 5G ή εν συντομία B5G) είναι το πρόβλημα της μαζικής συνδεσιμότητας πολλαπλών και διαφορετικών τύπου συσκευών [61],[109]. Τα μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα, τα οποία ευρέως ονομάζονται Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) ή αλλιώς drones, προβλέπονται να είναι ένα αναπόσπαστο μέρος των επερχόμενων γενεών ασύρματων δικτύων υποστηρίζοντας ασύρματη μετάδοση δεδομένων [61] [36] με υψηλές ταχύτητες μετάδοσης και υψηλούς ρυθμούς δεδομένων [61],[46], [53]. Σε σύγκριση με τους σταθερούς σταθμούς βάσης, τα UAV έχουν σαφή πλεονεκτήματα όπως ευέλικτη διαχείριση (flexible deployment) [65],[62] σε συνδυασμό με έλεγχο της κινητικότητας [61],[121] [38], ενώ ταυτόχρονα παρέχουν ισχυρές Line-of-Sight (LoS) συνδέσεις [123],[109], [62],[114].

Αδιαμφισβήτητα, τα δίκτυα ραδιοπρόσβασης 5G, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, με τη μεγάλη συνδεσιμότητα που αναμένεται να προσφέρουν, καλούνται να «διαχειριστούν» επιπλέον και μεγάλο όγκο δεδομένων, προερχόμενο από τις αμέτρητες διασυνδεδεμένες συσκευές, οι οποίες διακρίνονται από διαφορετικές απαιτήσεις σχετικά με την αξιοπιστία της μετάδοσης δεδομένων (reliability) και την καθυστέρηση της μεταφοράς τους από άκρο σε άκρο του δικτύου (latency), αλλά και της διάρκειας ζωής της μπαταρίας των συσκευών κ.λ.π. [61]. Επομένως, στην εποχή του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things ή εν συντομία IoT) στην οποία έχουμε ήδη μεταβεί, αναμένεται μία τεράστια αύξηση στον όγκο των προς μετάδοση δεδομένων των επερχόμενων γενεών ασύρματων δικτύων [61]. Επομένως, η υπάρχουσα υποδομή ασύρματων δικτύων αναμένεται να αντιμετωπίσει μεγάλες προκλήσεις συσχετιζόμενες με τη χωρητικότητα (capacity) των δικτύων [61], [59],[108]. Παρά τις προσπάθειες για χρήση

μικροκυψελών (small cells) στα σύγχρονα ετερογενή δίκτυα (Heterogeneous Networks ή εν συντομία HetNets), σε αναπάντεχες καταστάσεις, όπως συνθήκες έκτακτης ανάγκης (έπειτα από μια φυσική καταστροφή) [35], η ανάπτυξη επίγειων σταθερών υποδομών είναι πρακτικά ανέφικτη οικονομικά εξαιτίας των υψηλών λειτουργικών δαπανών, αλλά και της πολυμορφίας των σύγχρονων ετερογενών δικτύων [61].

Επομένως, τα UAV μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εναέριοι σταθμοί βάσης (flying base stations), οι οποίοι με τη χρήση πομποδεκτών (transceivers) [64],[61] μπορούν να βελτιώσουν αισθητά τις παρεχόμενες υπηρεσίες επικοινωνιών στους επίγειους χρήστες (ground users). Εκτός βέβαια από την υποβοήθηση τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, τα UAV μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εναέριοι κόμβοι που εξυπηρετούν εφαρμογές όπως παράδοση φορτίων (cargo delivery) και έλεγχο της κυκλοφορίας (surveillance) [61] [104], [43]. Επιπλέον, τα UAV μπορούν να πετάξουν χωρίς ανθρώπινο χειριστή [2], συνδέοντας τους επίγειους χρήστες με LoS συνδέσεις σε μεγάλες αποστάσεις, ενώ ακόμα μπορούν να αλλάζουν τη θέση τους ώστε να διατηρήσουν την ποιότητα των συνδέσεων [61].

Συνοψίζοντας, τα μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (UAV) είναι ένα πολλά υποσχόμενο εργαλείο στα Πέμπτης και των μετέπειτα Γενεών Δίκτυα, με αναμενόμενη ευρεία χρήση στην εποχή του Διαδικτύου των πραγμάτων στην οποία έχουμε ήδη μεταβεί [83]. Η αξία τους είναι εμφανής όχι μόνο στην εκφόρτωση (offloading) ενός σταθερού σταθμού βάσης (fixed base station) [62] [103], γεγονός που είναι αναγκαίο σε μέρη όπως συναυλίες και συνέδρια όπου οι χρήστες κάνουν εκτεταμένη χρήση των κοινωνικών δικτύων για σκοπούς ζωντανής διάσκεψης βίντεο (teleconference) ή μεταφόρτωσης περιεχομένου πολυμέσων, αλλά και σε απροσδόκητες δυσμενείς καταστάσεις, όπως μια φυσική καταστροφή ή επίθεση στον κυβερνοχώρο (cyber-attack) με στόχο το δίκτυο σταθερών σταθμών βάσης. Η εύκολη διαχείριση των UAVs θα εξυπηρετούσε την ανάγκη άμεσης επικοινωνίας που απαιτούν οι έκτακτες καταστάσεις και, επομένως, θα απέτρεπε μια γενικευμένη αναταραχή που αναμένεται να συμβεί μετά από μια πιθανή κατάρρευση του τηλεπικοινωνιακού συστήματος λόγω των προαναφερθέντων ακραίων σεναρίων.



Σχήμα 2.1: Παράδειγμα χρήσης UAV. Πηγή Αναφοράς: [34].

2.3 Έξυπνες Επαναπρογραμματιζόμενες Επιφάνειες

Οι Έξυπνες Επαναπρογραμματιζόμενες Επιφάνειες (Reconfigurable Intelligent Surfaces ή εν συντομία RISs) ή αλλιώς Έξυπνες Ανακλαστικές Επιφάνειες (Intelligent Reflecting Surfaces ή εν συντομία IRSs [1]), αποτελούν επίσης ένα πολλά υποσχόμενο εργαλείο στην Πέμπτη, Έκτη και στις μετέπειτα Γενιές Κυψελοειδών Δικτύων. Το RIS είναι μια τεχνητή επιφάνεια κατασκευασμένη από ηλεκτρομαγνητικά (HM) υλικά, που έχει τη δυνατότητα να ελέγχει τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που προσκρούουν πάνω σε αυτή [121]. Στην πραγματικότητα, αυτή η «ικανότητα» διαμόρφωσης της ασύρματης διάδοσης των HM κυμάτων, καθώς και η δημιουργία ενός προγραμματιζόμενου περιβάλλοντος μετάδοσης των ραδιοκυμάτων [109],[77],[32] είναι το βασικό στοιχείο που προσέλκυσε το ενδιαφέρον των ερευνητών στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών.

Πριν προχωρήσουμε όμως στη λεπτομερή περιγραφή των παραπάνω επιφανειών, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η απλή και κλιμακώσιμη εσωτερική δομή τους, η οποία θα μελετηθεί εξονυχιστικά αργότερα, τις διακρίνει από άλλες συστοιχίες κεραιών (relays). Παρά το γεγονός ότι λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο όπως οι παραπάνω συστοιχίες, στην πραγματικότητα, διαφέρουν σημαντικά [68], καθώς «συμπεριφέρονται» ως επαναπρογραμματιζόμενοι σχεδαστές (scatterers), που δεν απαιτούν επιπλέον ενέργεια για αποκωδικοποίηση (decoding), εκτίμηση καναλιού (channel estimation), μετάδοση (και αναμετάδοση) των σημάτων που έχουν προσκρούσει πάνω στην επιφάνειά τους. Επιπλέον, μπορούν να υλοποιηθούν με χαμηλό κόστος, καθώς η χρήση «τυπωμένων» μεταύλλικών (printed metamaterials) δεν απαιτεί τη χρήση ενισχυτών, που απαιτούν τα συμβατικά relays. Συνοπτικά, η τεχνολογία RIS μπορεί να ελέγξει/βελτιστοποιήσει το περιβάλλον διάδοσης μεταξύ του πομπού και του δέκτη, όπως και τα relays, αλλά διακρίνεται στο γεγονός ότι μειώνει την πολυπλοκότητα του υλικού και το οικονομικό κόστος που απαιτούν οι παραπάνω επιφάνειες [63], καθώς τα ηλεκτρομαγνητικά υλικά από τα οποία αποτελούνται, είναι λεπτού πάχους, χαμηλού κόστους (low-cost) και χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης (low-power) [3].

Σχετικά με την υλοποίηση των RISs, υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους θα μπορούσε να γίνει [26]. Ο πρώτος τρόπος σχετίζεται με την υλοποίηση μεγάλων πινάκων που αποτελούνται από φθηνές επαναπρογραμματιζόμενες κεραιές, οι οποίες χωρίζονται μεταξύ τους (antenna spacing) με ομοιόμοφες αποστάσεις της τάξης του μισού μήκους κύματος. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας τέτοιας εφαρμογής είναι η συστοιχία κεραιών RFocus [10], όπως αυτή υλοποιήθηκε από ομάδα ερευνητών. Ο δεύτερος τρόπος αφορά τη χρήση μεταύλλικών, των οποίων το μέγεθος, αλλά και η ενδιάμεση απόσταση μεταξύ τους είναι αρκετά μικρότερη του μήκους κύματος. Οι επιφάνειες που χρησιμοποιούν την τελευταία τεχνολογία, ονομάζονται μετα-επιφάνειες (metasurfaces). Ένας ακόμη (αγγλικός) όρος που χρησιμοποιείται στη βιβλιογραφία για την περιγραφή τους είναι αυτός των "HyperSurfaces" [63], [82]. Στην παρούσα εργασία, εστιάζουμε την προσοχή μας στη δεύτερη κατηγορία επαναπρογραμματιζόμενων έξυπνων επιφανειών, η κατασκευή των οποίων στηρίζεται σε μεταύλλικά και συνεπώς σε μετα-άτομα.

Οι μετα-επιφάνειες αποτελούνται από μετα-άτομα τα οποία είναι «κατασκευασμένα» να υλοποιούν διάφορες λειτουργίες όπως απορρόφηση (absorption), ανάκλαση (reflection), διάθλαση (refraction) και πόλωση (polarization) για τα εισερχόμενα ΗΜ κύματα. Συνεπώς, χάρη στις ιδιότητες των μεταλλικών, λειτουργίες όπως η στροφή δέσμης (wave steering) [87] μπορούν να πραγματοποιηθούν. Με περισσότερη λεπτομέρεια, προγραμματιζόμενα ενσωματωμένα κυκλώματα (Integrated Circuits ή εν συντομία ICs) [14], [63] χρησιμοποιούνται για το χειρισμό των μετα-ατόμων, έτσι ώστε τα χαρακτηριστικά τους να μπορούν να τροποποιηθούν από ένα εξωτερικό μικροελεγκτή, «υπεύθυνο» για τη διαμόρφωση και τη ρύθμιση του πλάτους και της φάσης των ανακλώμενων σημάτων [63].

Η επιτυχία των παραπάνω επιφανειών συνοψίζεται στο γεγονός ότι παρέχουν το πλεονέκτημα της «συλλογής» των σημάτων από τον πομπό και του παθητικού beamforming [123], [124] τους στο δέκτη, με αποτέλεσμα την ενίσχυση του λαμβανόμενου σήματος στον τελευταίο [31], [112]. Η παραπάνω ενίσχυση λαμβάνει χώρα, εφόσον έχει προηγηθεί η κατάλληλη ρύθμιση και διαμόρφωση των φάσεων (phase shifts) των προσκρούμενων πάνω στην επιφάνεια σημάτων, ώστε να πραγματοποιηθεί η προσθετική συμβολή (constructive addition) των ανακλώμενων σημάτων στο δέκτη. Το παραπάνω πλεονέκτημα είναι μεγάλης αξίας, καθώς ανεπιθύμητα φαινόμενα όπως η σκίαση (shadowing) και οι διαλλείψεις (fading) που προκαλούν την εξασθένηση των σημάτων μπορεί να περιοριστούν [69]. Αναντίρρητα, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα υφίστανται πολλαπλές αλλοιώσεις (alterations), καθώς διαδίδονται. Οι απώλειες ελευθέρου χώρου (Free Space Loss ή εν συντομία FSL), η απορρόφηση των σημάτων (signal absorption), οι ανακλάσεις (reflections), διαθλάσεις (refractions), περιθλάσεις (diffractions) και γενικότερα τα φαινόμενα scattering που προκαλούνται από την πρόσκρουση των διαδιδόμενων σημάτων σε φυσικά αντικείμενα εντός του ασύρματου περιβάλλοντος διάδοσης, επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση των συστημάτων ασύρματων επικοινωνιών [63]. Μέχρι και πριν την εισαγωγή των RISs στη βιβλιογραφία, τα ασύρματα περιβάλλοντα διάδοσης και τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για να τα περιγράψουν στηρίζονται σε πιθανοκρατικούς μαθηματικούς υπολογισμούς. Οι έξυπνες επαναπρογραμματιζόμενες επιφάνειες όμως, επιτρέπουν κατά μία έννοια τον «έλεγχο» του ασύρματου περιβάλλοντος διάδοσης, επιτρέποντας το χειρισμό του με χρήση λογισμικού (software-defined)[14]. Από την παραπάνω ιδιότητα, πηγάζει ένα ακόμα όνομα που χρησιμοποιείται για την περιγραφή των παραπάνω επιφανειών, και το οποίο είναι «Επιφάνειες Ελεγχόμενες από Λογισμικό» ή όπως είναι ευρέως γνωστές στη βιβλιογραφία: 'Software-controlled Metasurfaces' [63].

Συνοψίζοντας, οι έξυπνες επαναπρογραμματιζόμενες επιφάνειες αποδεικνύονται εξαιρετικά αποδοτικές, ενισχύοντας την απόδοση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, βελτιώνοντας το σηματοθρομβικό λόγο (signal-to-noise ή εν συντομία SNR) [115], [25], [84] και το λόγο του σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (signal-to-noise-interference ή εν συντομία SINR) [11],[3],[91].

Σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας των RISs, όταν τα ΗΜ κύματα προσπίπτουν πάνω στην επιφάνειά τους επάγονται ηλεκτρικά ρεύματα διαμέσου του φαινομένου της επαγωγής (induction). Η ροή των παραπάνω ρευμάτων επαγωγής κατά συνέπεια, οδηγεί στη δημιουργία

ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, σύμφωνα με τους Νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού [63]. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα και η φυσική πίσω από τον τρόπο λειτουργίας των RISs, δεν είναι απαραίτητα στοιχεία τα οποία πρέπει να κατανοηθούν από τον προγραμματιστή των ελεγκτών που χειρίζονται τις έξυπνες επαναπρογραμματιζόμενες επιφάνειες. Ο προγραμματιστής μπορεί να χειρίζεται τα στοιχεία των RISs με τη χρήση διεπαφών (Application Programming Interface ή εν συντομία API) [63], με τη χρήση κατάλληλων εντολών, οι οποίες λαμβάνονται από την πύλη (Internet of Things Gateway), που διαθέτουν αυτές οι επιφάνειες έτσι ώστε στη συνέχεια, να ρυθμιστεί κατάλληλα η HM συμπεριφορά των μεταλλικών του RIS.

Σε σχέση με τις επικρατούσες τεχνολογίες που υποστηρίζουν beamforming όπως οι κεραιές πολλαπλής εισόδου πολλαπλής εξόδου (multiple-unput-multiple-output ή εν συντομία MIMO) [6] τα RIS παρουσιάζουν περισσότερα πλεονεκτήματα ως προς την κατανάλωση ισχύος και τη φασματική απόδοση (spectral efficiency), με ταυτόχρονη μειωμένη πολυπλοκότητα υλικού [17]. Όπως αναφέρθηκε και πρωτίτερα, τα RISs μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνθήκες Non-Line-of-Sight (NLoS), αλλά και σε συνθήκες διαλείψεων (deep fading) [17],[6] αυξάνοντας την ακτίνα κάλυψης (coverage area), βελτιώνοντας την ποιότητα των συνδέσεων και μετριάζοντας την παρεμβολή (interference) [113].

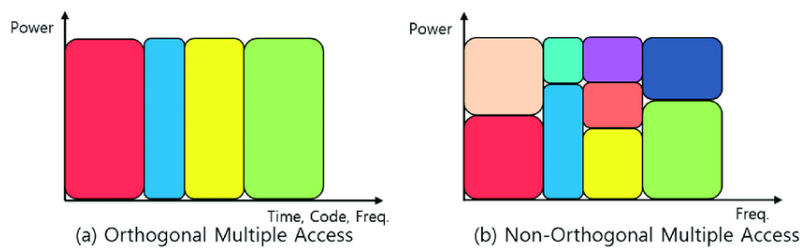
Οι έξυπνες επαναπρογραμματιζόμενες επιφάνειες προβλέπεται να έχουν ευρεία χρήση στο άμεσο μέλλον και η χρήση τους αναμένεται να ευνοήσει σενάρια διαφορετικών χρηστών, με γνώμονα την εξυπηρέτηση των αναγκών τους σε θέματα Quality of Service (QoS). Επιπλέον, τα RIS μπορούν να τοποθετηθούν παντού, όπως σε τοίχους, οροφές, έπιπλα, οχήματα (οποιοδήποτε τύπου) [63], στις προσόψεις των κτιρίων, ακόμα και στα ρούχα [66], ενώ προβλέπεται ότι μπορούν να καλύψουν οποιοδήποτε αντικείμενο είτε σε εσωτερικό είτε σε εξωτερικό χώρο [118]. Επομένως, οι έξυπνες επαναπρογραμματιζόμενες επιφάνειες μπορούν να είναι οποιοδήποτε τύπου και μεγέθους, ενώ μπορούν ακόμα να καταλάβουν και μεγάλη έκταση (Large Intelligent Surfaces -LISs- [22]).

2.4 Μη Ορθογωνική Τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης

2.4.1 Συνοπτική Περιγραφή Τεχνικών Πολλαπλής Πρόσβασης και Εισαγωγή στη Μη Ορθογωνική Τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης (NOMA)

Η Μη Ορθογωνική Τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης (Non-Orthogonal Multiple Access Technique ή εν συντομία NOMA), εισήχθη για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία με την εμφάνιση των κυψελοειδών δικτύων Πέμπτης Γενιάς (5G), με στόχο να εξυπηρετήσει τις μαζικές ανάγκες χρηστών που διαμοιράζονται κοινόχρηστους πόρους [58] [100]. Άλλες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιούνταν ευρέως μέχρι και τα 4ης Γενιάς Κυψελοειδή Δίκτυα είναι η Τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης Διαίρεσης Χρόνου (Time Division Multiple Access ή εν συντομία TDMA), η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με Διαίρεση Συχνότητας (Frequency Division Multiple Access ή εν συντομία FDMA) και η Τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης με Διαίρεση Κώδικα (Code Division Multiple Access (CDMA) ή εν συντομία CDMA) [94].

Οι παραπάνω τεχνικές πρόσβασης αναφέρονται μαζί ως Ορθογωνικές Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης [5], [48]. Οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης OMA, εξυπηρετούν κάθε φορά μόνο ένα χρήστη σε κάθε ορθογωνικό μπλοκ πηγών (orthogonal resource block) [29] [93]. Το παραπάνω χαρακτηριστικό των OMA συστημάτων έχει το πλεονέκτημα ότι οι χρήστες δεν υφίστανται ενδοσυστημικές παρεμβολές (inter-user interferences [92]), όταν κάνουν χρήση του ίδιου κοινού συστήματος επικοινωνίας. Ωστόσο, ο περιορισμός των διαθέσιμων πόρων δεν επιτρέπει στα συστήματα OMA να εξυπηρετήσουν μεγάλο αριθμό χρηστών όπως επιβάλλει το 5G και η εμφάνιση του Διαδικτύου των Πραγμάτων. Από την άλλη πλευρά, το NOMA επιτρέπει, την εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών που μοιράζονται τους ίδιους πόρους, γεγονός που συντελεί στην αύξηση της φασματικής απόδοσης, δείχνοντας, επιπλέον, ανοχή στις ενδοσυστημικές παρεμβολές μεταξύ των χρηστών. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου των παρεμβολών, εφαρμόζονται στο δέκτη σχήματα ακύρωσης των παρεμβολών όπως η διαδοχική ακύρωση παρεμβολής (successive interference cancellation ή εν συντομία SIC) [27], [48]. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι στο NOMA, το διαθέσιμο εύρος ζώνης (bandwidth) μπορεί να χρησιμοποιηθεί από πολλαπλούς χρήστες, αλλά αυτό γίνεται με «δικαιοσύνη» (user fairness), όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια, ανάλογα με τις συνθήκες μετάδοσης των χρηστών.



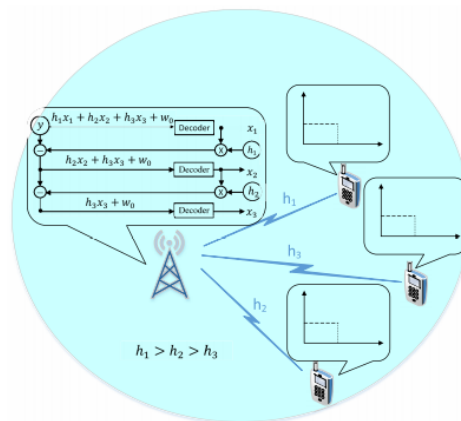
Σχήμα 2.2: Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης. Πηγή Αναφοράς: [23].

2.4.2 Θεμελιώδη Στοιχεία του NOMA

Τα διαθέσιμα σχήματα στο NOMA μπορούν να χωριστούν σε δύο ευρύτερες κατηγορίες, στον τομέα ισχύος (power domain ή εν συντομία PD) και στον τομέα κώδικα (code domain ή εν συντομία CD) [49],[48]. Στην πολυπλεξία στον τομέα της ισχύος (power domain), στον κάθε χρήστη κατανέμεται διαφορετικό (μοναδικό [48]) επίπεδο ισχύος, ανάλογα με τις συνθήκες μετάδοσης του καναλιού στο οποίο εκπέμπει. Πολλαπλοί χρήστες μεταδίδουν τα σήματά τους χρησιμοποιώντας κοινούς διαθέσιμους πόρους χρόνου/συχνότητας/κώδικα, ο καθένας με τη διακριτή τιμή ισχύος που του έχει ανατεθεί. Μάλιστα, η τιμή της ισχύος που ανατίθεται σε κάθε χρήστη ανατίθεται με βάση το κέρδος καναλιού (channel gain) του (συνήθως στον χρήστη με το υψηλότερο κέρδος καναλιού ανατίθεται χαμηλότερο επίπεδο ισχύος [48]). Στα άκρα του δέκτη, τα σήματα των διαφορετικών χρηστών (που έχουν υπερτεθεί στον πομπό) διαχωρίζονται με τη χρήση της διαδοχικής ακύρωσης παρεμβολής (SIC) [27]. Ο διαχωρισμός των σημάτων που έχουν φτάσει υπερτεθημένα επιτυγχάνεται καθώς οι χρήστες έχουν διαφορετικές τιμές ισχύος [48] και κέρδη καναλιών [8] (channel gains). Επομένως, εφόσον στο

power-domain NOMA, επιτρέπεται υποστήριξη/εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών, η τεχνική SIC είναι απαραίτητη ως προς τη συνεισφορά της στη μείωση των ενδοσυστημικών παρεμβολών [54]. Ειδικότερα, αξίζει να σημειωθεί πως οι χρήστες με χαμηλές τιμές κέρδους καναλιών δεν «αισθάνονται» καθόλου την παρεμβολή των υπόλοιπων χρηστών, ενώ ο έλεγχος ισχύος ενός χρήστη δεν επηρεάζει τον έλεγχο ισχύος οποιουδήποτε άλλου εντός του cluster [7]. Σχετικά με το code-domain NOMA, στους χρήστες που πολυπλέκονται πάνω στους κοινούς πόρους (χρόνου/συχνότητας) έχουν ανατεθεί διαφορετικοί κώδικες. Η διαφορά μεταξύ του PD NOMA και του CD NOMA, είναι ότι το τελευταίο επιτυγχάνει κέρδη διαμόρφωσης (shaping gain) και εξάπλωσης (spreading gain) [30],[75].

Τέλος είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί ότι οι διάφοροι χρήστες στο NOMA μπορούν να ομαδοποιηθούν σε συστάδες (clusters) [48], ώστε να διαμοιράζονται τους κοινούς διαθέσιμους πόρους (χρόνου/συχνότητας/κώδικα) του resource block στο οποίο βρίσκονται. Μια πιθανή ομαδοποίηση θα μπορούσε να γίνει με βάση τα κέρδη καναλιών, ομαδοποιώντας τους χρήστες με υψηλά κέρδη (καλοί χρήστες) μαζί και τους χρήστες με χαμηλά κέρδη (κακοί χρήστες) επίσης μαζί. Επίσης, τα διάφορα μπλοκ στα οποία μπορούν να ανατεθούν οι πιθανοί χρήστες είναι επίσης ορθογωνικά μεταξύ τους [7]. Ωστόσο, ένα πρόβλημα που καλούνται να λύσουν οι ερευνητές σχετικά με το NOMA και το SIC είναι η αύξηση του πλήθους των χρηστών που μπορούν να ανατεθούν σε ένα resource block, καθώς η ενδοσυστημική παρεμβολή δρα περιοριστικά στο πλήθος των χρηστών που μπορούν να προστεθούν [48], [7].



Σχήμα 2.3: Παράδειγμα Διαδοχικής Ακύρωσης Παρεμβολής στο δέκτη. Πηγή Αναφοράς: [9].

2.4.3 Τα πλεονεκτήματα του NOMA

Σε σχέση με τις τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης OMA, το NOMA παρουσιάζει κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα που συνοψίζονται ακολούθως [78].

1. Υψηλή Φασματική Απόδοση (Spectral Efficiency), Ψηφλή Διασυνδεσιμότητα (Massive Connectivity), και Μειωμένη Καθυστέρηση (Low latency), καθώς πολλαπλοί χρήστες μπορούν να εξυπηρετηθούν από το ίδιο μπλοκ πόρων (resource block).

2. User Fairness, καθώς και οι χρήστες (cell-edge users) με δυσμενείς συνθήκες μετάδοσης (π.χ. χαμηλές τιμές κέρδους καναλιών) μπορούν να επιτύχουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. [48]

2.5 Η συνύπαρξη των UAV, RIS και της τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης NOMA

Εν κατακλείδι, τα UAV αποτελούν ήδη μέρος των ασύρματων υποδομών των έξυπνων πόλεων (smart cities), καθώς μπορούν να προσφέρουν συνδεσιμότητα on-demand και να περιορίσουν πιθανά κενά στις περιοχές κάλυψης, ειδικότερα σε περιπτώσεις που οι συνθήκες μετάδοσης είναι δυσμενείς, όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου. Η ενσωμάτωση των RIS στις παραπάνω υποδομές επιτρέπει τη δημιουργία ενός περισσότερο έξυπνου και ελέγξιμου περιβάλλοντος διάδοσης, με την τεχνική πολλαπλής πρόσβασης, NOMA, τέλος, να επιτρέπει τη σύνδεση πολλαπλών χρηστών στο σταθμό βάσης (base station), το UAV εν προκειμένω, περιορίζοντας ταυτόχρονα φαινόμενα ενδοσυστημικών παρεμβολών (με χρήση του SIC) στα ετερογενή ασύρματα περιβάλλοντα που μελετάμε.



Σχήμα 2.4: UAV-επικοινωνίες υποβοηθούμενες από το RIS. Πηγή Αναφοράς: [4]

Συνοπτική Περιγραφή της Θεωρίας Παιγνίων και Εισαγωγή στο παιχνίδι Stackelberg

3.1 Περιγραφή της Θεωρίας Παιγνίων

Η Θεωρία Παιγνίων (Game Theory) είναι η Θεωρία που περιλαμβάνει τα μαθηματικά μοντέλα για την περιγραφή της λήψης αποφάσεων (decision making) σε καταστάσεις ή διαδικασίες που χαρακτηρίζονται από διαμάχη (conflict) ή συνεργασία (cooperation) μεταξύ έξυπνων λογικών χρηστών (intelligent rational players). Συγκεκριμένα, με τον όρο «έξυπνοι» [99],[110]παίχτες αναφερόμαστε σε αυτούς που έχουν εξαντλητική γνώση (exhaustive knowledge) του παιχνιδιού στο οποίο συμμετέχουν, ενώ με τον όρο «λογικοί» (rational), αναφερόμαστε σε αυτούς που θέλουν να μεγιστοποιήσουν την αμοιβή (pay-off) που λαμβάνουν. Από την άλλη πλευρά, σχετικά με τον όρο για τη λήψη αποφάσεων, αυτός αναφέρεται στις επιλογές ανάμεσα στις οποίες έχουν να διαλέξουν οι παίχτες, οι οποίοι αν είναι λογικοί, θα επιλέξουν τη λύση που μεγιστοποιεί τις απολαβές τους, επί παραδείγματι [99]. Οι παραπάνω συναρτήσεις ονομάζονται αντικειμενικές συναρτήσεις (objective functions) [15] ή συναρτήσεις κόστους (cost functions) ή συναρτήσεις ικανοποίησης/ωφελιμότητας/χρησιμότητας (utility functions) [99], αναλόγα με το σκοπό του κάθε παίκτη να ελαχιστοποιήσει ή να μεγιστοποιήσει αντίστοιχα τις μεταβλητές που τον ενδιαφέρουν. Ωστόσο, πολλές φορές οι παραπάνω αποφάσεις μπορούν να ληφθούν κάτω από συνθήκες ρίσκου (risk) ή αβεβαιότητας (uncertainty) [99], [18] όταν δεν υπάρχει η κατάλληλη πληροφορία για τις συνθήκες κάτω από τις οποίες εξελίσσεται το παιχνίδι στο οποίο λαμβάνουν μέρος.

Η παραπάνω Θεωρία εμπερικλείει δύο ευρύτερους τύπους παιχνιδιών, τα συνεργατικά και τα μη-συνεργατικά παιχνίδια. Στα μη-συνεργατικά παιχνίδια, η απροκάλυπτη συνεργασία των παικτών (overt cooperation) απαγορεύεται, σε αντίθεση με τα συνεργατικά παιχνίδια όπου υπάρχει συνεργασία μεταξύ των παικτών και οι οποίοι μπορούν να έχουν μεταξύ τους από κοινού ή ρητές συμφωνίες (mutual ή explicit bindings) με στόχο να πετυχαίνουν συνεργασίες (coalitions), έτσι ώστε να αυξήσουν τα οφέλη (benefits) που έχουν λαμβάνει. Ωστόσο, πρέπει σε αυτό το σημείο να διασαφηνιστεί πλήρως ότι ο όρος μη-συνεργατικό παιχνίδι σηματοδοτεί την απουσία επικοινωνίας μεταξύ των παικτών και όχι την παντελή έλλειψη συνεργασίας,

ενώ στα συνεργατικά παιχνίδια, η δημιουργία «συμφωνιών» μεταξύ των παικτών είναι από τις βασικότερες παραμέτρους σχεδιασμού του παιχνιδιού [99].

3.2 Περιγραφή Παιχνιδιού Stackelberg

Πριν προχωρήσουμε σε λεπτομέρειες για την περιγραφή των παιχνιδιών Stackelberg, είναι σημαντικό να ορίσουμε τον ορισμό των συμμετρικών (symmetric) παιχνιδιών. Συμμετρικό ονομάζεται το παιχνίδι κατά το οποίο όλοι οι παίκτες έχουν τα ίδια προνόμια (privileges) ως προς τη γνώση των συνθηκών κάτω από τις οποίες εξελίσσεται το παιχνίδι και οι οποίες αφορούν τις στρατηγικές (strategies) και τις κινήσεις (actions) των υπόλοιπων παικτών που επίσης συμμετέχουν σε αυτό. Το παιχνίδι Stackelberg ανήκει στην κατηγορία των παιχνιδιών που ονομάζονται ασύμμετρα, καθώς σε αυτό υπάρχει πάντα ένας παίκτης (ή εν γένει μία ομάδα παικτών) που έχει (έχουν) μια βαθύτερη γνώση για τις συνθήκες του παιχνιδιού [110]. Επομένως, με βάση το παραπάνω χαρακτηριστικό, στα παιχνίδια Stackelberg ένας παίκτης λειτουργεί ως αρχηγός (leader) και οι υπόλοιποι παίκτες δρουν ως ακόλουθοι (followers). Καθόσον εξελίσσεται το παιχνίδι, ο αρχηγός μπορεί να κρατά τη στρατηγική του σταθερή, ενώ οι ακόλουθοι δρώντας ανεξάρτητα μπορούν να προσαρμόζουν τη στρατηγική τους γνωρίζοντας τη στρατηγική του αρχηγού. Ένα παιχνίδι Stackelberg N-παικτών μπορεί να οριστεί ως ένα διεπίπεδο παιχνίδι (two-level game model), όπου οι παίκτες δρουν ακολουθιακά (sequentially [45]) σύμφωνα με τον εξής τρόπο:

1. Ο αρχηγός είναι ο μόνος ενεργός παίκτης στο πρώτο (1ο) επίπεδο και διαλέγει τη βέλτιστη στρατηγική απόκρισής του (best-response strategy).
2. Στο δεύτερο (2ο) επίπεδο, οι παίκτες αντιδρούν λογικά στην κίνηση του αρχηγού και βελτιστοποιούν κατάλληλα τις αντικειμενικές τους συναρτήσεις (είτε ελαχιστοποιούν τη συνάρτηση κόστους τους είτε μεγιστοποιούν τη συνάρτηση ικανοποίησης που λαμβάνουν).

Στο τέλος, ο αρχηγός αφού έχει παρατηρήσει τις κινήσεις των ακολούθων, προσαρμόζει τη στρατηγική του ανάλογα (είτε ελαχιστοποιώντας το συνολικό κόστος του παιχνιδιού είτε μεγιστοποιώντας το συνολικό βαθμό ικανοποίησης) [110], [99].

Η λύση του παραπάνω παιχνιδιού είναι ένα σημείο ισορροπίας Stackelberg [81],[88]. Ο κάθε παίκτης παρατηρεί τη στρατηγική του αρχηγού x και απαντάει με στρατηγική $f(x) : x \rightarrow y$, η οποία είναι βέλτιστη σχετικά με την αμοιβή (pay-off) που έχει λαμβάνειν [110], [39], [15]. Τα σημεία ισορροπίας Stackelberg που υπάρχουν είναι δύο τύπων, Ισχυρό Σημείο Ισορροπίας Stackelberg (Strong Stackelberg Equilibrium ή εν συντομία SSE) και Ασθενές Σημείο Ισορροπίας Stackelberg (Weak Stackelberg Equilibrium ή εν συντομία WSE). Σχετικά με το SSE, οι ακόλουθοι επιλέγουν βέλτιστες στρατηγικές που είναι επίσης βέλτιστες για τον αρχηγό [110], ενώ σχετικά με το WSE, η στρατηγική που επιλέγουν οι χρήστες είναι η χειρότερη για τον αρχηγό [39], [110]. Το σημείο SSE υπάρχει σε όλα τα παιχνίδια Stackelberg [39], κι ευθύς αμέσως παρουσιάζουμε τον ορισμό του.

Ορισμός 1. Ένα ζευγάρι στρατηγικών $(x, f(x))$ ορίζεται ως ένα Ισχυρό Σημείο Ισορροπίας Stackelberg (*Strong Stackelberg Equilibrium*), εάν ικανοποιούνται οι παρακάτω συνθήκες [39], [60], [120]:

1. Ο αρχηγός παίζει την *best-response* στρατηγική του:

$$U_l(x, f(x)) \geq U_l(x', f(x'))$$

για όλες τις στρατηγικές του αρχηγού, x' .

2. Οι ακόλουθοι παίζουν επίσης τις *best-response* στρατηγικές τους:

$$U_f(x, f(x)) \geq U_f(x, y')$$

για όλες τις στρατηγικές των ακολούθων, y' .

3. Οι ακόλουθοι επιλέγουν στρατηγικές που ευνοούν τον ηγέτη:

$$U_l(x, f(x)) \geq U_l(x, y')$$

για όλες τις βέλτιστες στρατηγικές των ακολούθων, y' .

Επιπλέον, θα παραθέσουμε έναν ακόμη ορισμό για τα σημεία Ισορροπίας Stackelberg, όπου υποθέτουμε ότι οι ακόλουθοι λαμβάνουν μέρος σε ένα μη-συνεργατικό παιχνίδι Nash.

Ορισμός 2. Εν γένει, ένα παιχνίδι Nash πολλαπλών χρηστών περιλαμβάνει ένα πεπερασμένο πλήθος από παίκτες k , όπου $k > 0$. Ένας παίκτης $i \in \{1, \dots, k\}$ υποθέτουμε ότι έχει ένα σετ στρατηγικών, $S_i \subset \mathbb{R}^{n_i}$, με στρατηγικά διανύσματα (*strategy vectors*) $x_i \in S_i$, και μία συνάρτηση ανταμοιβής (*payoff function*) $U_i : K \rightarrow \mathbb{R}$, όπου $K := S_1 \times \dots \times S_k$. Ένα σημείο ισορροπίας Nash (*Nash equilibrium*) ενός παιχνιδιού πολλαπλών χρηστών (*multiplayer game*) ορίζεται ως ακολούθως [15], [24]:

Υποθέτουμε ότι ο κάθε παίκτης είναι λογικός (*rational*) και έχει στόχο να μεγιστοποιήσει τη συνάρτηση που δίνει το *payoff* του, $U_i : K \rightarrow \mathbb{R}$. Το σημείο ισορροπίας Nash (*Nash equilibrium*) είναι ένα διάνυσμα, $x^* \in K := S_1 \times \dots \times S_k$ που ικανοποιεί τις παρακάτω ανισώσεις:

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

όπου $x_{-i}^* := (x_1^*, \dots, x_{i-1}^*, x_{i+1}^*, \dots, x_k^*)$. Επομένως, το παιχνίδι Stackelberg μπορεί να περιγραφεί ως ένα παιχνίδι k ακολούθων (*followers*) που λαμβάνουν μέρος σε ένα μη συνεργατικό παιχνίδι Nash (*noncooperative Nash game*):

3.3 Περιγραφή Συνάρτησης Ευχαρίστησης

Η συνάρτηση ευχαρίστησης/ωφελιμότητας/χρησιμότητας (*utility function*) πηγάζει από το πεδίο της μικροοικονομικής θεωρίας (*microeconomics*) και εκφράζει το βαθμό ικανοποίησης που λαμβάνουν οι χρήστες έπειτα από την επιλογή (*decision-making*) τους να προβούν

σε ορισμένες ενέργειες (actions) [97]. Στο πεδίο των τηλεπικοινωνιών, μία συνάρτηση ευχαρίστησης μπορεί να αποτυπώσει την ικανοποίηση που λαμβάνουν οι παίκτες ανάλογα με την κάλυψη των Quality of Service (QoS) αναγκών τους [86], όπως η επίτευξη ενός συγκεκριμένου λόγου σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (Signal-to-noise-interference ή εν συντομία SINR) [97], [105], [33] ή η επίτευξη ενός επιθυμητού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων [42]. Επομένως, μία utility function μπορεί να αποτυπώσει το trade-off, παραδείγματος χάρη, ανάμεσα στην ισχύ με την οποία πρέπει να εκπέμπουν έτσι ώστε να επιτύχουν ένα επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ή μία επιθυμητή τιμή σηματοθορυβικού-λόγου, αλλά και να καταδείξει την «εγωιστική» συμπεριφορά των χρηστών οι οποίοι θέλουν να θυσιάσουν όσο το δυνατό λιγότερους πόρους (όπως ισχύ μετάδοσης) έτσι ώστε να ικανοποιήσουν στο μέγιστο τις QoS απαιτήσεις τους [97],[105].

Ενεργειακά Αποδοτικές Επικοινωνίες Πολλαπλών Χρηστών υποβοηθούμενες από Έξυπνες Επιφάνειες και Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα

4.1 Περιγραφή του Πειραματικού Μοντέλου Συστήματος

Στο πρόβλημα που μελετάμε, ασχολούμαστε με ένα πλήθος κινητών χρηστών (mobile users) το οποίο ορίζεται ως ακολούθως $I = \{1, \dots, i, \dots, |I|\}$, όπου i είναι ένας δείκτης που χρησιμοποιείται για αναφορά στον εκάστοτε χρήστη. Οι παραπάνω χρήστες εξυπηρετούνται από ένα ασύρματο σύστημα επικοινωνιών υποβοηθούμενο από RIS και UAV.

Ο ρόλος του UAV στο παραπάνω σύστημα είναι η εξυπηρέτηση των χρηστών που συνδέονται σε αυτό, καθώς λειτουργεί ως ένας εναέριος σταθμός βάσης (flying base station). Ειδικότερα, το UAV ως κινητός σταθμός βάσης, είναι μέρος μιας ευρύτερης κατηγορίας σταθμών βάσεων που ονομάζονται Next Generation node Bases (gNBs) [70], και λειτουργεί σαν κινητός σταθμός αναμετάδοσης (Mobile Relay Stations ή εν συντομία MRSs) [85],[52],[56], εξυπηρετώντας τις ανάγκες συνδεσιμότητας των χρηστών. Επομένως, στο σύστημα που θεωρούμε οι χρήστες μπορούν να συνδέονται (και να επικοινωνούν) απ' ευθείας με το UAV. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να τονιστεί ότι τόσο οι χρήστες όσο και το UAV είναι εξοπλισμένοι με μία ομοιοκατευθυντική κεραία (single omni-directional antenna [62]) για αποστολή και λήψη των δεδομένων (από τους χρήστες προς το UAV) αντίστοιχα. Οι συντεταγμένες που χρησιμοποιούμε για να περιγράψουμε τη θέση του UAV είναι της μορφής (x_U, y_U, z_U) [m].

Σχετικά με τη χρήση του RIS στο τηλεπικοινωνιακό σύστημα που περιγράφουμε, υποθέτουμε ότι αυτή η επιφάνεια βρίσκεται στην όψη ενός (ψηλού) κτιρίου, και αποτελείται από μια ομοιόμορφη γραμμική συστοιχία (Uniform Linear Array ή εν συντομία ULA) $|M|$ παθητικών ανακλαστικών στοιχείων, των οποίων το σύνολο (set) ορίζεται ως $M = \{1, \dots, m, \dots, |M|\}$. Ακόμη, υποθέτουμε ότι η φάση των παραπάνω στοιχείων, η οποία ανήκει στο διάστημα $\theta_m \in [0, 2\pi]$, $\forall m \in M$ μπορεί να ελεγχθεί και να ρυθμιστεί κατάλληλα με τη χρήση ενός ελεγκτή (controller). Επομένως, ο διαγώνιος πίνακας μετατόπισης γωνίας φάσης (diagonal phase-shift

angle matrix) μπορεί να περιγραφεί ως ακολούθως $\boldsymbol{\theta} = \text{diag}\{e^{-j\theta_1}, \dots, e^{-j\theta_m}, \dots, e^{-j\theta_{|M|}}\}$. Επιπροσθέτως, το πρώτο στοιχείο του RIS ($m = 1$) λαμβάνεται ως στοιχείο αναφοράς (reference point), έτσι ώστε η απόσταση μεταξύ του RIS και οποιουδήποτε επικοινωνιακού κόμβου του συστήματος ενδιαφέροντος που περιγράφουμε να μπορεί να προσεγγιστεί από την απόσταση μεταξύ του σημείου αναφοράς και του αντίστοιχου κόμβου, για λόγους ευκολίας. Η επιφάνεια (RIS) βρίσκεται στο x-z επίπεδο και είναι παράλληλη στον άξονα x, ενώ τα στοιχεία του RIS είναι επιπλέον αμελητέου πάχους. Οπότε, οι συντεταγμένες που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του παραπάνω στοιχείου αναφοράς είναι οι ακόλουθες $(x_R, y_R = 0, z_R)$ [m].

Στην τοπολογία που θεωρούμε, έχοντας τοποθετήσει το RIS στην πρόσοψη ενός κτιρίου και το UAV να αιωρείται (hovering) επίσης σε υψηλό ύψος, διασφαλίζουμε ότι η σύνδεση (link) μεταξύ των δύο παραπάνω οντοτήτων είναι Line-of-Sight (LoS). Για να περιγράψουμε την παραπάνω σύνδεση (δλδ., την ανάκλαση των σημάτων από το RIS προς το UAV) ορίζουμε το κέρδος καναλιού (channel gain) ως ακολούθως \mathbf{h}_{RU} , όπου $\mathbf{h}_{RU} = \sqrt{\rho(d_{RU})^{-2}}[1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d\phi_{RU}}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(|M|-1)d\phi_{RU}}]^T \in \mathbb{C}^{|M| \times 1}$, με το λ [m] να υποδηλώνει το φέρον μήκος κύματος (carrier wavelength), το d [m] να είναι το antenna spacing ή αλλιώς antenna separation μεταξύ των παθητικών ανακλαστικών στοιχείων που απαρτίζουν το RIS, τη d_{RU} [m] να είναι η (Ευκλείδεια) απόσταση μεταξύ του στοιχείου αναφοράς του RIS και του UAV, και την ϕ_{RU} να περιγράφει το συνημίτονο της γωνίας αναχώρησης (Angle of Departure ή εν συντομία AoD) από το RIS στο UAV. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί, σχετικά με τη σχέση που περιγράφει το κέρδος καναλιού της σύνδεσης μεταξύ RIS και UAV, ότι ο πρώτος όρος του γινομένου αναφέρεται στην απώλεια διαδρομής (path loss) της ανωτέρω ζεύξης, ενώ ο δεύτερος περιγράφει την απόκριση πίνακα (array response) του RIS [62].

Σχετικά με τη ζεύξη ανάμεσα στους χρήστες και το UAV, υποθέτουμε ότι λαμβάνουν χώρα φαινόμενα σχεδάσεων (scattering), οπότε η ζεύξη χαρακτηρίζεται ως Non-Line-of-Sight (NLoS), και συνεπώς, για την περιγραφή της υιοθετείται το μοντέλο Rayleigh, που χρησιμοποιείται ευρέως σε ζεύξεις που χαρακτηρίζονται από διαλείψεις (Rayleigh fading channel model). Επομένως, το κέρδος καναλιού (channel gain) που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της δεδομένης σύνδεσης ορίζεται ως ακολούθως $h_{iU} = \sqrt{\rho d_{iU}^{-\kappa_1}} \tilde{h} \in \mathbb{C}$, όπου το ρ υποδηλώνει την απώλεια διάδοσης (path loss) που λαμβάνει χώρα σε μια απόσταση αναφοράς 1m [111], το κ_1 είναι ο εκθέτης απώλειας διαδρομής (path loss exponent) που σχετίζεται με την ως άνω ζεύξη, η d_{iU} [m] είναι η (Ευκλείδεια) απόσταση μεταξύ του εκάστοτε χρήστη και του UAV, και τέλος, η παράμετρος $\tilde{h} \sim CN(0, 1)$ που αναπαριστά την έντονη σκέδαση των σημάτων στην παραπάνω NLoS ζεύξη, η οποία είναι μία τυχαία κυκλικά συμμετρική μιγαδική Γκαουσιανή μεταβλητή (circularly symmetric complex Gaussian (CSCG) random variable), που χαρακτηρίζεται από μηδενική μέση τιμή και διακύμανση μοναδιαίας τιμής.

Σχετικά με τη ζεύξη μεταξύ των χρηστών και του RIS, υιοθετούμε το μοντέλο Rician (Rician fading channel model), καθώς η διάδοση των σημάτων στην παραπάνω ζεύξη είναι εκτεθειμένη τόσο σε LoS όσο και σε NLoS συνθήκες διάδοσης. Επομένως, το αντίστοιχο κέρδος καναλιού (channel gain) που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της ορίζεται ως

ακολουθώς $\mathbf{h}_{iR} = \sqrt{\rho d_{iR}^{-\kappa_2}} (\sqrt{\frac{\beta}{1+\beta}} \mathbf{h}_{iR}^{\text{LOS}} + \sqrt{\frac{1}{1+\beta}} \mathbf{h}_{iR}^{\text{NLOS}}) \in \mathbb{C}^{|M| \times 1}$, όπου το κ_2 είναι ο εκθέτης απώλειας διάδοσης της ως άνω ζεύξης, β είναι ο παράγοντας Rice (Rician factor), και τέλος d_{iR} [m] είναι η (Ευκλείδεια) απόσταση μεταξύ του εκάστοτε χρήστη και του σημείου αναφοράς του RIS. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι ο πρώτος παράγοντας του παραπάνω γινομένου που εκφράζει το κέρδος καναλιού της ανωτέρω ζεύξης, αντιπροσωπεύει την απώλεια διάδοσης (path loss), ενώ ο δεύτερος όρος εκφράζει την απόκριση πίνακα (array response) και τις διαλείψεις μικρής κλίμακας (small-scale fading) [111]. Για την ακρίβεια, ο όρος $\mathbf{h}_{iR}^{\text{Los}} = [1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d\phi_{iR}}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(|M|-1)d\phi_{iR}}]^T$ αναφέρεται στη LoS συνιστώσα του μοντέλου, με τη γωνία ϕ_{iR} να εκφράζει το συνημίτονο της γωνίας άφιξης (Angle of Arrival ή εν συντομία AoA) του σήματος από το χρήστη στο RIS, ενώ ο όρος $\mathbf{h}_{iR}^{\text{NLos}} \sim CN(0, 1)$ εκφράζει την NLoS συνιστώσα, όπου οι μεταβλητές ανεξάρτητα ακολουθούν τη CSCG κατανομή, που αναφέρθηκε και νωρίτερα, με μηδενική μέση τιμή και μοναδιαία διακύμανση. Συνοπτικά, και για λόγους παρουσίασης, θα μπορούσαμε να περιγράψουμε το κέρδος καναλιού της ανωτέρω ζεύξης ως ακολούθως $\mathbf{h}_{iR} = [|h_{iR,1}|e^{j\omega_1}, \dots, |h_{iR,m}|e^{j\omega_m}, \dots, |h_{iR,|M}|e^{j\omega_{|M|}}]$, όπου $|h_{iR,m}|$ και $\omega_m \in [0, 2\pi]$, είναι το πλάτος (magnitude) και η γωνία φάσης (phase angle) του m-οστού στοιχείου του παραπάνω μιγαδικού διανύσματος \mathbf{h}_{iR} , αντίστοιχα.

Οπότε, σε αυτό το σημείο της εργασίας με δεδομένο ότι το κάθε σήμα χρήστη που λαμβάνεται από το UAV είναι το αποτέλεσμα της υπέρθεσης του απ' ευθείας (από το χρήστη στο UAV) και του ανακλώμενου σήματος (από το RIS στο UAV), μπορούμε να περιγράψουμε το συνολικό κέρδος ισχύος του καναλιού (channel power gain) της ζεύξης μεταξύ του εκάστοτε χρήστη και του UAV ως ακολούθως $G_i = |h_{iU} + \mathbf{h}_{RU} \cdot \theta \cdot \mathbf{h}_{iR}|^2$.

4.2 Περιγραφή χρήσης της τεχνικής NOMA στο προτεινόμενο Πειραματικό Μοντέλο

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα στην παρούσα εργασία, η τεχνική NOMA είναι μία τεχνική πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιείται ευρέως στα ασύρματα κυβελοειδή δίκτυα 5ης Γενιάς (5G) [27]. Στο υπό μελέτη τηλεπικοινωνιακό σύστημα της παρούσας εργασίας, η παραπάνω τεχνική χρησιμοποιείται για να εξυπηρετήσει την πρόσβαση πολλαπλών χρηστών ως προς την επικοινωνία τους με το σταθμό βάσης, το UAV, εν προκειμένω. Το σχήμα NOMA που χρησιμοποιείται είναι το power-domain NOMA, και συνεπώς, εφαρμόζεται στο δέκτη του UAV η τεχνική της διαδοχικής ακύρωσης παρεμβολής (Successive Interference Cancellation ή εν συντομία SIC), έτσι ώστε ο σταθμός βάσης να μπορέσει να αποκωδικοποιήσει τα λαμβανόμενα σήματα των χρηστών που έχουν φτάσει υπερτεθημένα. Θεωρούμε, χωρίς απώλεια της γενικότητας, ότι το UAV ταξινομεί τα λαμβανόμενα σήματα των χρηστών σε αύξουσα σειρά, $G_1P_1 \leq \dots \leq G_iP_i \leq \dots \leq G_{|I|}P_{|I|}$, και ότι η αποκωδικοποίηση (decoding) ξεκινά από το χρήστη με τη μεγαλύτερη ισχύ σήματος (signal strength). Επιπροσθέτως, η (ενδοσυστημική) παρεμβολή που αισθάνονται οι χρήστες μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη εξίσωση

$$I_i = \sum_{j < i} G_j P_j + I_0, \quad (4.1)$$

όπου η P_j [W] περιγράφει την ισχύ μετάδοσης (transmission power) του χρήστη j στην ανοδική ζεύξη (uplink) και το I_0 συμβολίζει την ισχύ του Λευκού Προσθετικού Γκαουσιανού Θορύβου (Additive White Gaussian Noise ή εν συντομία AWGN), μηδενικής μέσης τιμής. Έχοντας ορίσει την παραπάνω σχέση, μπορούμε πλέον να ορίσουμε το λόγο του σήματος προς την παρεμβολή και το θόρυβο (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio ή εν συντομία SINR) που «αισθάνεται» κάθε χρήστης του περιγραφόμενου τηλεπικοινωνιακού συστήματος ως ακολούθως

$$\gamma_i = \frac{P_i G_i}{I_i}. \quad (4.2)$$

4.3 Παιγνιο-θεωρητική προσέγγιση στο πρόβλημα της κατανομής και του ελέγχου ισχύος των Ασύρματων Δικτύων

Το πρόβλημα που καλούμαστε να λύσουμε στην παρούσα εργασία, αφορά την από κοινού βελτιστοποίηση της συνολικά λαμβανόμενης ισχύος σήματος (ή αλλιώς έντασης σήματος) στο UAV και της επιτυγχάνομενης ενεργειακής απόδοσης (energy efficiency) των χρηστών, χρησιμοποιώντας ως εργαλείο τη Θεωρία Παιγνίων (Game Theory). Κατά την εξέλιξη του παιγνίου που λαμβάνει χώρα ανάμεσα στους χρήστες και το UAV, τόσο οι βέλτιστες γωνίες μετατόπισης φάσης (optimal phase-shift angles) των στοιχείων του RIS όσο και η βέλτιστη ισχύς μετάδοσης (optimal transmission power) από την πλευρά των χρηστών καθορίζονται πλήρως. Η συνάρτηση ευχαρίστησης/χρησιμότητας (ή ωφελιμότητας) που χρησιμοποιούμε (utility function) ορίζεται ως ακολούθως [97]

$$U_i(P_i, \mathbf{P}_{-i}) = \frac{W \cdot (1 - e^{-\alpha \gamma_i})^M}{P_i}, \quad (4.3)$$

όπου \mathbf{P}_{-i} είναι το διάνυσμα που περιέχει όλες τις τιμές ισχύος μετάδοσης πλην (του υπό μελέτη) χρήστη i , W [Hz] είναι το διαθέσιμο εύρος ζώνης (bandwidth), και τέλος τα $\alpha, M \in \mathbb{R}^+$ είναι δύο παράμετροι που ελέγχουν την κλίση (slope) [96] της συνάρτησης ευχαρίστησης/ωφελιμότητας (user utility function). Ο αριθμητής της εξίσωσης (4.3) αποτυπώνει τη λαμβανόμενη ικανοποίηση των χρηστών σε σχέση με το SINR που επιτυγχάνουν, το οποίο, όπως υποδηλώνει η σχέση (4.2) έχει 1-1 σχέση με την ισχύ μετάδοσης του εκάστοτε χρήστη, P_i . Ο αριθμητής της σχέσης (4.3) είναι επίσης μία σιγμοειδής συνάρτηση (Sigmoidal ή αλλιώς Sigmoid Function) [107], της οποίας το σημείο καμπής (inflection point) είναι το SINR, το οποίο αντανακλά με τη σειρά του, τη λαμβανόμενη ποιότητα υπηρεσίας των χρηστών (Quality of Service ή εν συντομία QoS). Επομένως, συνολικά η εξίσωση (4.3), εκφράζει τη ενεργειακή απόδοση των χρηστών και αποτυπώνει το συμβιβασμό (trade-off) που καλούνται να κάνουν σε σχέση με την ισχύ την οποία καταναλώνουν για να μεταδώσουν δεδομένα και την ικανοποίηση που θα λάβουν σχετικά με την κάλυψη των QoS απαιτήσεών τους.

4.3.1 Διατύπωση του προβλήματος

Το πρόβλημα της από κοινού βελτιστοποίησης (joint optimization) όπως διατυπώθηκε προηγουμένως, βασίζεται στη Θεωρία Παιγνίων και διατυπώνεται ως ένα Παιχνίδι Stackelberg, ενός αρχηγού (leader) και πολλαπλών ακολούθων (followers), όπου, για την ακρίβεια, το UAV λαμβάνει το ρόλο του αρχηγού (leader) και οι χρήστες τον ρόλο των ακολούθων (followers).

Σχετικά με το UAV, ο στόχος του είναι να μεγιστοποιήσει τη συνολικά λαμβανόμενη ένταση ή ισχύ σήματος (signal strength), υπολογίζοντας τις βέλτιστες γωνίες μετατόπισης φάσης των στοιχείων του RIS. Συνεπώς, το πρόβλημα το οποίο καλείται να λύσει το UAV διατυπώνεται ως εξής

$$\max_{\theta} \sum_{\forall i \in I} P_i |h_{iU} + \mathbf{h}_{RU} \cdot \theta \cdot \mathbf{h}_{iR}| \quad (4.4\alpha')$$

$$\text{τ.ω. } 0 \leq \theta_m \leq 2\pi, \forall m \in M. \quad (4.4\beta')$$

Οι χρήστες, από την άλλη πλευρά, θέλουν να μεγιστοποιήσουν τη συνάρτηση ωφελιμότητάς τους, υπολογίζοντας τη βέλτιστη τιμή ισχύος με την οποία μπορούν να εκπέμψουν, με τρόπο ανεξάρτητο και αυτόνομο. Συνεπώς, η συμπεριφορά των χρηστών μπορεί να χαρακτηριστεί ως «εγωιστική», καθώς οι χρήστες προσπαθούν να υπολογίσουν τις κατάλληλες τιμές ισχύος (οι οποίες πρέπει να είναι χαμηλές, ώστε να παραταθεί η διάρκεια ζωής της μπαταρίας των συσκευών των χρηστών) έτσι ώστε να αποκομίσουν τα μέγιστα οφέλη αναφορικά με την κάλυψη των QoS αναγκών τους. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των χρηστών του τηλεπικοινωνιακού συστήματος μπορούν να περιγραφούν από ένα μη συνεργατικό παιχνίδι (non-cooperative game), το οποίο περιγράφεται ως ακολούθως $G = [I, \{A_i\}_{\forall i \in I}, \{U_i\}_{\forall i \in I}]$, όπου το I διατυπώνει το σύνολο των χρηστών-παιχτών που λαμβάνουν μέρος, ενώ το σύνολο των διαθέσιμων στρατηγικών τους ορίζεται ως εξής $A_i = [P_i^{min}, P_i^{max}]$, με τις P_i^{min} [W] και P_i^{max} [W] να δηλώνουν τη μικρότερη και τη μεγαλύτερη δυνατή τιμή ισχύος εκπομπής αντίστοιχα. Τέλος, σχετικά με τον παραπάνω ορισμό του μη συνεργατικού παιχνιδιού, το U_i που είναι η συνάρτηση ωφελιμότητας κάθε χρήστη, αναπαριστά τη λαμβανόμενη ανταμοιβή (payoff) που απολαμβάνουν οι παραπάνω χρήστες. Σε αυτό το σημείο, λαμβάνοντας υπόψη τον «περιορισμό» που επιβάλλει το NOMA σε σχέση με τον περιορισμό των ενδοσυστημικών παρεμβολών, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η τιμή P_i^{min} εξάγεται από τον κανονισμό που θέτει το SIC στο δέκτη του UAV, και ορίζεται ως

$$G_i P_i - I_i \geq P_{tol}, \forall i \in \{2, \dots, i, \dots, |I|\}. \quad (4.5)$$

Μάλιστα, ο παραπάνω «κανονισμός», εξασφαλίζει ότι το σήμα του κάθε χρήστη στο δέκτη μπορεί να αποκωδικοποιηθεί επιτυχώς, εφόσον η ισχύ ή ένταση σήματος $G_i P_i$ του εκάστοτε χρήστη πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την αισθανόμενη παρεμβολή I_i , συν, επιπλέον, ένα ελάχιστο αποδεκτό ποσοστό ισχύος $P_{tol} \in \mathbb{R}^+$, το οποίο αντιπροσωπεύει την ευαισθησία/ανοχή (sensitivity/tolerance) του δέκτη. Σχετικά με την τιμή P_i^{max} , αυτή επιβάλλεται από τον προϋπολογισμό ισχύος (power budget) των χρηστών. Συνεπώς, το πρόβλημα βελτιστοποίησης που καλούνται να λύσουν οι χρήστες σχετικά με τη μεγιστοποίηση του utility

και του energy efficiency τους, διατυπώνεται ως εξής

$$\max_{P_i \in A_i} U_i(P_i, \vec{P}_{-i}) = \frac{W \cdot (1 - e^{-\alpha\gamma_i})^M}{P_i}, \forall i \in I \quad (4.6\alpha')$$

$$\text{τ.ω. } G_i P_i - I_i \geq P_{tol}, \forall i \in \{2, \dots, i, \dots, |I|\} \quad (4.6\beta')$$

$$P_i \leq P_i^{max}, \forall i \in I \quad (4.6\gamma')$$

Το αποτέλεσμα του παραπάνω συνεργατικού παιχνιδιού G , $\mathbf{P}^* = [P_1^*, \dots, P_i^*, \dots, P_{|I|}^*]$, είναι σημείο ισορροπίας Nash (Nash equilibrium), με το παραπάνω διάνυσμα να αναπαριστά τις βέλτιστες τιμές ισχύος μετάδοσης των χρηστών.

4.3.2 Λύση του Προβλήματος

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, σχετικά με τη λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης του UAV, όπως αυτό ορίστηκε με το σετ εξισώσεων (4.4), θα προκύψει το διάνυσμα που θα περιέχει τις βέλτιστες γωνίες μετατόπισης φάσης των στοιχείων του RIS, $\boldsymbol{\theta}^*$. Το παραπάνω πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι κυρτό (convex optimization problem [19]), και υποθέτουμε ότι το UAV γνωρίζει την ισχύ με την οποία μεταδίδουν οι χρήστες δεδομένα στο uplink, $P_i, \forall i \in I$. Οπότε, οι βέλτιστες γωνίες μετατόπισης για τα στοιχεία του RIS μπορούν να δοθούν από τον ακόλουθο κλειστό τύπο [62]

$$\theta_m^* = \angle \tilde{h} + \omega_m + \frac{2\pi}{\lambda} d(m-1)\phi_{RU}, \forall m \in M. \quad (4.7)$$

Από την άλλη πλευρά, η λύση του μη συνεργατικού παιχνιδιού G από τη μεριά των χρηστών, θα οδηγήσει στην εξαγωγή του διανύσματος που θα περιέχει τις βέλτιστες τιμές ισχύος μετάδοσης των χρηστών, \mathbf{P}^* . Οι χρήστες, γνωρίζοντας τις βέλτιστες γωνίες μετατόπισης των στοιχείων του RIS, μπορούν να προσδιορίσουν τη βέλτιστη ισχύ με την οποία μπορούν να μεταδώσουν δεδομένα P_i^* , καθόσον αλληλεπιδρούν με τους υπόλοιπους χρήστες με τρόπο μη συνεργατικό. Η λύση του παραπάνω μη συνεργατικού παιχνιδιού G , όπως είπαμε και προηγουμένως, είναι το διάνυσμα \mathbf{P}^* που περιέχει τις βέλτιστες τιμές ισχύος μετάδοσης των χρηστών, και το οποίο αποτελεί σημείο ισορροπίας Nash (Nash equilibrium point), ενώ το σημείο ισορροπίας Stackelberg (Stackelberg equilibrium) είναι το ακόλουθο $(\boldsymbol{\theta}^*, \mathbf{P}^*)$.

Ορισμός 3. (Σημείο Ισορροπίας Nash) Το διάνυσμα $\mathbf{P}^* = [P_1^*, \dots, P_i^*, \dots, P_I^*]$ είναι ένα σημείο ισορροπίας Nash του μη συνεργατικού παιχνιδιού $G = [I, \{A_i\}_{\forall i \in I}, \{U_i\}_{\forall i \in I}]$, εάν για κάθε χρήστη $i \in I$ ισχύει ότι $U_i(P_i^*, \mathbf{P}_{-i}) \geq U_i(P_i, \mathbf{P}_{-i}), \forall P_i \in A_i$.

Η ερμηνεία του παραπάνω ορισμού σχετίζεται με το γεγονός ότι έχοντας φτάσει σε ένα σημείο ισορροπίας Nash, κανένας χρήστης δεν έχει το κίνητρο (incentive) να βελτιώσει μονομερώς το λαμβανόμενο utility του, με το να αλλάξει τη στρατηγική του επιλέγοντας να εκπέμψει με διαφορετική ισχύ μετάδοσης, δεδομένων των στρατηγικών των άλλων παικτών/χρηστών.

Θεώρημα 1. (Υπαρξη και Μοναδικότητα Σημείου Ισορροπίας Nash) Ένα μοναδικό σημείο ισορροπίας Nash υπάρχει για το μη συνεργατικό παιχνίδι, G , όπου $G = [I, \{A_i\}_{\forall i \in I}, \{U_i\}_{\forall i \in I}]$, το οποίο ορίζεται ως ακολούθως:

$$P_i^* = \min\left\{\frac{\gamma_i^* \cdot I_i}{WG_i}, P_i^{max}\right\}, \forall i \in I, \quad (4.8)$$

και όπου γ_i^* είναι η μοναδική θετική λύση της εξίσωσης $\frac{\partial f(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} \gamma_i - f(\gamma_i) = 0$, $f(\gamma_i) = (1 - e^{-a\gamma_i})^M$.

Σχετικά με τον προσδιορισμό της βέλτιστης ισχύς μετάδοσης για κάθε χρήστη, P_i^* , είναι απαραίτητη η γνώση της αισθανόμενης παρεμβολής, I_i , για κάθε χρήστη. Η παραπάνω πληροφορία γίνεται γνωστή στους χρήστες είτε με broadcast [96] είτε με unicast [105] στον καθένα, ώστε αυτοί να λάβουν μία αυτόνομη απόφαση σχετικά με τη βέλτιστη τιμή ισχύος που θα εκπέμψουν.

Η απόδειξη του προαναφερθέντος Θεωρήματος στηρίζεται στην ιδιότητα της συνάρτησης χρησιμότητας/ωφελιμότητας/ευχαρίστησης (utility function) να είναι οιονεί-κοίλη (quasi-concave) σε σχέση με τη μεταβλητή που περιγράφει την ισχύ μετάδοσης μετάδοσης των χρηστών στο uplink. Η απόδειξη του παραπάνω Θεωρήματος δίνεται από τους Τσιροπούλου, Παπαβασιλείου, Καστρινογιάννη στις ακόλουθες ερευνητικές εργασίες [97],[55].

4.3.3 Προτεινόμενος Αλγόριθμος για την Εύρεση του Σημείου Ισορροπίας Stackelberg

Με δεδομένες τις βέλτιστες μετατοπίσεις φάσης για τα στοιχεία του RIS, $\theta_m^*, \forall m \in M$, και δεδομένες τις βέλτιστες τιμές για την ισχύ μετάδοσης των χρηστών, $P_i^*, \forall i \in I$, το σημείο Ισορροπίας Stackelberg μπορεί να εξαχθεί με έναν επαναληπτικό τρόπο, ως ακολούθως.

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί ότι ο παρακάτω αλγόριθμος στηρίζεται στους αλγόριθμους Best Response Dynamics που έχουν προταθεί στις ακόλουθες ερευνητικές δουλειές: [105], [96], [98], [55].

1. Θέτουμε $ite=0$, όπου ite είναι ο δείκτης που δηλώνει τον αριθμό επανάληψης. Κάθε χρήστης εκπέμπει με ισχύ μετάδοσης P_i που επιλέγει τυχαία από το σεν στρατηγικών του, $A_i = [P_i^{min}, P_i^{max}]$.
2. Το UAV καθορίζει τις βέλτιστες μετατοπίσεις φάσης των στοιχείων του RIS για κάθε χρήστη, θ_m^* .
3. Το UAV ταξινομεί τους χρήστες με βάση τις τιμές των channel gains, αποκωδικοποιεί τα μηνύματά τους και κάνει unicast την αισθανόμενη (ενδοσυστημική) παρεμβολή σε κάθε χρήστη.
4. Θέτουμε $ite=ite+1$, και κάθε χρήστης καθορίζει τη βέλτιστη ισχύ με την οποία θα εκπέμψει, και για την οποία μεγιστοποιείται το utility του, δηλ. $P_i^* = \max_{P_i \in A_i} U_i(P_i, \vec{P}_{-i})$, και η οποία πρέπει να πληροί τόσο τους περιορισμούς που επιβάλλουν το power budget των χρηστών όσο και η τεχνική SIC.

5. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μεταξύ των βημάτων 3 και 4, μέχρι κανένας χρήστης να μη θέλει να αποκλίνει από την τιμή ισχύος μετάδοσης εκπομπής που διάλεξε στην προηγούμενη επανάληψη. Εάν $\left| P_i^{(ite+1)} - P_i^{(ite)} \right| < \varepsilon \forall i \in I$, όπου το ε είναι μια πολύ μικρή θετική σταθερά, η διαδικασία σταματάει, αλλιώς επαναλαμβάνεται μεταξύ των βημάτων 3 και 4.

Επομένως, μετά τη σύγκλιση του αλγορίθμου έχουμε καταλήξει σε ένα σημείο ισορροπίας Stackelberg, (θ^*, \mathbf{P}^*) .

5.1 Περιγραφή Παραμέτρων Μοντελοποίησης

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα αξιολόγησης του προτεινόμενου πειραματικού μοντέλου, αναλύοντας τις θετικές επιδράσεις του ως προς την ενεργειακή κατανάλωση των χρηστών και το βαθμό ικανοποίησης που κατ' επέκταση λαμβάνουν.

Στην τοπολογία που θεωρούμε, η οποία βρίσκεται εντός ενός τρισδιάστατου Καρτεσιανού χώρου, τοποθετούμε το πρώτο στοιχείο του RIS, το οποίο λαμβάνεται ως σημείο αναφοράς για διευκόλυνση των υπολογισμών, στη θέση $(x_R = 49, y_R = 0, z_R = 55)$ [m], ενώ το UAV τοποθετείται στη θέση $(x_U = 25, y_U = 50, z_U = 120)$ [m]. Σχετικά με τους χρήστες που εξυπηρετούνται από το σταθμό βάσης, το UAV, θεωρούμε ότι σχηματίζουν ένα NOMA cluster 5 χρηστών. Συνεπώς, ορίζουμε το πλήθος τους ως ακολούθως, $|I| = 5$, και ορίζουμε τη σχετική τους απόσταση από το RIS να βρίσκεται γύρω από την τιμή, $d_{i,R} = 55$ m. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης (bandwidth) του τηλεπικοινωνιακού συστήματος είναι $W = 1.08$ MHz και η ισχύς του Λευκού προσθετικού Γκαουσιανού θορύβου (AWGN) λαμβάνει τιμή $I_0 = -130$ dBm.

Σχετικά με τη μοντελοποίηση του ασύρματου περιβάλλοντος διάδοσης θέτουμε στις παραμέτρους τις εξής τιμές. Για το μοντέλο Rayleigh που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της NLoS ζεύξης ανάμεσα στο χρήστη και το UAV, ορίζουμε τον εκθέτη απώλειας διαδρομής (path loss exponent) ως $\kappa_1 = 3.5$ και την τιμή που δηλώνει την απώλεια διαδρομής στην απόσταση αναφοράς d_0 , ως $\rho = 0.01$ (-20 dB). Η παραπάνω τιμή κ_1 είναι μία τιμή που χρησιμοποιείται ευρέως στη βιβλιογραφία [21], [47], [72],[12] για να περιγράψει τα αστικά ασύρματα κυψελοειδή ραδιοδίκτυα (shadowed urban cellular radio networks) που αντιμετωπίζουν προβλήματα σκίασης (shadowing).

Τέλος, ορίζουμε τις παραμέτρους που ελέγχουν την κλίση της συνάρτησης ευχαρίστησης (utility) ως ακολούθως $a = 1.15$ και $M = 80$.

Για την περιγραφή της ζεύξης ανάμεσα στον εκάστοτε χρήστη και στο RIS, χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο διάδοσης (propagation model), Rician. Ο παράγοντας Rice (Rician factor) που χρησιμοποιούμε έχει λάβει την τιμή $\beta = 2$, ενώ η παράμετρος κ_2 , λαμβάνει την

τιμή $\kappa_2 = 2.8$, η οποία χρησιμοποιείται εκτενώς στη βιβλιογραφία [21], [47], [72],[12] για να περιγράψει τα αστικά ασύρματα κυψελοειδή ραδιοδίκτυα (urban area cellular radio networks).

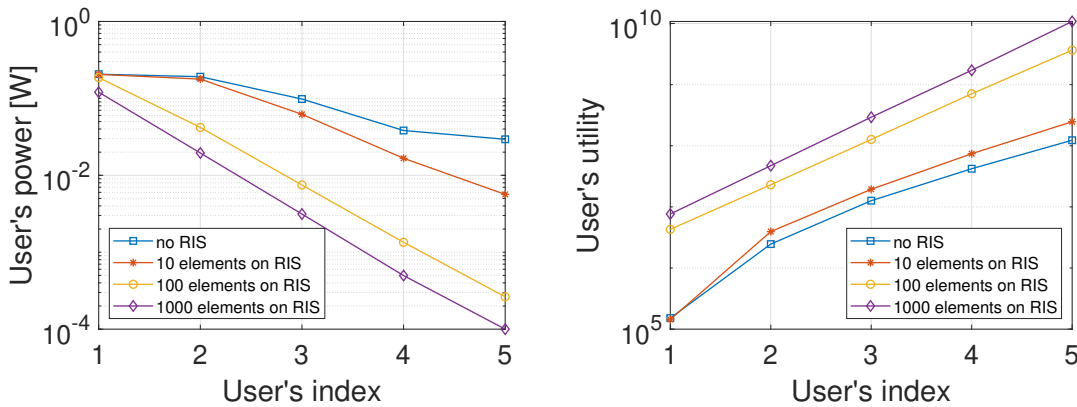
Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2 της παρούσας εργασίας, το RIS είναι μία ομοιόμορφη συστοιχία παθητικών ανακλαστικών στοιχείων τα οποία χωρίζονται μεταξύ τους με κάποια (ομοιόμορφη) απόσταση. Η παραπάνω απόσταση ονομάζεται βήμα κεραίας (ή antenna spacing ή antenna separation). Το βήμα κεραίας που ορίσαμε στο περιγραφόμενο πειραματικό μοντέλο είναι $d = \frac{\lambda}{2}$.

Σχετικά με το πρόβλημα βελτιστοποίησης που λύνουμε, θέτουμε επίσης τις εξής τιμές στις παραμέτρους ενδιαφέροντος. Σύμφωνα με τον προϋπολογισμό ισχύος (power budget) που θεωρούμε για την ισχύ με την οποία μεταδίδουν οι χρήστες, αυτή δεν μπορεί να ξεπεράσει το ανώτατο όριο των $P_i^{max} = 23$ dBm, ενώ η τιμή που δηλώνει την ευαισθησία του δέκτη στο UAV ώστε να αποκωδικοποιηθούν επιτυχώς τα λαμβανόμενα σήματα των χρηστών, ορίζεται ως $P_{tol} = -150$ dBm [7].

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί ότι όλα τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν ευθύς αμέσως, έχουν προκύψει από τη λήψη στατιστικών μετρήσεων σε 100 διαφορετικές τοπολογίες.

5.2 Παρουσίαση και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

5.2.1 Αξιολόγηση του προτεινόμενου Πειραματικού Μοντέλου ως προς την κατανάλωση ισχύος και το βαθμό ικανοποίησης



α': Ισχύς Μετάδοσης ανά χρήστη για διαφορετικόβ': Λαμβανόμενη ικανοποίηση ανά χρήστη για διαφορετικό πλήθος ανακλαστικών στοιχείων του RIS.

Σχήμα 5.1: Αξιολόγηση του προτεινόμενου πειραματικού μοντέλου ως προς την ισχύ κατανάλωσης και τη λαμβανόμενη ικανοποίηση ανά χρήστη, κάτω από διαφορετικό πλήθος στοιχείων του RIS.

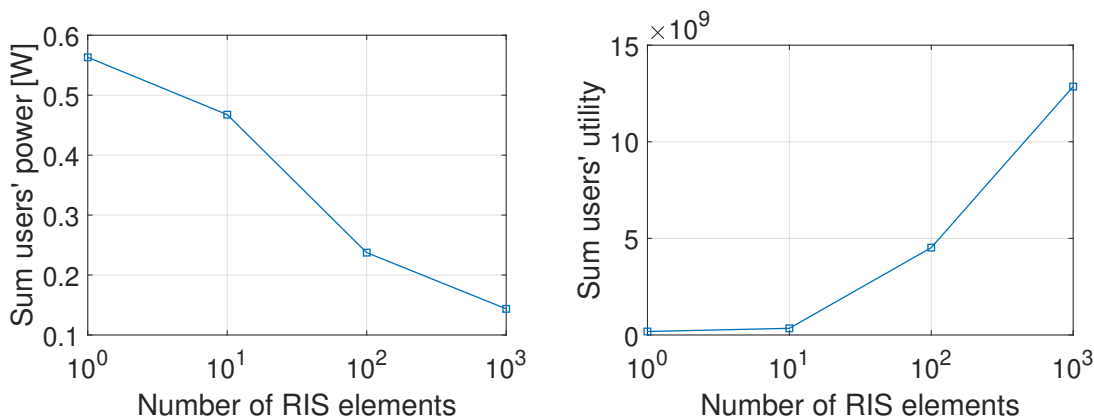
Σχετικά με τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στο σχήμα 5.1, προτού ξεκινήσει η επί μέρους ανάλυσή τους, αξίζει να αναφερθεί ότι οι χρήστες (users) έχουν ταξινομηθεί σε φθίνου-

σα σειρά με βάση τις τιμές του κέρδους καναλιού τους (channel gain). Συνεπώς, ο χρήστης με τη μικρότερη τιμή δείκτη (user's index) είναι ο χρήστης με την καλύτερη (μεγαλύτερη) τιμή καναλιού, ενώ αντίστοιχα, ο χρήστης με το μεγαλύτερο δείκτη index, είναι ο χρήστης με τη χειρότερη (μικρότερη) τιμή καναλιού. Η τιμή του κέρδους καναλιού αποτυπώνει της συνθήκες κάτω από τις οποίες λαμβάνει χώρα η μετάδοση δεδομένων στο ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα που εξετάζουμε. Μία χαμηλή τιμή καναλιού δείχνει ότι η επικοινωνία του δεδομένου χρήστη δε γίνεται κάτω από τις καλύτερες συνθήκες διαύλου, εξαιτίας ανεπιθύμητων φαινομένων όπως η σκίαση (shadowing) και οι διαλείψεις (fading) οι οποίες οδηγούν στην εξασθένιση του σήματος (signal attenuation). Από την άλλη πλευρά, μια υψηλή τιμή καναλιού, δείχνει ότι τα παραπάνω φαινόμενα που περιγράφηκαν είναι σχετικώς περιορισμένα, οπότε η επικοινωνία του χρήστη ενδιαφέροντος πραγματοποιείται κάτω από καλύτερες συνθήκες διαύλου. Επομένως, εν γένει, θα μπορούσαμε να χαρακτηρίσουμε τους χρήστες με μικρό δείκτη ως «καλούς» ή «δυνατούς» ως προς την ποιότητα της επικοινωνίας που απολαμβάνουν, ενώ τους χρήστες με μεγάλο δείκτη ως «κακούς» ή «αδύναμους», εξαιτίας της μειωμένης ποιότητας υπηρεσίας που λαμβάνουν αντίστοιχα [50],[117].

Αναφορικά με το σχολιασμό των διαγραμμάτων του σχήματος 5.1, το 5.1α' αποτυπώνει τον τρόπο με τον οποίο κατανέμεται η ισχύς μετάδοσης στην ανοδική ζεύξη (uplink) ανά χρήστη κάτω από διαφορετικό πλήθος στοιχείων του RIS, ενώ το σχήμα 5.1β' δείχνει τη λαμβανόμενη ευχαρίστηση (utility) ανά χρήστη επίσης κάτω από διαφορετικό πλήθος στοιχείων του RIS. Επομένως, σε συμφωνία με όσα λέχθηκαν παραπάνω, είναι επίσης σημαντικό να προστεθεί στο σχολιασμό η ακόλουθη ιδιότητα του NOMA σχετικά με την κατανομή ισχύος στους χρήστες που απαρτίζουν τη συστάδα (cluster) ενδιαφέροντος που μελετάμε. Σύμφωνα με τις αρχές λειτουργίας του NOMA [50], [117], [106], είναι επιθυμητό ένας χρήστης με μικρή τιμή κέρδους καναλιού να μπορεί να μεταδώσει με μικρότερη τιμή ισχύος και παράλληλα να ικανοποιούνται οι QoS απαιτήσεις του. Πράγματι, όπως τα επιμέρους διαγράμματα απεικονίζουν, σύμφωνα με το πειραματικό μοντέλο της παρούσας εργασίας, είναι εφικτό ένας χρήστης με μικρή τιμή κέρδους καναλιού να μπορεί να μεταδίδει δεδομένα με χαμηλότερη τιμή ισχύος μετάδοσης και να λαμβάνει μεγαλύτερη ικανοποίηση (utility). Το παραπάνω επιθυμητό χαρακτηριστικό οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο είναι υλοποιημένη η παραπάνω συνάρτηση [41],[40], και όπως έχει προταθεί από την ακόλουθη ερευνητική εργασία [97], της οποίας η προτεινόμενη συνάρτηση ευχαρίστησης περιγράφεται στην εξίσωση 4.3. Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, η ικανοποίηση (utility) που λαμβάνει ο κάθε χρήστης εξαρτάται από το λόγο κέρδους καναλιού προς παρεμβολή (channel-gain-to-interference ratio), $\frac{G_i}{I_i}$, στον εκθέτη του αριθμητή της συνάρτησης ευχαρίστησης. Επομένως, το γεγονός ότι οι χρήστες με μικρές τιμές κέρδους καναλιού, έχουν χαμηλή τιμή λόγου κέρδους καναλιού προς παρεμβολή (low channel-gain-to-interference ratio), $\frac{G_i}{I_i}$, «οδηγεί» το ακρότατο μεγίστου της παραπάνω συνάρτησης να λάβει μία μικρότερη τιμή ισχύος, P_i .

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι καθώς το πλήθος των στοιχείων του RIS μεγαλώνει τόσο η ισχύς μετάδοσης των χρηστών μειώνεται, ενώ αντίστοιχα η λαμβανόμενη ευχαρίστηση (utility) τους αυξάνεται.

Σχετικά με τη συνολική αξιολόγηση του συστήματος ως προς την ισχύ μετάδοσης και τη λαμβανόμενη ευχαρίστηση (utility) των χρηστών, παρουσιάζονται ακολούθως δύο συγκεντρωτικά διαγράμματα που αποτυπώνουν την επίδραση του πλήθους των στοιχείων του RIS ως προς την ισχύ με την οποία μεταδίδουν οι χρήστες στο uplink και την ευχαρίστηση (utility) την οποία λαμβάνουν. Για την συγκεντρωτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων αθροίζουμε τις τιμές ισχύος με τις οποίες μεταδίδουν οι χρήστες για διαφορετικό πλήθος ανακλαστικών στοιχείων του RIS στο γράφημα 5.2α', ενώ στο γράφημα 5.2β', αποτυπώνουμε συνολικά τη λαμβανόμενη ικανοποίηση (utility) ξανά κάτω από διαφορετικό πλήθος στοιχείων του RIS. Όπως παρατηρούμε από τα εικονιζόμενα διαγράμματα, το πλήθος των ανακλαστικών στοιχείων επιδρά σημαντικά στην απόδοση του υπό μελέτη συστήματος. Συγκεκριμένα, σχετικά με το διάγραμμα 5.2α', παρατηρούμε ότι όσο το πλήθος των στοιχείων αυξάνεται η συνολική ισχύς του συστήματος πέφτει, ενώ σύμφωνα με το διάγραμμα 5.2β', και με όσα λέχθηκαν προηγουμένως, η συνολικά λαμβανόμενη ευχαρίστηση/ικανοποίηση αυξάνεται όσο αυξάνεται και το πλήθος των στοιχείων του RIS. Επιπλέον, ένα ακόμη χαρακτηριστικό που έχει σημασία να αναφερθεί, αφορά το γεγονός ότι για μικρό πλήθος στοιχείων RIS (10^1), η συνολική απόδοση του συστήματος προσομοιάζει την απόδοση που θα είχε το σύστημα χωρίς την παρουσία του RIS. Επομένως, είναι πολύ σημαντικό, όταν σχεδιάζονται τέτοια συστήματα, να λαμβάνεται υπόψη η βελτιστοποίηση του πλήθους των στοιχείων του RIS ώστε να ενισχύεται η συνολικά λαμβανόμενη απόδοση των υπό μελέτη συστημάτων [17]. Τέλος, σχετικά με το πλήθος των παθητικών ανακλαστικών στοιχείων που επιλέξαμε, οι τιμές [13], [119], [51] ποικίλουν από πολύ μικρές (10) έως πολύ μεγάλες (1000), ώστε να συμπεριλάβουν όλες τις πιθανές εφαρμογές και εγκαταστάσεις των επιφανειών RIS που αναλύθηκαν εκτενώς στο κεφάλαιο 2.



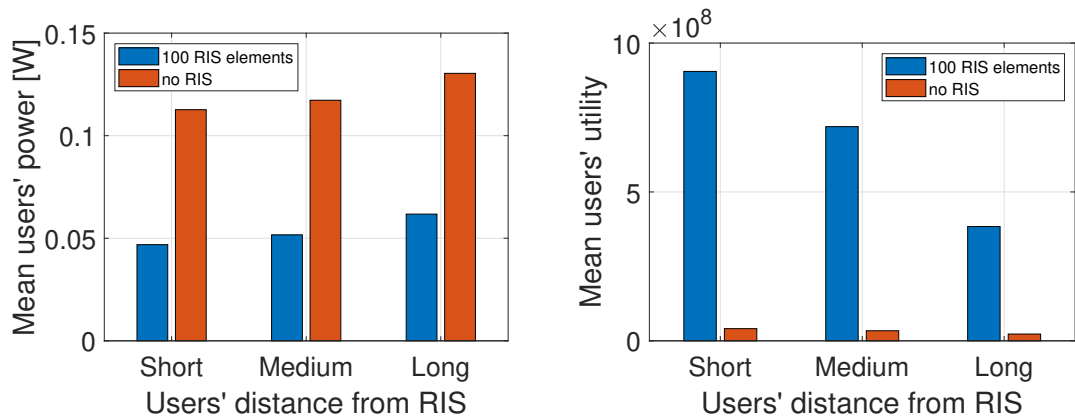
α': Συνολική Ισχύς Εκπομπής για διαφορετικό β': Συνολικά λαμβανόμενη ικανοποίηση για διαφορετικό πλήθος στοιχείων του RIS

Σχήμα 5.2: Συνολική Αξιολόγηση του Συστήματος ως προς την ισχύ μετάδοσης και την λαμβανόμενη ικανοποίηση για διαφορετικό πλήθος στοιχείων του RIS.

5.2.2 Αξιολόγηση του προτεινόμενου Πειραματικού Μοντέλου ως προς την κατανάλωση ισχύος και το βαθμό ικανοποίησης για διαφορετικά σενάρια θέσης χρηστών

Στην παρούσα υποενότητα, εξετάζουμε την απόδοση του προτεινόμενου συστήματος για διαφορετικές θέσεις χρηστών ως προς το UAV και το RIS. Σχετικά με τις παραμέτρους της τοπολογίας που μελετάμε, υποθέτουμε ότι το RIS αποτελείται από 100 παθητικά ανακλαστικά στοιχεία, ενώ οι χρήστες είναι τοποθετημένοι, για λόγους παρουσίασης, σε αύξουσα σειρά, γύρω από τις ακόλουθες θέσεις $d_{i,R} = [55, 60, 80]$ [m]. Επομένως, εξετάζουμε τρία διαφορετικά σενάρια θέσης χρηστών σε κοντινή (short), ενδιάμεση (medium) και μακρινή (large) απόσταση από το RIS. Οι χρήστες είναι τοποθετημένοι στο $x-y$ επίπεδο της προτεινόμενης τοπολογίας. Για την αξιολόγηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος και της συνεισφοράς του RIS ως προς τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και της αύξησης της λαμβανόμενης ευχαρίστησης (utility) των χρηστών, χρησιμοποιούμε ως μετρική το στατιστικό μέσο (average ή αλλιώς mean).

Όπως φαίνεται από το γράφημα 5.3α', η παρουσία του RIS στο υπό μελέτη σύστημα, οδηγεί σε σημαντικά μειωμένη μέση τιμή ισχύος εκπομπής, σε σχέση με αυτή που θα πετυχαίναμε χωρίς την παρουσία του RIS, ενώ αντίστοιχα, το γράφημα 5.3β' υποδηλώνει τη συνεισφορά της παραπάνω επιφάνειας ως προς αύξηση της λαμβανόμενης ευχαρίστησης των χρηστών, σχεδόν κατά μία τάξη μεγέθους. Επομένως, η παρουσία του RIS βοηθά στην αύξηση της κάλυψης μίας ευρείας περιοχής, συντελώντας στην εξάλειψη πιθανών κενών κάλυψης (coverage holes) της τοπολογίας ενδιαφέροντος, ενώ ταυτόχρονα η μέση λαμβανόμενη ικανοποίηση των χρηστών ενισχύεται σημαντικά.



α': Μέση Τιμή Ισχύος Εκπομπής

β': Μέση Τιμή βαθμού Ευχαρίστησης/Ικανοποίησης

Σχήμα 5.3: Αξιολόγηση του προτεινόμενου μοντέλου κάτω από διαφορετικά σενάρια θέσης χρηστών.

6.1 Σύνοψη

Στην παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε με το πρόβλημα της ενεργειακά αποδοτικής κατανομής πόρων σε ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα υποβοηθούμενο από την παρουσία μίας Έξυπνης Επαναπρογραμματιζόμενης Επιφάνειας (RIS) και τη χρήση ενός Μη Επανδρωμένου Εναέριου Οχήματος (UAV) ως κινητού σταθμού βάσης για εξυπηρέτηση των κινητών χρηστών. Για τη λύση του παραπάνω προβλήματος υιοθετήσαμε μία παιγνιοθεωρητική προσέγγιση, που περιλαμβάνει τη συμμετοχή των κινητών χρηστών και του UAV σε ένα μη-συνεργατικό παιχνίδι Stackelberg ενός αρχηγού και πολλαπλών ακολούθων. Στο παραπάνω παιχνίδι, το ρόλο του αρχηγού αναλαμβάνει το UAV, το οποίο και καθορίζει τις βέλτιστες μετατοπίσεις των γωνιών φάσης των στοιχείων του RIS, με στόχο να μεγιστοποιήσει τη συνολική ισχύ ή ένταση σήματος που λαμβάνει από τους χρήστες. Αντίθετα, το ρόλο των ακολούθων παίρνουν οι κινητοί χρήστες του συστήματος, οι οποίοι έχουν ως στόχο να μεγιστοποιήσουν με τρόπο αυτόνομο και κατανεμημένο την ευχαρίστηση/ικανοποίηση που λαμβάνουν (utility), επιδιώκοντας να εκπέμψουν με την ελάχιστη δυνατή τιμή ισχύος. Σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο και τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, είναι φανερό ότι η ισχύς μετάδοσης των χρηστών μειώνεται σημαντικά, ενώ παράλληλα αυξάνεται συντριπτικά η ικανοποίηση/ευχαρίστηση που λαμβάνουν.

6.2 Οφέλη του Προτεινόμενου Μοντέλου

Το προτεινόμενο μοντέλο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ευρέως σε εφαρμογές Internet of Things στο περιβάλλον μιας έξυπνης πόλης (smart city environment). Αδιαμφισβήτητα, οι περισσότερες συσκευές επιτελούν πλήθος εργασιών οι οποίες πρέπει να πραγματοποιούνται και να εξελίσσονται παράλληλα και συγχρονισμένα. Συνεπώς, οι ενεργειακές απαιτήσεις μίας συσκευής αυξάνονται σημαντικά και είναι υψίστης σημασίας η διαχείριση της ενέργειας από τη συσκευή να γίνεται με έξυπνο και αποδοτικό τρόπο. Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα του προτεινόμενου μοντέλου, η ισχύς μετάδοσης με τη χρήση του RIS είναι σημαντικά μικρότε-

ρη, εξασφαλίζοντας παράλληλα τη μέγιστη ικανοποίηση των χρηστών. Το παραπάνω όφελος είναι εξαιρετικά σημαντικό, καθώς η ενέργεια που αφιερώνεται για μετάδοση δεδομένων μειώνεται αισθητά, οπότε και παρατείνεται η διάρκεια ζωής της μπαταρίας των προαναφερθέντων συσκευών.

6.3 Μελλοντικές Προεκτάσεις

Προεκτάσεις στην παρούσα εργασία θα μπορούσαν να αποτελέσουν η μελέτη σχετικά με τη βέλτιστη τοποθέτηση του RIS, αλλά και η μελέτη της (στοχαστικής) κίνησης των χρηστών, ενώ τέλος, θα μπορούσαν να μελετηθούν και θέματα σχετικά με την ασφαλή μετάδοση δεδομένων και πιθανά σενάρια υποκλοπής τους.

Συγκεκριμένα, επιπλέον μελέτη για την εύρεση της βέλτιστης τοποθεσίας είναι υψίστης σημασίας, σχετικά με τους στόχους που θέλει να επιτύχει το υπό μελέτη τηλεπικοινωνιακό σύστημα ως προς τους χρήστες που μπορεί να εξυπηρετήσει διασφαλίζοντάς τους υψηλή ποιότητα υπηρεσιών, ενώ η μελέτη της κίνησης των χρηστών θα μπορούσε να καταδείξει πιθανά κενά στην ακτίνα κάλυψης στο σενάριο χωρίς την παρουσία RIS και UAV.

Τέλος, η μελέτη θεμάτων ασφαλείας είναι ένα θέμα που δεν έχει διερευνηθεί πλήρως ακόμα στη βιβλιογραφία. Ωστόσο, μία κατεύθυνση μελέτης θα μπορούσε να αφορά τη μελέτη Εφαρμογών της Θεωρίας Παιγνίων και τα κίνητρα που θα μπορούσαν να έχουν οι χρήστες/παίκτες να συμμετέχουν σε συνεργατικά ή μη-συνεργατικά παιχνίδια, ανάλογα με το σκοπό τους (εάν είναι κακόβουλοι ή όχι).

Βιβλιογραφία

- [1] Samith Abeywickrama, Rui Zhang, Qingqing Wu, and Chau Yuen. “Intelligent reflecting surface: Practical phase shift model and beamforming optimization”. In: *IEEE Transactions on Communications* 68.9 (2020), pp. 5849–5863.
- [2] Abayomi O Agbeyangi, Joseph O Odieta, and Adam B Olorunlome. “Review on UAVs used for aerial surveillance”. In: *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology* 3.10 (2016), pp. 5713–5719.
- [3] Muhammad Waseem Akhtar, Syed Ali Hassan, Rizwan Ghaffar, Haejoon Jung, Sahil Garg, and M Shamim Hossain. “The shift to 6G communications: vision and requirements”. In: *Human-centric Computing and Information Sciences* 10.1 (2020), pp. 1–27.
- [4] Ahmed Al-Hilo et al. *Fig. 1: System Model*. American. 2021. URL: <https://arxiv.org/pdf/2103.17162.pdf>.
- [5] Mahmoud Aldababsa, Mesut Toka, Selahattin Gökçeli, Güneş Karabulut Kurt, and Oğuz Kucur. “A tutorial on nonorthogonal multiple access for 5G and beyond”. In: *wireless communications and mobile computing* 2018 (2018).
- [6] Ehab Ali, Mahamod Ismail, Rosdiadee Nordin, and Nor Fadzilah Abdulah. “Beamforming techniques for massive MIMO systems in 5G: overview, classification, and trends for future research”. In: *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering* 18.6 (2017), pp. 753–772.
- [7] Md Shipon Ali, Hina Tabassum, and Ekram Hossain. “Dynamic user clustering and power allocation for uplink and downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) systems”. In: *IEEE access* 4 (2016), pp. 6325–6343.
- [8] Shipon Ali, Ekram Hossain, and Dong In Kim. “Non-orthogonal multiple access (NOMA) for downlink multiuser MIMO systems: User clustering, beamforming, and power allocation”. In: *IEEE access* 5 (2016), pp. 565–577.

- [9] Md Shipon, Hina, Ekram Ali, Tabassum, Hossain. *Fig. 2. Illustration of a 3-user up-link NOMA cluster with SIC at the BS*. American. 2016. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7557079>.
- [10] Venkat Arun and Hari Balakrishnan. “RFocus: Beamforming using thousands of passive antennas”. In: *17th {USENIX} Symposium on Networked Systems Design and Implementation ({NSDI} 20)*. 2020, pp. 1047–1061.
- [11] Saman Atapattu, Rongfei Fan, Prathapasinghe Dharmawansa, Gongpu Wang, Jamie Evans, and Theodoros A Tsiftsis. “Reconfigurable intelligent surface assisted two-way communications: Performance analysis and optimization”. In: *IEEE Transactions on Communications* 68.10 (2020), pp. 6552–6567.
- [12] Silmiya Ayshath, Meril, Mustafa Basthikodi, and Ahmed Faizabadi. “Review: Comprehensive study of 5G and 6G Communication Network”. In: (May 2019).
- [13] Ertugrul Basar and Ibrahim Yildirim. “Reconfigurable intelligent surfaces for future wireless networks: A channel modeling perspective”. In: *IEEE Wireless Communications* (2021).
- [14] Ertugrul Basar, Marco Di Renzo, Julien De Rosny, Merouane Debbah, Mohamed-Slim Alouini, and Rui Zhang. “Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces”. In: *IEEE access* 7 (2019), pp. 116753–116773.
- [15] Tamer Basar. “Lecture notes on non-cooperative game theory”. In: *Game Theory Module of the Graduate Program in Network Mathematics* (2010), pp. 3–6.
- [16] Zdenek Becvar, Michal Vondra, Pavel Mach, Jan Plachy, and David Gesbert. “Performance of mobile networks with UAVs: Can flying base stations substitute ultra-dense small cells?”. In: *European Wireless 2017; 23th European Wireless Conference*. VDE. 2017, pp. 1–7.
- [17] 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.
- [18] Patrick Bolton and Mathias Dewatripont. *Contract theory*. MIT press, 2005.
- [19] Stephen Boyd, Stephen P Boyd, and Lieven Vandenberghe. *Convex optimization*. Cambridge university press, 2004.
- [20] Yuanxin Cai, Zhiqiang Wei, Shaokang Hu, Derrick Wing Kwan Ng, and Jinhong Yuan. “Resource allocation for power-efficient IRS-assisted UAV communications”. In: *2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. IEEE. 2020, pp. 1–7.
- [21] Fernando José Casadevall Palacio, Ramon Agustí Comes, Jordi Pérez Romero, Miguel López Benítez, Sebastien Grimoud, Berna Sayrac, Ioannis Dages, Andreas Polydoros, Janne Riihijärvi, and Jad Nayef Nasreddine. “Radio environmental maps: information models and reference model. Document number D4. 1”. In: (2011).

- [22] Yanyu Cheng, Kwok Hung Li, Yuanwei Liu, Kah Chan Teh, and George K Karagiannidis. “Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) with Multiple Intelligent Reflecting Surfaces”. In: *arXiv preprint arXiv:2011.00211* (2020).
- [23] Jinyong, Ho-Shin Cheon, Cho. *The difference between orthogonal multiple access (OMA) and non-orthogonal multiple access (NOMA), the resource allocated to different user is colored differently: (a) Orthogonal Multiple Access; (b) Non-Orthogonal Multiple Access*. American. 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/320680888_Power_Allocation_Scheme_for_Non-Orthogonal_Multiple_Access_in_Underwater_Acoustic_Communications.
- [24] M-G Cojocaru, S Athar, and EW Thommes. “Adoption costs of new vaccines-A Stackelberg dynamic game with risk-perception transition states”. In: *Infectious Disease Modelling* 3 (2018), pp. 256–265.
- [25] Zhuangzhuang Cui, Ke Guan, Jiayi Zhang, and Zhangdui Zhong. “SNR Coverage Probability Analysis of RIS-Aided Communication Systems”. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (2021).
- [26] Marco Di Renzo, Konstantinos Ntontin, Jian Song, Fadil H Danufane, Xuewen Qian, Fotis Lazarakis, Julien De Rosny, Dinh-Thuy Phan-Huy, Osvaldo Simeone, and Rui Zhang. “Reconfigurable intelligent surfaces vs. relaying: Differences, similarities, and performance comparison”. In: *IEEE Open Journal of the Communications Society* 1 (2020), pp. 798–807.
- [27] Maria Diamanti, Georgios Fragkos, Eirini Eleni Tsiropoulou, and Symeon Papavasiliou. “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.
- [28] Panagiotis D Diamantoulakis. “Resource allocation in wireless networks with energy constraints”. In: *arXiv preprint arXiv:1803.04864* (2018).
- [29] Zhiguo Ding, Xianfu Lei, George K Karagiannidis, Robert Schober, Jinhong Yuan, and Vijay K Bhargava. “A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: Research challenges and future trends”. In: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 35.10 (2017), pp. 2181–2195.
- [30] Anwer Al-Dulaimi, Xianbin Wang, and I Chih-Lin. *5G networks: fundamental requirements, enabling technologies, and operations management*. John Wiley & Sons, 2018.
- [31] Mohamed Elhattab, Mohamed Amine Arfaoui, Chadi Assi, and Ali Ghayeb. “Reconfigurable intelligent surface assisted coordinated multipoint in downlink NOMA networks”. In: *IEEE Communications Letters* (2020).

- [32] 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.
- [33] David Famolari, Narayan Mandayam, David Goodman, and Viral Shah. “A new framework for power control in wireless data networks: Games, utility, and pricing”. In: *Wireless Multimedia Network Technologies*. Springer, 2002, pp. 289–309.
- [34] Guangsheng Feng, Chengbo Wang, Bingyang Li, Haibin Lv, Xiaoxiao Zhuang, Hongwu Lv, Huiqiang Wang, and Xianlang Hu. *A UAV-assisted wireless relay networks for mobile offloading scenario for heterogeneous users, where User 2, User 3 and User 5 require only traffic or computation offloading, while others have both demands. For the users with traffic demand, the UAV will request the relative contents from the BS and then transmit to the users. For the users with computation demand, the UAV and BS server will jointly process the tasks. UAV has a fixed initial and final location [27]*. 2019. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s12083-019-00793-5.pdf>.
- [35] Guangsheng Feng, Chengbo Wang, Bingyang Li, Haibin Lv, Xiaoxiao Zhuang, Hongwu Lv, Huiqiang Wang, and Xianlang Hu. “UAV-assisted wireless relay networks for mobile offloading and trajectory optimization”. In: *Peer-to-Peer Networking and Applications* 12.6 (2019), pp. 1820–1834.
- [36] Georgios Fragkos, Eirini Eleni Tsiropoulou, and Symeon Papavassiliou. “Artificial intelligence enabled distributed edge computing for Internet of Things applications”. In: *2020 16th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*. IEEE. 2020, pp. 450–457.
- [37] Georgios Fragkos, Eirini Eleni Tsiropoulou, and Symeon Papavassiliou. “Disaster Management and Information Transmission Decision-Making in Public Safety Systems”. In: *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. 2019, pp. 1–6. DOI: [10.1109/GLOBECOM38437.2019.9013440](https://doi.org/10.1109/GLOBECOM38437.2019.9013440).
- [38] Georgios Fragkos, Nicholas Kemp, Eirini Eleni Tsiropoulou, and Symeon Papavassiliou. “Artificial Intelligence Empowered UAVs Data Offloading in Mobile Edge Computing”. In: *ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. 2020, pp. 1–7. DOI: [10.1109/ICC40277.2020.9149115](https://doi.org/10.1109/ICC40277.2020.9149115).
- [39] Jiarui Gan and Bo An. “Minimum support size of the defender’s strong Stackelberg equilibrium strategies in security games”. In: *Proc. AAAI Spring Symp. on Appl. Computat. Game Theory*. 2014.
- [40] Rajamani Ganesh, Kaveh Pahlavan, and Zoran Zvonar. *Wireless multimedia network technologies*. Springer Science & Business Media, 2000.

- [41] Hans U Gerber and Gérard Pafum. “Utility functions: from risk theory to finance”. In: *North American Actuarial Journal* 2.3 (1998), pp. 74–91.
- [42] Sarma Gunturi and Fernando Paganini. “Game theoretic approach to power control in cellular CDMA”. In: *2003 IEEE 58th Vehicular Technology Conference. VTC 2003-Fall (IEEE Cat. No. 03CH37484)*. Vol. 4. IEEE. 2003, pp. 2362–2366.
- [43] Rajeev Gupta. “A Comparative Study of Various Generations in Mobile Technology”. In: *International Journal of Engineering Trends and Technology* 28.7 (2015).
- [44] Zhu Han and KJ Liu. *Resource allocation for wireless networks: basics, techniques, and applications*. Cambridge university press, 2008.
- [45] Xiuli He, Ashutosh Prasad, Suresh P Sethi, and Genaro J Gutierrez. “A survey of Stackelberg differential game models in supply and marketing channels”. In: *Journal of Systems Science and Systems Engineering* 16.4 (2007), pp. 385–413.
- [46] Masanori Horiuchi, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, Fumie Ono, and Ryu Miura. “Throughput maximization for long-distance real-time data transmission over multiple UAVs”. In: *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE. 2016, pp. 1–6.
- [47] AL Imoize and AI Oseni. “Investigation and pathloss modeling of fourth generation long term evolution network along major highways in Lagos Nigeria”. In: *Ife Journal of Science* 21.1 (2019), pp. 39–60.
- [48] SM Riazul Islam, Ming Zeng, Octavia A Dobre, and Kyung-Sup Kwak. “Nonorthogonal multiple access (noma): How it meets 5g and beyond”. In: *Wiley 5G Ref: The Essential 5G Reference Online* (2019), pp. 1–28.
- [49] SM Riazul Islam, Nurilla Avazov, Octavia A Dobre, and Kyung-Sup Kwak. “Power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: Potentials and challenges”. In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 19.2 (2016), pp. 721–742.
- [50] SM Riazul Islam, Ming Zeng, Octavia A Dobre, and Kyung-Sup Kwak. “Resource allocation for downlink NOMA systems: Key techniques and open issues”. In: *IEEE Wireless Communications* 25.2 (2018), pp. 40–47.
- [51] Sumin Jeong, Arman Farhang, Nemanja Stefan Perović, and Mark Flanagan. “Low-Complexity Joint CFO and Channel Estimation for RIS-aided OFDM Systems”. In: *arXiv preprint arXiv:2101.11348* (2021).
- [52] Yukuan Ji, Zhaohui Yang, Hong Shen, Wei Xu, Kezhi Wang, and Xiaodai Dong. “Multicell Edge Coverage Enhancement Using Mobile UAV-Relay”. In: *IEEE Internet of Things Journal* 7.8 (2020), pp. 7482–7494.
- [53] Fenyu Jiang and Chris Phillips. “High Throughput Data Relay in UAV Wireless Networks”. In: *Future Internet* 12.11 (2020), p. 193.

- [54] Aiman Kassir, Rudzidatul Akmam Dziyauddin, Hazilah Mad Kaidi, and Mohd Azri Mohd Izhar. “Power Domain Non Orthogonal Multiple Access: A Review”. In: *2018 2nd International Conference on Telematics and Future Generation Networks (TAFGEN)*. IEEE. 2018, pp. 66–71.
- [55] Timotheos Kastrinogiannis, Eirini-Eleni Tsiropoulou, and Symeon Papavassiliou. “Utility-based uplink power control in CDMA wireless networks with real-time services”. In: *International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless*. Springer. 2008, pp. 307–320.
- [56] Tanguy Kerdoncuff, Thomas Galezowski, and Xavier Lagrange. “Mobile relay for LTE: Proof of concept and performance measurements”. In: *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. IEEE. 2018, pp. 1–5.
- [57] Steven Kisseleff, Wallace A Martins, Hayder Al-Hraishawi, Symeon Chatzinotas, and Björn Ottersten. “Reconfigurable Intelligent Surfaces for Smart Cities: Research Challenges and Opportunities”. In: *IEEE Open Journal of the Communications Society* 1 (2020), pp. 1781–1797.
- [58] Refik Caglar Kizilirmak and Hossein Khaleghi Bizaki. “Non-orthogonal multiple access (NOMA) for 5G networks”. In: *Towards 5G Wireless Networks-A Physical Layer Perspective* 83 (2016), pp. 83–98.
- [59] Thomas Lagkas, Vasileios Argyriou, Stamatia Bibi, and Panagiotis Sarigiannidis. “UAV IoT framework views and challenges: towards protecting drones as “things””. In: *Sensors* 18.11 (2018), p. 4015.
- [60] George Leitmann. “On generalized Stackelberg strategies”. In: *Journal of optimization theory and applications* 26.4 (1978), pp. 637–643.
- [61] Bin Li, Zesong Fei, and Yan Zhang. “UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends”. In: *IEEE Internet of Things Journal* 6.2 (2018), pp. 2241–2263.
- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] Xiaonan Liu, Zan Li, Nan Zhao, Weixiao Meng, Guan Gui, Yunfei Chen, and Fumiyuki Adachi. “Transceiver design and multihop D2D for UAV IoT coverage in disasters”. In: *IEEE Internet of Things Journal* 6.2 (2018), pp. 1803–1815.

- [65] Yalin Liu, Hong-Ning Dai, Qubeijian Wang, Mahendra K Shukla, and Muhammad Imran. “Unmanned aerial vehicle for internet of everything: Opportunities and challenges”. In: *Computer communications* 155 (2020), pp. 66–83.
- [66] Yuanwei Liu, Xiao Liu, Xidong Mu, Tianwei Hou, Jiaqi Xu, Marco Di Renzo, and Naofal Al-Dhahir. “Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities”. In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* (2021).
- [67] Dong Ma, Ming Ding, and Mahbub Hassan. “Enhancing cellular communications for UAVs via intelligent reflective surface”. In: *2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. IEEE. 2020, pp. 1–6.
- [68] Xinying Ma, Zhi Chen, Wenjie Chen, Zhuoxun Li, Yaojia Chi, Chong Han, and Shaoqian Li. “Joint channel estimation and data rate maximization for intelligent reflecting surface assisted terahertz MIMO communication systems”. In: *IEEE Access* 8 (2020), pp. 99565–99581.
- [69] Abubakar Makarfi, Khaled Rabie, Omprakash Kaiwartya, Osamah Badarneh, Galymzhan Nauryzbayev, and Rupak Kharel. “Physical Layer Security in RIS-assisted Networks in Fisher-Snedecor Composite Fading”. In: *2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*. IEEE. 2020, pp. 1–6.
- [70] Mario Marchese, Aya Moheddine, and Fabio Patrone. “IoT and UAV integration in 5G hybrid terrestrial-satellite networks”. In: *Sensors* 19.17 (2019), p. 3704.
- [71] Haard Mehta, Darpit Patel, Bhaumik Joshi, and Hardik Modi. “0G to 5G mobile technology: a survey”. In: *Journal of Basic and Applied Engineering Research* 1.6 (2014), pp. 56–60.
- [72] Kais Mekki, Eddy Bajic, and Fernand Meyer. “Indoor positioning system for IoT device based on BLE technology and MQTT protocol”. In: *2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. IEEE. 2019, pp. 787–792.
- [73] M Meraaj and Sumit Kumar. “Evolution of mobile wireless technology from 0G to 5G”. In: *International Journal of Computer Science and Information Technologies* 6.3 (2015), pp. 2545–2551.
- [74] Farhad Meshkati, H Vincent Poor, and Stuart C Schwartz. “Energy-efficient resource allocation in wireless networks”. In: *IEEE Signal Processing Magazine* 24.3 (2007), pp. 58–68.
- [75] Mostafa Mohammadkarimi, Muhammad Ahmad Raza, and Octavia A Dobre. “Signature-based Non-orthogonal Multiple Access (S-NOMA) for Massive Machine-Type Communications in 5G”. In: *arXiv preprint arXiv:1808.07163* (2018).
- [76] Shameek Mukhopadhyay, Vatsal Agarwal, Sourav Sharma, and Vineet Gupta. “A study on wireless communication networks based on different generations”. In: *Int. J. Curr. Trends Eng. Res. (IJCTER)* 2.5 (2016), pp. 300–304.

- [77] Wanli Ni, Xiao Liu, Yuanwei Liu, Hui Tian, and Yue Chen. “Resource allocation for multi-cell IRS-aided NOMA networks”. In: *IEEE Transactions on Wireless Communications* (2021).
- [78] 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).
- [79] Nathan Patrizi, Pavlos Athanasios Apostolopoulos, Kelly Rael, and Eirini Eleni Tsiropoulou. “Socio-Physical Human Orchestration in Smart Cities”. In: *2019 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)*. IEEE. 2019, pp. 115–120.
- [80] Kostas Pentikousis, CALVO RAMON AGUERO, Marta Garcíea-Arranz, and Symeon Papavassiliou. *Mobile Networks and Management: Second International ICST Conference, MONAMI 2010, Santander, Spain, September 22-24, 2010, Revised Selected Papers*. Vol. 68. Springer, 2012.
- [81] James Pita, Manish Jain, Milind Tambe, Fernando Ordóñez, and Sarit Kraus. “Robust solutions to stackelberg games: Addressing bounded rationality and limited observations in human cognition”. In: *Artificial Intelligence* 174.15 (2010), pp. 1142–1171.
- [82] Alexandros Pitilakis, Anna C Tasolamprou, Christos Liaskos, Fu Liu, Odysseas Tsilipakos, Xuchen Wang, Mohammad Sajjad Mirmoosa, Kypros Kossifos, Julius Georgiou, and Andreas Pitsilides. “Software-defined metasurface paradigm: Concept, challenges, prospects”. In: *2018 12th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials)*. IEEE. 2018, pp. 483–485.
- [83] Fei Qi, Xuetian Zhu, Ge Mang, Michel Kadoch, and Wei Li. “UAV network and IoT in the sky for future smart cities”. In: *IEEE Network* 33.2 (2019), pp. 96–101.
- [84] Xuewen Qian, Marco Di Renzo, Jiang Liu, Abla Kammoun, and M-S Alouini. “Beamforming through reconfigurable intelligent surfaces in single-user MIMO systems: SNR distribution and scaling laws in the presence of channel fading and phase noise”. In: *IEEE wireless communications letters* (2020).
- [85] Izhak Rubin and Runhe Zhang. “Placement of UAVs as communication relays aiding mobile ad hoc wireless networks”. In: *MILCOM 2007-IEEE Military Communications Conference*. IEEE. 2007, pp. 1–7.
- [86] Cem U Saraydar, Narayan B Mandayam, and David J Goodman. “Efficient power control via pricing in wireless data networks”. In: *IEEE transactions on Communications* 50.2 (2002), pp. 291–303.

- [87] Arthur S de Sena, Dick Carrillo, Fang Fang, Pedro HJ Nardelli, Daniel B da Costa, Ugo S Dias, Zhiguo Ding, Constantinos B Papadias, and Walid Saad. “What role do intelligent reflecting surfaces play in multi-antenna non-orthogonal multiple access?”. In: *IEEE Wireless Communications* 27.5 (2020), pp. 24–31.
- [88] Marwaan Simaan and Jose B Cruz. “On the Stackelberg strategy in nonzero-sum games”. In: *Journal of Optimization Theory and Applications* 11.5 (1973), pp. 533–555.
- [89] G Smilarubavathy, NV Abiramy, D Pavithra, and R Nidhya. “The Survey on Evolution of Wireless Network Generations”. In: *IJSTE-International Journal of Science Technology & Engineering* 3.5 (2016), pp. 22–27.
- [90] Slawomir Stanczak, Marcin Wiczanowski, and Holger Boche. *Fundamentals of resource allocation in wireless networks: theory and algorithms*. Vol. 3. Springer Science & Business Media, 2009.
- [91] Wankai Tang, Ming Zheng Chen, Xiangyu Chen, Jun Yan Dai, Yu Han, Marco Di Renzo, Yong Zeng, Shi Jin, Qiang Cheng, and Tie Jun Cui. “Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: Path loss modeling and experimental measurement”. In: *IEEE Transactions on Wireless Communications* (2020).
- [92] Yue Tian. “A non-orthogonal multiple access and interference mitigation combined strategy in multi-user networks”. In: *Wireless Personal Communications* 104.1 (2019), pp. 111–128.
- [93] Eirini Eleni Tsiropoulou, Aggelos Kapoukakis, and Symeon Papavassiliou. “Uplink resource allocation in SC-FDMA wireless networks: A survey and taxonomy”. In: *Computer Networks* 96 (2016), pp. 1–28.
- [94] 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.
- [95] Eirini Eleni Tsiropoulou, Giorgos Mitsis, and Symeon Papavassiliou. “Interest-aware energy collection & resource management in machine to machine communications”. In: *Ad Hoc Networks* 68 (2018), pp. 48–57.
- [96] 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 (2016), pp. 2656–2667.
- [97] 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.

- [98] Eirini Eleni Tsiropoulou, Georgios K Katsinis, Panagiotis Vamvakas, and Symeon Papavassiliou. “Efficient uplink power control in multi-service two-tier femtocell networks via a game theoretic approach”. In: *2013 IEEE 18th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*. IEEE. 2013, pp. 104–108.
- [99] Valeriu Ungureanu. *Pareto-Nash-Stackelberg game and control theory*. Vol. 80. Springer, 2018.
- [100] Panagiotis Vamvakas, Eirini Eleni Tsiropoulou, and Symeon Papavassiliou. “A user-centric economic-driven paradigm for rate allocation in non-orthogonal multiple access wireless systems”. In: *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2018.1 (2018), pp. 1–14.
- [101] 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.
- [102] 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*. 2019, pp. 2134–2142. DOI: [10.1109/INFOCOM.2019.8737443](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2019.8737443).
- [103] 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.
- [104] 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.
- [105] 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.
- [106] Rath Vannithamby and Shilpa Talwar. *Towards 5G: Applications, requirements and candidate technologies*. John Wiley & Sons, 2017.
- [107] David H Von Seggern. *CRC standard curves and surfaces with mathematica*. CRC Press, 2017.
- [108] Jingjing Wang, Chunxiao Jiang, Zhongxiang Wei, Cunhua Pan, Haijun Zhang, and Yong Ren. “Joint UAV hovering altitude and power control for space-air-ground IoT networks”. In: *IEEE Internet of Things Journal* 6.2 (2018), pp. 1741–1753.

- [109] Zhiqiang Wei, Yuanxin Cai, Zhuo Sun, Derrick Wing Kwan Ng, Jinhong Yuan, Mingyu Zhou, and Lixin Sun. “Sum-rate maximization for IRS-assisted UAV OFDMA communication systems”. In: *IEEE Transactions on Wireless Communications* (2020).
- [110] Andrzej Wilczyński, Agnieszka Jakóbkik, and Joanna Kołodziej. “Stackelberg security games: Models, applications and computational aspects”. In: *Journal of Telecommunications and Information Technology* (2016).
- [111] 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.
- [112] Ximing Xie, Fang Fang, and Zhiguo Ding. “Joint Optimization of Beamforming, Phase-Shifting and Power Allocation in a Multi-cluster IRS-NOMA Network”. In: *arXiv preprint arXiv:2009.06233* (2020).
- [113] Gang Yang, Xinyue Xu, and Ying-Chang Liang. “Intelligent reflecting surface assisted non-orthogonal multiple access”. In: *2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. IEEE. 2020, pp. 1–6.
- [114] Helin Yang and Xianzhong Xie. “Energy-efficient joint scheduling and resource management for UAV-enabled multicell networks”. In: *IEEE Systems Journal* 14.1 (2019), pp. 363–374.
- [115] Liang Yang, Yin Yang, Mazen O Hasna, and Mohamed-Slim Alouini. “Coverage, probability of SNR gain, and DOR analysis of RIS-aided communication systems”. In: *IEEE Wireless Communications Letters* 9.8 (2020), pp. 1268–1272.
- [116] Zhaohui Yang, Minzhe Chen, Walid Saad, Wei Xu, Mohammad Shikh-Bahaei, H Vincent Poor, and Shuguang Cui. “Resource Allocation for Wireless Communications with Distributed Reconfigurable Intelligent Surfaces”. In: *GLOBECOM 2020-2020 IEEE Global Communications Conference*. IEEE. 2020, pp. 1–6.
- [117] Zheng Yang, Zhiguo Ding, Pingzhi Fan, and George K Karagiannidis. “On the performance of non-orthogonal multiple access systems with partial channel information”. In: *IEEE Transactions on Communications* 64.2 (2015), pp. 654–667.
- [118] Ibrahim Yildirim, Ali Uyrus, and Ertugrul Basar. “Modeling and analysis of reconfigurable intelligent surfaces for indoor and outdoor applications in future wireless networks”. In: *IEEE Transactions on Communications* (2020).
- [119] Ibrahim Yildirim, Fatih Kilinc, Ertugrul Basar, and George C Alexandropoulos. “Hybrid RIS-empowered reflection and decode-and-forward relaying for coverage extension”. In: *IEEE Communications Letters* (2021).
- [120] Muhamet Yildiz. “14.12 Economic Applications of Game Theory, Fall 2005”. In: (2005).

-
- [121] Li You, Jiayuan Xiong, Derrick Wing Kwan Ng, Chau Yuen, Wenjin Wang, and Xiqi Gao. “Energy Efficiency and Spectral Efficiency Tradeoff in RIS-Aided Multiuser MIMO Uplink Transmission”. In: *IEEE Transactions on Signal Processing* (2020).
- [122] Ming Zeng, Xingwang Li, Gen Li, Wanming Hao, and Octavia A Dobre. “Sum rate maximization for IRS-assisted uplink NOMA”. In: *IEEE Communications Letters* 25.1 (2020), pp. 234–238.
- [123] 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).
- [124] 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)*. IEEE. 2019, pp. 1–6.
- [125] 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.
- [126] Jiakuo Zuo, Yuanwei Liu, Zhijin Qin, and Naofal Al-Dhahir. “Resource allocation in intelligent reflecting surface assisted NOMA systems”. In: *IEEE Transactions on Communications* 68.11 (2020), pp. 7170–7183.

Απόδοση

Διαδίκτυο των Πραγμάτων

Θεωρία Παιγνίων

Κέρδος Καναλιού

σχηματισμός δέσμης

δυναμική των βέλτιστων αποκρίσεων

Μη-Συνεργατικό Παίγνιο

Επαναπρογραμματιζόμενες Έξυπνες Επιφάνειες Reconfigurable Intelligent Surfaces

Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα

Περιοχή

Μεταπομπή

Αλλαγή Κυψέλης

κλιμακωσιμότητα

ευελιξία

Εύρος Ζώνης

λανθάνων χρόνος

Ποιότητα της Υπηρεσίας

φασματική απόδοση

Υπερ-Επιφάνεια

βήμα κεραίας

στρατηγικό προφίλ

συνάρτηση ευχαρίστησης

συνάρτηση ανταμοιβής

Ξενόγλωσσος όρος

Internet of Things

Game Theory

Channel Gain

beamforming

best response dynamics

Non-Cooperative Game

Reconfigurable Intelligent Surfaces

Unmanned Aerial Vehicles

Roaming

Handover

Handoff

scalability

flexibility

Bandwidth

latency

Quality of Service

spectral efficiency

Hyper-Surface

antenna spacing

strategy profile

utility function

payoff function

