



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

**Βελτιστοποίηση Δρομολόγησης Σήματος σε
Προγραμματιζόμενα Περιβάλλοντα Διάδοσης
με Χρηση Μεταευρετικών Αλγορίθμων**

Αντωνιάδης Χρήστος - 9615

Εκπόνηση πτυχιακής ως μέρος του
Προπτυχιακού Τίτλου Σπουδών

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Παναγιώτης Διαμαντούλακης

Συνεπιβλέπων: Δρ. Δημήτριος Τυροβολάς



ARISTOTLE UNIVERSITY OF THESSALONIKI

Heuristic Resource Allocation for multi-SDM multi-User Settings

Antoniadis Christos - 9615

MASTER THESIS

Department of Electrical and Computer Engineering

Supervisor: Dr. Panagiotis Diamantoulakis

Cosupervisor: Dr. Dimitrios Tirovolas

Σύνοψη

Η εξέλιξη των δικτύων 6G αντιπροσωπεύει μια σημαντική πρόοδο στις κινητές επικοινωνίες, με στόχο τη δημιουργία ενός Ευφυούς Δικτύου των Πλάντων. Αυτή η προσέγγιση υπερβαίνει τη σύνδεση ανθρώπων, συσκευών, δεδομένων και συστημάτων· επικεντρώνεται στην ενσωμάτωση γνωστικής νοημοσύνης στο δίκτυο, επιτρέποντάς του να μαθαίνει, να προσαρμόζεται και να λαμβάνει αυτόνομα αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο.

Η έλευση των Προγραμματιζόμενων Ασύρματων Περιβαλλόντων (PWEs) αποτελεί μια ελπιδοφόρα εξέλιξη προς την υλοποίηση αυτού του οράματος, μετατρέποντας το φαινόμενο της ασύρματης διάδοσης σε έναν πόρο καθοριζόμενο από λογισμικό, αξιοποιώντας τις Μεταεπιφάνειες Οριζόμενες από Λογισμικό (SDMs). Αυτές οι νέες τεχνολογίες έχουν δείξει ότι τα ασύρματα κύματα μπορούν να δρομολογηθούν μέσα σε έναν χώρο, αντί να διαδίδονται με τον συνηθισμένο, χαοτικό τρόπο, αποφέροντας σημαντικά οφέλη στην αποδοτικότητα των επικοινωνιών, καθώς και εντελώς νέες εφαρμογές. Ένα νέο ερευνητικό πεδίο έχει αναδειχθεί, επικεντρωμένο στη μοντελοποίηση αυτών των δυνατοτήτων ως δικτυακούς πόρους και στην κατανομή τους στους χρήστες.

Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα διατριβή παρουσιάζει το HERA, έναν ευρετικό κατανεμητή πόρων που λαμβάνει ως είσοδο μια διάταξη χρηστών και SDMs και παράγει τη βέλτιστη διαμόρφωση των τελευταίων για αποδοτική κοινή χρήση. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης καταδεικνύουν σημαντική αποτελεσματικότητα στην επίλυση αυτού του προβλήματος, ενώ ο ευρετικός χαρακτήρας του HERA θέτει τη βάση για μια ευέλικτη διαμόρφωση σύνθετων στόχων χρηστών στο μέλλον.

Λέξεις-κλειδιά: Μεταεπιφάνειες Οριζόμενες από Λογισμικό, Προγραμματιζόμενα Ασύρματα Περιβάλλοντα, Κατανομή Πόρων, Ευρετικοί Αλγόριθμοι.

Abstract

The evolution of 6G networks represents a significant breakthrough in mobile communication, aiming to create an Intelligent Network of Everything. This approach goes beyond just connecting people, devices, data, and systems; it focuses on integrating cognitive intelligence into the network, enabling it to learn, adapt, and autonomously make real-time decisions.

The advent of Programmable Wireless Environments (PWEs) displays promise in the realization of this vision, by transforming the wireless propagation phenomenon into a software-defined resource, leveraging Software defined metasurfaces (SDMs). These new technologies have shown that wireless waves can be routed within a space, contrary to the regular, chaotic wireless propagation, yielding considerable benefits to communication efficiency, and even completely new applications. A new topic has risen, in the context of modeling these capabilities as network resources, and allocating them to users.

In this context, the current thesis contributes HERA, a heuristic resource allocator that receives a setup with users and SDMs as input, and produces the necessary configuration of the latter, for efficient shared performance. Simulation results demonstrate considerable efficiency in this task, while the heuristic nature of HERA sets the basis for a flexible definition of complex user objectives in the future.

Keywords: Software-Defined Meta-surfaces, Programmable Wireless Environments, Resource Allocation, Heuristic Algorithms.

Eυχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς όλους όσοι με στήριξαν και συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες και συνεπιβλέποντες καθηγητές μου, για την πολύτιμη καθοδήγηση, τη συνεχή υποστήριξη και τις ουσιαστικές παρατηρήσεις τους σε όλη τη διάρκεια της έρευνας μου. Η συμβολή τους υπήρξε καθοριστική τόσο στην ανάπτυξη της εργασίας όσο και στη δική μου ακαδημαϊκή εξέλιξη.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου και φίλους μου, για την αμέριστη υποστήριξη, τη συνεργασία και τις εποικοδομητικές συζητήσεις που είχαμε κατά τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην οικογένειά μου, για την αδιάκοπη συμπαράσταση, την υπομονή και την ενθάρρυνση που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες

iv

Λίστα Εικόνων

vii

Λίστα Πινάκων

ix

1 Εισαγωγή	I
1.1 Η 6η Γενιά του Διαδικτύου(6g)	I
1.2 Προγραμματιζόμενο Ασύρματο Περιβάλλον (ΠΑΠ)	2
1.2.1 Δομή του RIS και υλοποιήσεις	3
1.2.2 Λειτουργίες του RIS	5
1.2.3 Πλεονεκτήματα του RIS	8
1.2.4 Εφαρμογές του RIS	9
2 Ανάλυση του προβλήματος	II
2.1 Πρόβλημα	II
2.1.1 Μη Ιδανική Λειτουργία του RIS	12
2.2 Μοντελοποίηση του προβλήματος	13
2.3 Αλγόριθμοι Προσομοίωσης	15
2.3.1 Αλγόριθμος Αρχικοποίησης Γράφων	15
2.3.2 Αλγόριθμος Προσομοίωσης Ασύρματης Διάδοσης	20
2.4 Απώλειες διαδρομής	23
2.5 Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης Δυναμικών Γράφων	24
2.6 Καταλληλή Προσέγγιση του Πρόβληματος	26
3 Επίλυση του Προβλήματος	27
3.1 Αλγόριθμοι Συμήνους	27
3.2 Τεχνικές Βελτιστοποίησης Πολλαπλών Στόχων	28
3.2.1 Τρόποι Αξιολόγησης Λύσεων	28
3.2.2 Αλγόριθμος Fast Non-Dominated Sorting	29
3.2.3 Απόσταση Συνωστισμού (Crowding Distance)	30
3.2.4 Τεχνικές Αναζήτησης	32
3.3 Προτεινόμενη Μεταευρετική Μέθοδος - HERA	33

3.4	NSGA-II	38
4	Αποτελέσματα	41
4.1	Συγκρίσεις Αλγορίθμων	41
4.1.1	2 Χρήστες	44
4.1.2	4 Χρήστες	47
4.1.3	8 Χρήστες	50
4.2	Επίδραση Παραμέτρων στην ποιότητα του σήματος	53
5	Συμπεράσματα και Μελλοντικές Διερευνήσεις	56
5.1	Συμπεράσματα	56
5.2	Μελλοντικές Διερευνήσεις	57

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Smart City - 6g Networking	2
1.2	PWE concept	3
1.3	RIS surfaces	4
1.4	Metasurface with Varactor diodes	5
1.5	Software Defined Metasurface (SDM)	6
1.6	Wavefront Sharpening Functionality	7
1.7	Various RIS Applications	10
2.1	Graph Model	14
2.2	Routing Table of a Node	15
2.3	Visualization of Graph Initialization Allgorithm Output	18
2.4	Output of the Propagation Algorithm. Visualization of paths to receiver	23
3.1	Visualization Of a Pareto Front	29
3.2	Visualization of Swarm Integration With the Graph Model	34
3.3	Steps of the Swarm Optimization Process	34
4.1	Comparative performance between the proposed HERA,NSGA-II and random search in terms of achieved front hyperVolume for 2 Users.	44
4.2	Pareto front visualization for various graphs of 2 Users after 1000 repetitions.	45
4.3	Pareto front visualization for various graphs of 2 Users after 1000 repetitions.	46
4.4	Comparative performance between the proposed HERA,NSGA-II and random search in terms of achieved front hyperVolume for 4 Users.	47
4.5	Pareto front visualization for various graphs of 4 Users after 1500 repetitions.	48
4.6	Pareto front visualization for various graphs of 4 Users after 1500 repetitions.	49
4.7	Comparative performance between the proposed HERA,NSGA-II and random search in terms of achieved front hyperVolume for 8 Users.	50
4.8	Pareto front visualization for various graphs of 8 Users after 4500 repetitions.	51
4.9	Pareto front visualization for various graphs of 8 Users after 4500 repetitions.	52
4.10	(a) 2 Users	54
4.11	(b) 4 Users	54
4.12	(c) 8 Users	54
4.13	Impact of the number of users on signal quality for different configurations	54
4.14	(a) 8 Tiles	55
4.15	(b) 16 Tiles	55
4.16	(c) 32 Tiles	55

4.17 (d) 64 Tiles	55
4.18 Impact of number of Users on signal quality for different Tile configurations	55

Κατάλογος Πινάκων

4.1	Μεταβλητές Εισόδου Προσομοίωσης	43
4.2	Μεταβλητές Εισόδου HERA	43
4.3	Μεταβλητές Εισόδου NSGA-II	43

Κεφάλαιο Ι

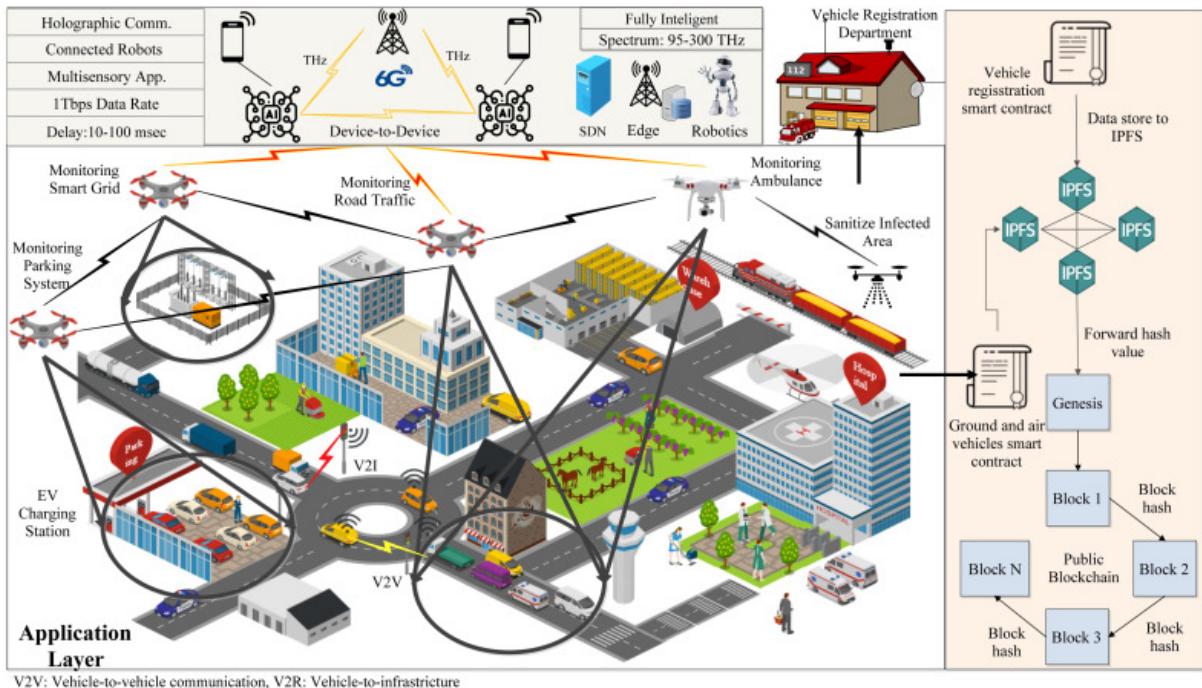
Εισαγωγή

I.I Η 6η Γενιά του Διαδικτύου(6g)

Η επερχόμενη 6η γενιά του διαδικτύου αναμένεται να φέρει πολύ σημαντικές αλλαγές στον κόσμο των τηλεπικοινωνιών. Εκτός από τις συνήθεις βελτιώσεις που εισήγαγαν οι προηγούμενες γενιές του διαδικτύου, η νέα γενιά πρωτοπορεί, στοχεύοντας στη δημιουργία ενός έξυπνου, διασυνδεδεμένου τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Συγκεκριμένα, ο στόχος είναι να προσδοθεί στα επερχόμενα συστήματα η δυνατότητα να προσαρμόζονται δυναμικά στο περιβάλλον τους, επωφελούμενα από μια βελτιστοποιημένη ενορχήστρωση του δικτύου τους.

Πλέον, το δίκτυο θα μπορεί να παραλληλιστεί με μια έξυπνη οντότητα, με σκοπό όχι μόνο την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων στους χρήστες, αλλά και την ανταλλαγή και αξιοποίηση πληροφοριών στο πλαίσιο ενός έξυπνου περιβάλλοντος. Για παράδειγμα, σε μια έξυπνη πόλη, θα μπορεί να προβλέπει την κίνηση, να ρυθμίζει τα φανάρια και να διαχειρίζεται την ενέργεια, ενώ σε βιομηχανικά περιβάλλοντα θα μπορεί να παρακολουθεί μηχανήματα, να προβλέπει βλάβες και να βελτιστοποιεί την παραγωγή[1].

Παρά την ελκυστικότητα αυτής της ιδέας, η υλοποίησή της παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες. Η ικανότητα του δικτύου να ανταπεξέρχεται στις ταχείες αλλαγές του περιβάλλοντος θέτει ως απαραίτητη προϋπόθεση την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του με εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια. Εφόσον η στοχαστική φύση της μετάδοσης Η/Μ κυμάτων δεν το επιτρέπει αυτό, η μετατροπή της διάδοσης σε ένα ελεγχόμενο φαινόμενο αποτελεί θεμελιώδες βήμα για τη μετάβασή μας στην 6η γενιά του διαδικτύου.



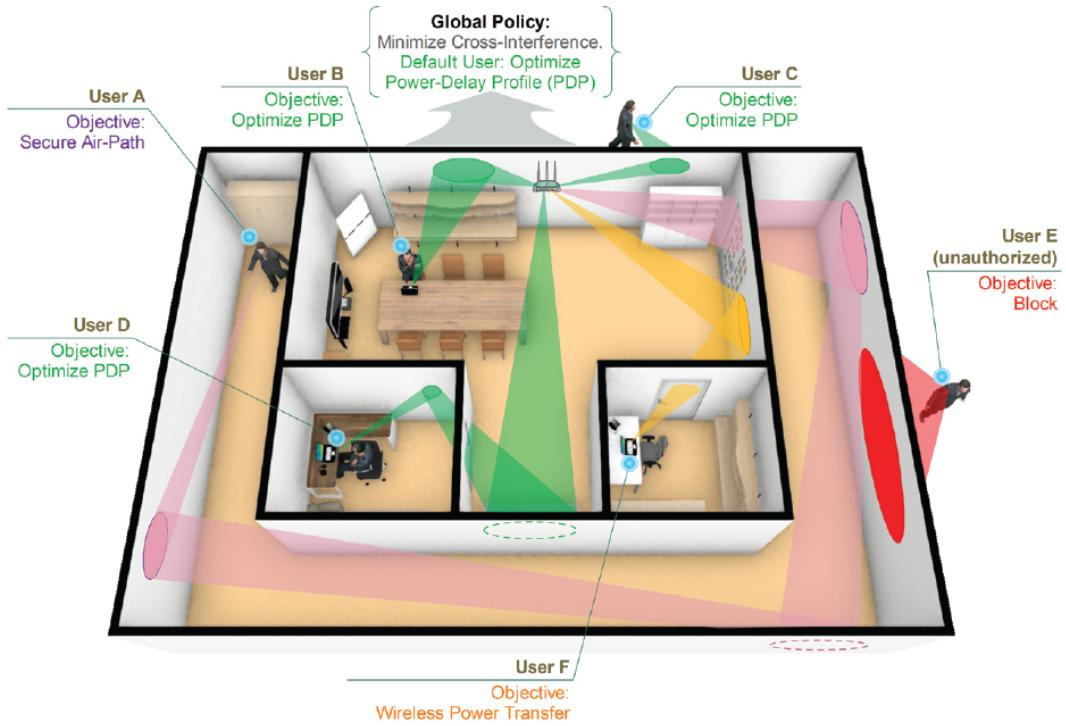
Σχήμα 1.1: Smart City - 6G Networking

1.2 Προγραμματιζόμενο Ασύρματο Περιβάλλον (ΠΑΠ)

Το ασύρματο περιβάλλον αποτελείται από ένα σύνολο φυσικών αντικειμένων που μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μεταξύ των συσκευών που επικοινωνούν. Η ποσότητα και η δυναμική μεταβολή διαφόρων παραμέτρων, όπως η τοποθεσία και η διάταξη αυτών των αντικειμένων, προκαλούν μη ελεγχόμενες αλληλεπιδράσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μέχρι τώρα αντιμετώπιση του καναλιού να θεωρείται ως μια στοχαστική οντότητα.

Ωστόσο, μια νέα προοπτική έχει αναδυθεί, αμφισβητώντας τη μέχρι τώρα θεώρηση, και προτείνει τη δημιουργία ενός «έξυπνου» ραδιο-περιβάλλοντος (Smart Radio Environment - SRE) [2], το οποίο μπορεί να προγραμματίζεται ανάλογα με τις απαιτήσεις της μετάδοσης. Σε αυτό το πλαίσιο, το «έξυπνο» και επαναπρογραμματιζόμενο περιβάλλον μετατρέπει τη διαδικασία της ασύρματης μετάδοσης από ένα στοχαστικό σε ένα ντετερμινιστικό φαινόμενο[3]. Κατά συνέπεια, τα διάφορα αντίγραφα του σήματος που φτάνουν στον δέκτη δεν έχουν τυχαία χαρακτηριστικά (όπως τυχαίο πλάτος ή φάση), αλλά η ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά του περιβάλλοντος μπορεί να ελέγχεται.

Η κύρια τεχνολογία που επιτρέπει τη δημιουργία ενός έξυπνου/ επαναπρογραμματιζόμενου ασύρματου περιβάλλοντος (Programmable Wireless Environment – PWE) είναι οι λεγόμενες Επαναπρογραμματιζόμενες Έξυπνες Επιφάνειες (Reconfigurable Intelligent Surfaces – RISs) [4][5]. Τα RIS αποτελούν



Σχήμα 1.2: PWE concept

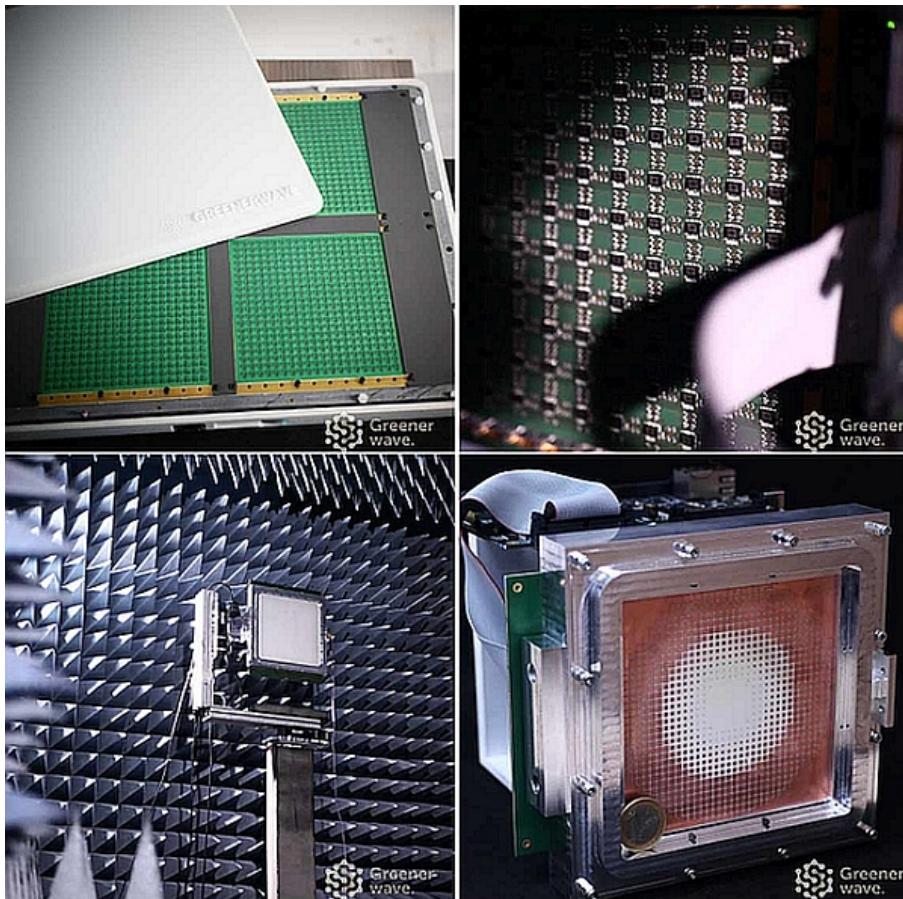
παθητικές, επίπεδες επιφάνειες κατασκευασμένες από ηλεκτρομαγνητικά (μετα-)υλικά (καθώς και από άλλες δύνατες υλοποιήσεις), οι οποίες διαχειρίζονται το προσπίπτον κύμα με τέτοιο τρόπο ώστε να μεταβάλλονται τα βασικά του χαρακτηριστικά. Όλη αυτή η διαδικασία επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενσωματωμένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ελέγχου.

1.2.1 Δομή του RIS και υλοποιήσεις

Σε ένα Προγραμματίζόμενο Ασύρματο Περιβάλλον (PWE), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, μία ή περισσότερες Επαναδιαμορφώσιμες Έξυπνες Επιφάνειες (RIS) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επηρεάσουν τη διάδοση των ασύρματων σημάτων με τρόπο που να βελτιώνει τη συνολική απόδοση του συστήματος.

Ουσιαστικά, οποιαδήποτε παθητική επιφάνεια που μπορεί να αναδιαμορφωθεί δυναμικά ώστε να χειρίζεται τα προσπίπτοντα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και να μεταβάλλει τις συνθήκες του καναλιού μπορεί να χαρακτηριστεί ως RIS. Με βάση τον παραπάνω ορισμό ο τρόπος υλοποίησης του RIS μπορεί να χωριστεί σε δύο σημαντικές κατηγορίες [6].

- **Ανακλαστική Διάταξη (Reflect-Array):** Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, ο πιο απλός τρόπος για την υλοποίηση μιας Επαναδιαμορφώσιμης Έξυπνης Επιφάνειας (RIS) είναι η χρήση μιας παθητικής ανακλαστικής



Σχήμα 1.3: *RIS surfaces*

διάταξης (reflectarray), της οποίας η τερματική σύνδεση των στοιχείων της κεραίας μπορεί να ελέγχεται ηλεκτρονικά ώστε να ανακλά και να μετατοπίζει τη φάση του προσπίπτοντος σήματος [7]. Κάθε στοιχείο μεμονωμένα έχει πολύ περιορισμένη επίδραση στα διαδιδόμενα κύματα, αλλά ένας επαρκώς μεγάλος αριθμός στοιχείων μπορεί να διαμορφώσει αποτελεσματικά το προσπίπτοντ κύμα με ελεγχόμενο τρόπο.[6]

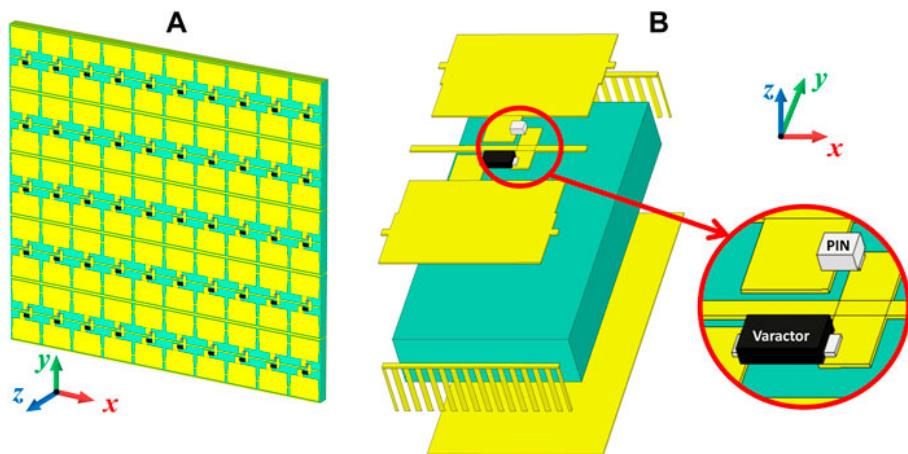
- **Μεταεπιφάνεια (Metasurface)** Μια πιο εξελιγμένη υλοποίηση μιας Επαναδιαμορφώσιμης Έξυπνης Επιφάνειας (RIS) μπορεί να επιτευχθεί μέσω μεταεπιφανειών (metasurfaces) [8]. Μια μεταεπιφάνεια είναι η δισδιάστατη επίπεδη μορφή των μεταϋλικών τα οποία είναι τεχνητά συνθετικά υλικά με ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες που δεν απαντώνται σε φυσικά υλικά. Αρχικά οι μεταεπιφάνειες αναπτύχθηκαν για εφαρμογές στον οπτικό τομέα ώστε να επιτρέψουν την οικονομική και ανθεκτική κατασκευή επίπεδων οπτικών εξαρτημάτων αντικαθιστώντας πιο ακριβά προσαρμοσμένα οπτικά στοιχεία.

Μια μεταεπιφάνεια αποτελείται από μεγάλο αριθμό πυκνά τοποθετημένων εξαιρετικά μικρών σε μήκος κύματος συντονιστικών δομών που ονομάζονται pixels ή μετα-άτομα (meta-atoms)[8]. Τα μετα-άτομα όσο και τα διαστήματα μεταξύ τους είναι πολύ μικρότερα από το μήκος κύματος γεγονός που προσφέρει πολλαπλούς βαθμούς ελευθερίας στη διαμόρφωση των προσπιπτόντων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Αρχικά οι μεταεπιφάνειες ήταν στατικές αλλά μεταγενέστερα σχέδια ενσωμάτωσαν ημιαγωγικά στοιχεία που επιτρέπουν δυναμική επαναδιαμόρφωση σε πραγματικό χρόνο μεταβάλλοντας έτσι τη δομή των μετα-ατόμων και την ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά της επιφάνειας[9].

Αυτή η επαναδιαμορφωσιμότητα επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση ηλεκτρικά μηχανικά ή θερμικά ρυθμιζόμενων στοιχείων. Οι ηλεκτρικά ρυθμιζόμενες μεταεπιφάνειες είναι ιδιαίτερα ελκυστικές καθώς μπορούν να κατασκευαστούν οικονομικά χρησιμοποιώντας καλά κατανοημένες ημιαγωγικές τεχνολογίες και να προσαρμόζονται αρκετά γρήγορα ώστε να συμβαδίζουν με τη χρονικά μεταβαλλόμενη φύση του ασύρματου καναλιού.

Για παράδειγμα η ενσωμάτωση μεταβλητών διόδων (varactor diodes) ή υγρών κρυστάλλων μέσα στα μετα-άτομα επιτρέπει δυναμική ρύθμιση κάτι κρίσιμο για τις ασύρματες εφαρμογές καθώς επιτρέπει προσαρμογή στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του καναλιού[6].



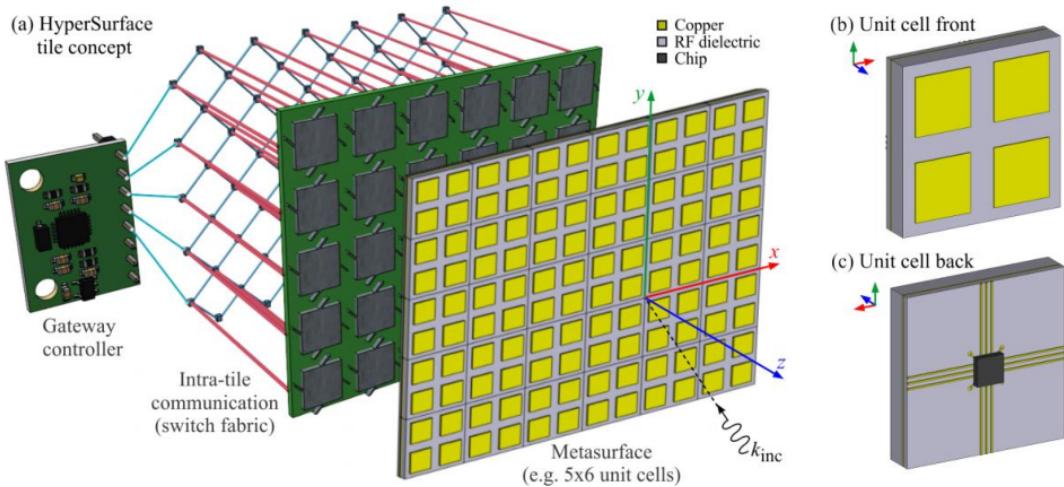
Σχήμα 1.4: Metasurface with Varactor diodes

Μια πιο προηγμένη μορφή δυναμικών μετεπιφανειών, αποτελούν ο οριζόμενες από λογισμικό μετεπιφάνειες (Software-Defined Metasurfaces - SDMs), οι οποίες ενσωματώνουν ηλεκτρονικά και προγραμματιζόμενα στοιχεία για την ευέλικτη και ταχεία αναδιαμόρφωση των ηλεκτρομαγνητικών τους ιδιοτήτων σε πραγματικό χρόνο [4].

Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές δυναμικές μεταεπιφάνειες που βασίζονται σε παθητικά ή ημιαγωγικά ρυθμιζόμενα στοιχεία, οι SDMs χρησιμοποιούν ολοκληρωμένες διατάξεις ελέγχου που επιτρέπουν την απομακρυσμένη προγραμματιστική διαμόρφωση μέσω ψηφιακών σημάτων [10]. Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει τη δυναμική προσαρμογή των ιδιοτήτων σκέδασης, μετάδοσης ή απορρόφησης σε χρονοκλίμακες συμβατές με εφαρμογές ασύρματων επικοινωνιών, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη ευελιξία και αποδοτικότητα στη διαχείριση του φάσματος [11].

1.2.2 Λειτουργίες του RIS

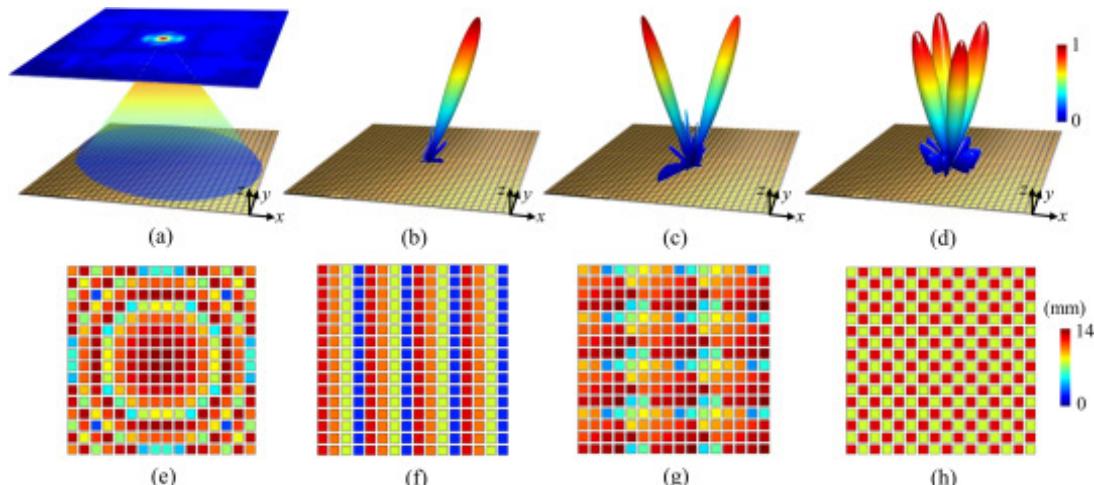
Οι επαναπρογραμματιζόμενες έξυπνες επιφάνειες (RIS) μπορούν να εκτελέσουν διάφορες λειτουργίες-συναρτήσεις[12]



Σχήμα 1.5: Software Defined Metasurface (SDM)

- **Εστίαση (Focusing):** Οι προγραμματιζόμενες μεταεπιφάνειες έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για την εστίαση των ηλεκτρομαγνητικών (EM) πεδίων. Εφαρμόζοντας ειδικά σχεδιασμένους κωδικοποιημένους πίνακες, μια προγραμματιζόμενη μεταεπιφάνεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δυναμική δημιουργία αυθαίρετων σημείων εστίασης, ενώ η ένταση του πεδίου σε κάθε σημείο μπορεί επίσης να ελεγχθεί ανεξάρτητα[13].
- **Ανάκλαση (Reflection):** Οι μεταεπιφάνειες μπορούν να προκαλέσουν αιφνίδια μετατόπιση φάσης στην επιφάνειά τους μέσω του σχεδιασμού της αντίστοιχης βασικής κυψελίδας, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ασυνέχειας φάσης. Βασισμένη στην ιδέα των γενικευμένων νόμων του Snell, μια προγραμματιζόμενη μεταεπιφάνεια μπορεί να επιτύχει ανώμαλη ανάκλαση χρησιμοποιώντας την αλληλουχία χωρικής κωδικοποίησης φάσης[14].
- **Διάχυση (Diffusion):** Με τη βελτιστοποίηση του κωδικοποιημένου προτύπου, οι κωδικοποιημένες μεταεπιφάνειες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση του αποτυπώματος σκέδασης μέσω της στρατηγικής της διάχυτης σκέδασης τόσο στη μικροκυματική όσο και στην τεραινίανή περιοχή[15]. Επιπλέον, η πρόσφατα προτεινόμενη διαμόρφωση χωροχρονικής κωδικοποίησης σε προγραμματιζόμενες μεταεπιφάνειες μπορεί επίσης να αναδιανείμει την σκεδαζόμενη ισχύ τόσο στον χώρο όσο και στο πεδίο της συχνότητας με ομοιόμορφο τρόπο, οδηγώντας έτσι σε πρωτοφανή επίπεδα μείωσης της Διατομής Ραντάρ (RCS)[16].
- **Απορρόφηση (Absorption):** Τα μεταϋλικά έχουν μελετηθεί εκτενώς για απορρόφηση την τελευταία δεκαετία. Οι περισσότεροι απορροφητές μεταϋλικών είναι σχεδιασμένοι για μια σταθερή ζώνη συχνοτήτων. Τα προγραμματιζόμενα μεταϋλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απορρόφηση των προσπιπτόντων κυμάτων σε διαφορετικές συχνότητες μέσω ηλεκτρικού ελέγχου των τάσεων πόλωσης στα βαραστορίστρα, επεκτείνοντας έτσι το εύρος λειτουργίας των απορροφητών[17].

- **Μετωπικό κύμα (Wavefront Shaping):** Οι μεταεπιφάνειες έχουν αποδείξει τις ισχυρές τους δυνατότητες στη διαμόρφωση των μετώπων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Οι κωδικοποιημένες και προγραμματιζόμενες μεταεπιφάνειες πλεονεκτούν καθώς απλοποιούν τις διαδικασίες σχεδίασης και επιτρέπουν την εναλλαγή μεταξύ διαφορετικών λειτουργιών σε πραγματικό χρόνο, διαμορφώνοντας τόσο τα μέτωπα ανάκλασης όσο και διάδοσης σε μια κοινή επιφάνεια[18]. Επιπλέον, η διαμόρφωση μετώπου κύματος σε όλο τον χώρο μπορεί να μεταβαίνει δυναμικά μεταξύ λειτουργιών ανάκλασης ή διάδοσης μέσω της αλλαγής των καταστάσεων των PIN διόδων[19].
- **Πόλωση (Polarization):** Η πόλωση αποτελεί μια πολύ σημαντική διάσταση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, και ο έλεγχος της κατάστασης πόλωσης αποτελεί διαχρονικό αντικείμενο έρευνας. Οι προγραμματιζόμενες μεταεπιφάνειες διαθέτουν εξαιρετικές ικανότητες στον έλεγχο της πόλωσης, επιτρέποντας τον επαναδιαμορφώσιμο μετασχηματισμό γραμμικής πόλωσης[20]. Επιπλέον, μια προγραμματιζόμενη μεταεπιφάνεια που βασίζεται σε μεταβλητούς πυκνωτές (varactors) μπορεί να μεταβαίνει δυναμικά μεταξύ λειτουργιών μετατροπής γραμμικής σε γραμμική, γραμμικής σε ελλειπτική και γραμμικής σε κυκλική πόλωση[21].



Σχήμα 1.6: Wavefront Shaping Functionality

Ενώ οι επιπρόσθετες λειτουργικότητες που μπορεί να επιτελέσει μια μετεπιφάνεια οριζόμενη από λογισμικό (SDM) είναι οι εξής: [12]

- **Ασύμμετρη μετάδοση (Asymmetric Transmission):** Οι μεταεπιφάνειες μπορούν να εισάγουν απότομη μετατόπιση φάσης στην επιφάνειά τους μέσω του σχεδιασμού της αντίστοιχης μοναδιαίας κυψέλης, με αποτέλεσμα ασυνέχειες στη φάση. Βασισμένη στην ιδέα των γενικευμένων νόμων του Snell, μια προγραμματιζόμενη μεταεπιφάνεια μπορεί να επιτύχει ανώμαλη ανάκλαση χρησιμοποιώντας μια ακολουθία χωρικής κωδικοποίησης με κλίση φάσης[14].

- **Δημιουργία δεσμών στροβιλισμού (Vortex Beams):** Οι στροβιλώδεις κυματομορφές που μεταφέρουν τροχιακή στροφορμή (OAM) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ορθογωνικό πολυπλεξία στην επικοινωνία μέσω διαφορετικών τρόπων OAM, διαθέτοντας ελικοειδή κυματομέτωπα και την ιδιότητα της ορθογωνικότητας των τρόπων. Πρόσφατα, αναπτύχθηκαν κωδικοποιημένες μεταεπιφάνειες για τη δημιουργία στροβιλωδών δεσμών με διαφορετικούς τρόπους, συμπεριλαμβανομένων και δεσμών ελεγχόμενων από το σπιν.
- **Μετατόπιση συχνότητας (Frequency Shifting):** Με την τροποποίηση των ιδιοτήτων μιας μεταεπιφάνειας στον χρονικό τομέα, είναι δυνατός ο έλεγχος των ανακλώμενων κυμάτων στο πεδίο της συχνότητας. Αυτό επιτρέπει τη μετατροπή και τη δημιουργία αριμονικών συχνοτήτων μέσω κατάλληλων σημάτων χρονικής διαμόρφωσης[22].
- **Μη αντιστρεπτότητα (Nonreciprocity):** Με την εισαγωγή της χρονικά μεταβαλλόμενης προσέγγισης, η προγραμματιζόμενη μεταεπιφάνεια χωροχρονικής κωδικοποίησης χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία για τη διάρρηξη της αμοιβαιότητας, βασιζόμενη στην επαγωγή κατάλληλων χωροχρονικών διαβαθμίσεων φάσης με προγραμματιζόμενο τρόπο μέσω ψηφιακής διαμόρφωσης κωδικοποίησης[16],[23]. Επιπλέον, προτάθηκε και μια προγραμματιζόμενη μεταεπιφάνεια βασισμένη σε τρανζίστορ ενίσχυσης για την πραγματοποίηση μη αμοιβαίων μεταδόσεων προς τα εμπρός και προς τα πίσω, χωρίς όμως να χρησιμοποιεί τη χρονικά μεταβαλλόμενη διαμόρφωση.[24]

1.2.3 Πλεονεκτήματα του RIS

Δεν είναι τυχαίο ότι η τεχνολογία των RIS έχει προσελκύσει ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Οι Αναδιαμορφώσιμες Έξυπνες Επιφάνειες (RIS) προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα στην ασύρματη επικοινωνία[25].

Ένα από τα βασικά τους πλεονεκτήματα είναι η εύκολη ανάπτυξή τους, καθώς αποτελούν σχεδόν παθητικές διατάξεις κατασκευασμένες από ηλεκτρομαγνητικά (EM) υλικά. Μπορούν να τοποθετηθούν σε διάφορες επιφάνειες[26], όπως προσόψεις κτιρίων, εσωτερικούς τοίχους, εναέρια πλατφόρμες, διαφημιστικές πινακίδες, κολόνες αυτοκινητοδρόμων, παράθυρα οχημάτων και ακόμα και σε ρούχα πεζών, λόγω του χαμηλού κόστους τους.

Επιπλέον, συμβάλλουν στη βελτίωση της φασματικής απόδοσης, καθώς μπορούν να αναδιαμορφώνουν το ασύρματο περιβάλλον διάδοσης, αντισταθμίζοντας την απώλεια ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις. Δημιουργούν εικονικές συνδέσεις οπτικής επαφής (LoS) μεταξύ σταθμών βάσης (BS) και κινητών χρηστών, ανακλώντας παθητικά τα προσπίπτοντα ραδιοσήματα. Η βελτίωση της απόδοσης είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν

εμπόδια, όπως ψηλά κτίρια, αποκλείουν την απευθείας επικοινωνία. Μέσω έξυπνης τοποθέτησης και σχεδιασμού, οι RIS επιτρέπουν τη δημιουργία ενός ασύρματου περιβάλλοντος που ενισχύει τον λόγο σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (SINR).

Ένα ακόμη πλεονέκτημα των RIS είναι η φιλικότητά τους προς το περιβάλλον. Σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα αναμετάδοσης, όπως τα Amplify-and-Forward (AF) και Decode-and-Forward (DF)[27], δεν χρησιμοποιούν ενισχυτές ισχύος αλλά αναδιαμορφώνουν το προσπίπτον σήμα ελέγχοντας τη μετατόπιση φάσης κάθε στοιχείου ανάκλασης[28],[29]. Έτσι, η χρήση των RIS είναι ενεργειακά αποδοτικότερη και πιο φιλική προς το περιβάλλον συγκριτικά με τα παραδοσιακά AF και DF συστήματα.

Τέλος, τα RIS είναι πλήρως συμβατά με τις υπάρχουσες τεχνολογίες επικοινωνίας. Υποστηρίζουν λειτουργία full-duplex (FD) και πλήρους ζώνης (full-band), καθώς απλώς ανακλούν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα χωρίς να επεμβαίνουν στη μετάδοση. Επιπλέον, μπορούν να ενσωματωθούν σε υπάρχοντα ασύρματα δίκτυα χωρίς την ανάγκη αντικατάστασης του υπάρχοντος εξοπλισμού ή των πρωτοκόλλων επικοινωνίας, διασφαλίζοντας τη βέλτιστη αξιοποίηση των υποδομών[30].

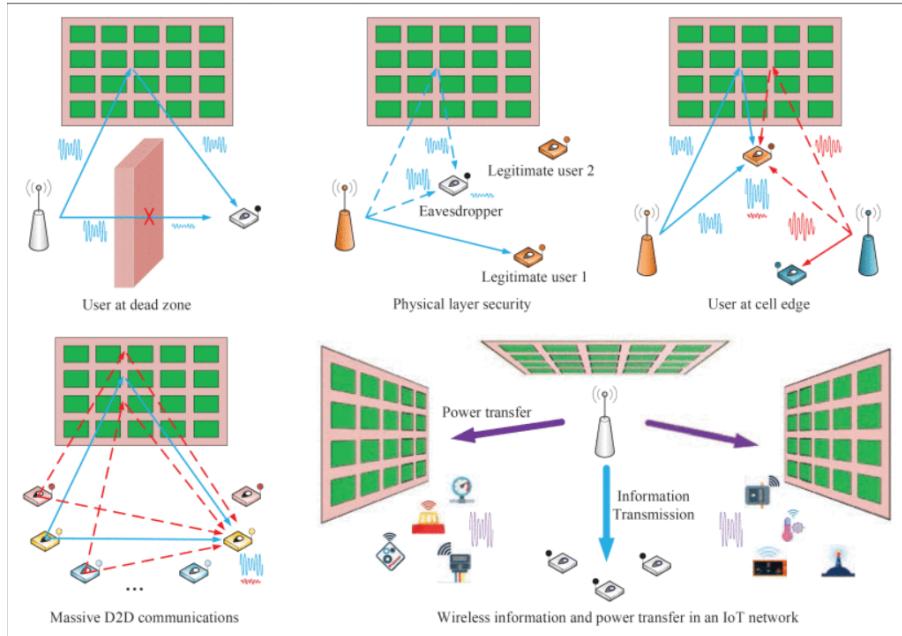
1.2.4 Εφαρμογές του RIS

Τα RIS έχουν διάφορες πρακτικές εφαρμογές που σχετίζονται κυρίως με την δρομολόγηση του σήματος σε χρήστες που βρίσκονται σε δύσκολα προσβάσιμες τοποθεσίες όπως και με την ασφάλεια των δεδομένων τους. Κάποια πίθανα σενάρια φαίνονται στο σχήμα 1.7 [31].

Το πρώτο σενάριο αφορά έναν χρήστη που βρίσκεται σε νεκρή ζώνη, όπου η άμεση σύνδεση με τον σταθμό βάσης εμποδίζεται σοβαρά από ένα εμπόδιο. Σε αυτή την περίπτωση, η τοποθέτηση ενός RIS που έχει καθαρή οπτική επαφή με τον σταθμό βάσης και τον χρήστη βοηθά να παρακαμφθεί το εμπόδιο μέσω έξυπνης ανάκλασης σήματος, δημιουργώντας έτσι έναν εικονικό σύνδεσμο οπτικής επαφής (LoS) μεταξύ τους. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την επέκταση της κάλυψης στις επικοινωνίες mmWave, οι οποίες είναι ιδιαίτερα ευάλωτες σε εμπόδια σε εσωτερικούς χώρους.

Μια δεύτερη εφαρμογή αφορά τη βελτίωση της φυσικής ασφάλειας του δικτύου. Όταν η απόσταση σύνδεσης από τον σταθμό βάσης προς τον υποκλοπέα είναι μικρότερη από αυτή προς τον νόμιμο χρήστη (π.χ., χρήστης 1) ή όταν ο υποκλοπέας βρίσκεται στην ίδια κατεύθυνση με τον νόμιμο χρήστη (π.χ., χρήστης 2), οι διαθέσιμοι ρυθμοί ασφαλούς επικοινωνίας είναι ιδιαίτερα περιορισμένοι. Ωστόσο, αν ένα RIS τοποθετηθεί κοντά στον υποκλοπέα, το ανακλώμενο σήμα μπορεί να ρυθμιστεί κατάλληλα ώστε να ακυρώσει το απευθείας σήμα από τον σταθμό βάσης στον υποκλοπέα, μειώνοντας έτσι δραστικά τη διαρροή πληροφοριών.

Στην τρίτη εφαρμογή, ένας χρήστης στην άκρη του κελιού υποφέρει τόσο από ισχυρή εξασθένηση του σήματος από τον σταθμό βάσης του όσο και από σοβαρές παρεμβολές από έναν γειτονικό σταθμό βάσης. Ένα



Σχήμα 1.7: Various RIS Applications

RIS μπορεί να τοποθετηθεί στη μεθόριο του κελιού, όχι μόνο για να ενισχύσει το επιθυμητό σήμα αλλά και για να καταστείλει την παρεμβολή μέσω σωστής σχεδίασης ανάκλασης, δημιουργώντας έτσι μια «ζώνη υψηλού σήματος» και μια «ζώνη ελεύθερη από παρεμβολές» κοντά του.

Η τέταρτη εφαρμογή αφορά την αξιοποίηση του RIS για ταυτόχρονη ασύρματη μεταφορά πληροφοριών και ενέργειας (SWIPT) σε διάφορες συσκευές ενός δικτύου IoT. Εδώ, η μεγάλη επιφάνεια του RIS χρησιμοποιείται για να αντισταθμίσει την ισχυρή απώλεια ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις μέσω παθητικής διαμόρφωσης δέσμης, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας προς κοντινές IoT συσκευές.

Τέλος, η πέμπτη εφαρμογή αφορά τη χρήση RIS για τη διευκόλυνση εκτεταμένων επικοινωνιών συσκευής προς συσκευή (D2D), όπου το RIS λειτουργεί ως κόμβος ανάκλασης σήματος, επιτρέποντας ταυτόχρονες μεταδόσεις χαμηλής ισχύος με μείωση παρεμβολών. Η παραπάνω εφαρμογή είναι η πιο σημαντική όσον αφορά την πλαισίωση της επακόλουθης έρευνας.

Κεφάλαιο 2

Ανάλυση του προβλήματος

2.1 Πρόβλημα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα RIS διαδραματίζουν καταλυτικό ρόλο στην υλοποίηση ενός Προγραμματιζόμενου Ασύρματου Περιβάλλοντος (PWE), λειτουργώντας ως προηγμένα μέσα ανακατεύθυνσης και προσαρμογής της διάδοσης των σημάτων. Σε αυτό το πλαίσιο, τα RIS δεν αποτελούν απλώς στατικούς ανακλαστήρες, αλλά δυναμικά ρυθμιζόμενα στοιχεία που επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση των καναλιών επικοινωνίας. Ο πρωταρχικός στόχος είναι η ελαχιστοποίηση των στοχαστικών επιδράσεων της ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης, όπως το fading, μέσω της ευφυούς διαχείρισης των ανακλάσεων, ενώ παράλληλα διατηρείται η απαιτούμενη ισχύς λήψης για αξιόπιστη επικοινωνία.

Επιπλέον, σε περιβάλλοντα όπου η διάδοση του σήματος χαρακτηρίζεται από έντονη παρουσία πολλαπλών διαδρομών (multi-pathing), η χρονική διασπορά (delay spread) μπορεί να επηρεάσει σοβαρά την ποιότητα της επικοινωνίας, προκαλώντας παρεμβολές μεταξύ συμβόλων (ISI - Inter-Symbol Interference) και μείωση της συνολικής χωρητικότητας του καναλιού. Η χρήση RIS επιτρέπει την ενεργή αναδιαμόρφωση της φάσης και του πλάτους των ανακλώμενων κυμάτων, ώστε να επιτευχθεί μια περισσότερο συνεκτική και ελεγχόμενη διαμόρφωση της διάδοσης του σήματος.

Όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, η παρουσία ενός μεγάλου αριθμού RIS στοιχείων επιφέρει αναπόφευκτα προκλήσεις, καθώς η αλληλεπίδραση μεταξύ τους μπορεί να δημιουργήσει φαινόμενα ανεπιθύμητης σύζευξης και παρεμβολών.

2.1.1 Μη Ιδανική Λειτουργία του RIS

Στην υποενότητα 1.2.2 έγινε αναλυτική απαρίθμηση των ηλεκτρομαγνητικών λειτουργιών ενός SDM, με σκοπό την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο αυτές συμβάλλουν στη διαμόρφωση των προγραμματιζόμενων ασύρματων καναλιών. Στο πλαίσιο αυτό, καθίσταται σαφές ότι οι πλέον κρίσιμες λειτουργίες που επιτρέπουν τη διαμόρφωση της επιθυμητής ασύρματης διάδοσης είναι ο εστιασμός της ισχύος του σήματος, η προσαρμογή του μετώπου κύματος και ο έλεγχος της απορρόφησης (Focusing, Wavefront Shaping, Absorption).

Ωστόσο, η ικανότητα ενός RIS να επιτελέσει αυτές τις λειτουργίες εξαρτάται από έναν σύνθετο συνδυασμό παραμέτρων, όπως τα φυσικά χαρακτηριστικά των μεταϋλικών που το συνθέτουν, η ευελιξία ρύθμισης των φασικών μετατοπίσεων, η γωνία πρόσπτωσης των εισερχόμενων κυμάτων και οι εγγενείς απώλειες του υλικού. Για παράδειγμα, μια RIS που σχεδιάζεται με περιορισμένη ικανότητα προσαρμογής της φάσης ενδέχεται να παρουσιάζει μειωμένη αποτελεσματικότητα για συγκεκριμένες γωνίες άφιξης, οδηγώντας σε ανεπιθύμητα φαινόμενα διάχυσης του σήματος και εμφάνιση πλευρικών λοβών υψηλής ισχύος σε ανεπιθύμητες κατευθύνσεις[32]. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία πολλαπλών ανεξέλεγκτων διαδρομών διάδοσης (multi-path propagation), οι οποίες μπορούν να επιδεινώσουν την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος μέσω φαινομένων συμβολής και παρεμβολών.

Είναι, λοιπόν, προφανές ότι η μη ιδανική συμπεριφορά των RIS δημιουργεί σημαντικές προκλήσεις στη διαχείριση ενός Προγραμματιζόμενου Ασύρματου Περιβάλλοντος (PWE). Ο προσδιορισμός της βέλτιστης χωρικής και φασικής διαμόρφωσης κάθε ανακλαστικού στοιχείου αποτελεί ένα πρόβλημα εξαιρετικά υψηλής υπολογιστικής πολυπλοκότητας, καθώς απαιτεί τη συνεκτίμηση τόσο των δυναμικών χαρακτηριστικών του καναλιού όσο και της αλληλεπίδρασης μεταξύ γειτονικών στοιχείων της RIS. Δεδομένου ότι μια αναλυτική λύση σε πραγματικό χρόνο είναι πρακτικά ανέφικτη, είναι αναγκαία η ανάπτυξη προγράμματων αλγορίθμων μη γραμμικής βελτιστοποίησης και τεχνητής νοημοσύνης, οι οποίοι θα επιτρέψουν τη δυναμική προσαρμογή της RIS μέσω κεντρικής ή κατανεμημένης υπολογιστικής ισχύος. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την αξιοποίηση των RIS ως έξυπνων, αυτορυθμιζόμενων επιφανειών που μεταβάλλουν τη διάδοση των ασύρματων σημάτων κατά βέλτιστο τρόπο, ενισχύοντας τη συνολική αποδοτικότητα των ασύρματων επικοινωνιών και προσφέροντας νέες δυνατότητες στην ανάπτυξη των μελλοντικών δικτύων 6G.

2.2 Μοντελοποίηση του προβλήματος

Θεωρούμε ένα γενικό σενάριο ενός δυναμικού και πολύπλοκου χώρου με αυθαίρετη γεωμετρία και διαστάσεις, όπου η αλληλεπίδραση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με το περιβάλλον καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη συνολική απόδοση του δικτύου επικοινωνίας. Εντός αυτού του χώρου συνυπάρχουν πολλαπλοί πομποί (access points), χρήστες και SDMs, τα οποία είναι στρατηγικά τοποθετημένα στις επιφάνειες του χώρου, σχηματίζοντας ένα εξελιγμένο και άκρως προσαρμόσιμο περιβάλλον επικοινωνίας.

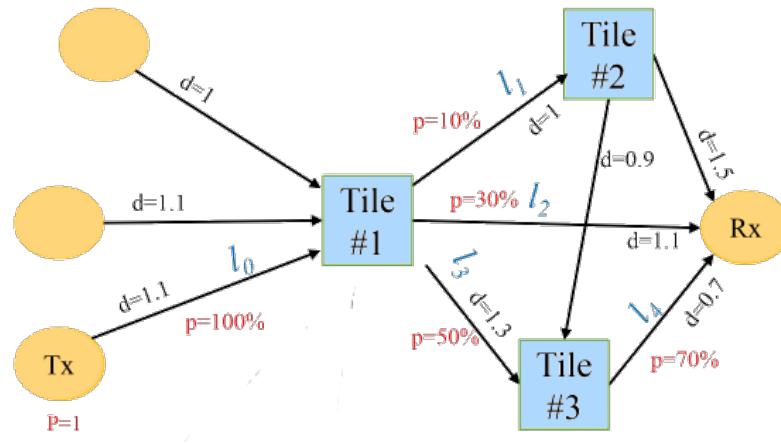
Κάθε SDM διαθέτει ένα σύνολο εξειδικευμένων λειτουργιών, σχεδιασμένων να διαμορφώνουν τα χαρακτηριστικά της ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης, επηρεάζοντας παραμέτρους όπως η γωνία άφιξης, η ένταση του σήματος και η κατανομή της ισχύος στο χωρικό πεδίο. Αυτές οι λειτουργίες αντιστοιχούν, στο φυσικό επίπεδο, σε ένα σύνολο διαγραμμάτων ακτινοβολίας που επιτρέπουν την προσαρμογή της συμπεριφοράς του SDM αναλόγως των συνθηκών. Δεδομένης μιας αρχικής, τυχαίας κατανομής ισχύος στο σύστημα, ο βασικός στόχος είναι ο ακριβής και αποδοτικός καθορισμός των λειτουργιών κάθε SDM, έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η δρομολόγηση του σήματος προς τις συσκευές των χρηστών, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις απώλειες και τις ανεπιθύμητες ανακλάσεις.

Για την αντιμετώπιση της πολυπλοκότητας του προβλήματος, το σύστημα μοντελοποιείται μέσω μιας αφαιρετικής προσέγγισης, με την αναπαράστασή του ως ένας δυναμικός, κατευθυνόμενος γράφος. Σε αυτή τη γραφική αναπαράσταση, οι κόμβοι αντιστοιχούν στα βασικά στοιχεία του συστήματος, δηλαδή τα SDMs, τους χρήστες και τα access points. Οι ακμές του γράφου σχηματίζονται μόνο στην περίπτωση που υφίσταται οπτική επαφή μεταξύ δύο κόμβων, εξασφαλίζοντας ότι η διάδοση του σήματος ακολουθεί μια σαφώς καθορισμένη διαδρομή. Κάθε ακμή περιέχει κρίσιμες πληροφορίες όπως το ποσοστό ισχύος που μεταφέρεται κατά μήκος της σύνδεσης, καθώς και την απόσταση μεταξύ των κόμβων, επιτρέποντας μια λεπτομερή ανάλυση της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος. Τα ποσοστά ισχύος που μεταφέρονται θεωρούνται ότι έχουν εξαχθεί από τα διαγράμματα ακτινοβολίας των πλακιδίων, σε συνδυασμό με τη γεωμετρία του εκάστοτε χώρου, χωρίς να περιλαμβάνουν τις απώλειες ελεύθερου χώρου.

Μια σημαντική παρατήρηση που αναδεικνύει τον δυναμικό χαρακτήρα του συστήματος είναι το γεγονός ότι όταν εφαρμόζονται διαδοχικά πολλαπλές ηλεκτρομαγνητικές λειτουργίες – όπως επαναλαμβανόμενες κατευθύνσεις κυμάτων, ενίσχυση σήματος και εστίαση δέσμης – δημιουργούνται συνεκτικές και ελεγχόμενες διαδρομές στον αέρα. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει στα κύματα να διαδίδονται με βελτιστοποιημένο τρόπο, επιτυγχάνοντας μέγιστη απόδοση ισχύος και ελαχιστοποιώντας τις πιθανότητες ανεπιθύμητης διάχυσης [33].

Στο γράφο, οι προαναφερθείσες διαδρομές αναπαρίστανται ως σύνολα σειριακά διασυνδεδεμένων ακμών, οι οποίες ορίζονται συγκεκριμένες ακτίνες (rays). Η συνάθροιση αυτών των ακτίνων, όπως κατευθύνονται προς

τους κόμβους των χρηστών, αποτελεί μια θεμελιώδη πληροφορία για την ακριβή εκτίμηση των χαρακτηριστικών του σήματος που λαμβάνει κάθε χρήστης.



Σχήμα 2.1: Graph Model

Η γραφική απεικόνιση του μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1. Υποθέτοντας ιδανική στόχευση του πομπού προς το πλακίδιο 1, η ενεργή ηλεκτρομαγνητική λειτουργία του διανέμει την ισχύ με κλάσματα 0.1 και 0.5 στα πλακίδια 2 και 3, ενώ 0.3 της συνολικής ισχύος μεταφέρεται απευθείας στον χρήστη. Στη συνέχεια, τα πλακίδια 2 και 3 ανακατευθύνουν, με τη σειρά τους, την ισχύ βάσει της ηλεκτρομαγνητικής λειτουργίας που είναι ενεργοποιημένη εκείνη τη στιγμή.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ακτίνες που καταλήγουν στον δέκτη παρουσιάζουν διαφορετικά μήκη διαδρομής, κάτι που μπορεί να επηρεάσει τόσο την καθυστέρηση διάδοσης όσο και τη φασική ευθυγράμμιση του λαμβανόμενου σήματος. Ένα ακόμα κρίσιμο σημείο αφορά την εξάρτηση της κατανομής της ισχύος από τη γωνία άφιξης του σήματος, η οποία στο πλαίσιο του γράφου αναπαρίσταται από εισερχόμενες ακμές προς κάθε κόμβο.

Υιοθετώντας μια αναλογική προσέγγιση, μπορούμε να θεωρήσουμε τα SDMs ως “δρομολογητές ισχύος” που ακολουθούν μια συγκεκριμένη στρατηγική κατανομής της εισερχόμενης ενέργειας. Για τον σκοπό αυτό, ορίζεται για κάθε SDM ένας πίνακας δρομολόγησης (Routing Table), ο οποίος αποτυπώνεται στο Σχήμα 2.2. Ο συγκεκριμένος πίνακας ενθυλακώνει τη λογική δρομολόγησης που εφαρμόζει κάθε SDM, αντιστοιχίζοντας τις εισερχόμενες ακμές (incoming rays) με τις ενεργές ηλεκτρομαγνητικές λειτουργίες και τις πιθανές εξερχόμενες διαδρομές. Αυτό το μοντέλο επιτρέπει τη δυναμική προσαρμογή της ροής ισχύος, ανάλογα με τις τρέχουσες συνθήκες του περιβάλλοντος και την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας για κάθε χρήστη [33].

FOR Input Link	And EM function	THEN output distribution is :
L0	#1	{L1→10%,L2→30%,L3→50%}
L0	#2	{L1→20%,L2→1%,L3→5%}
...
L15

Σχήμα 2.2: Routing Table of a Node

2.3 Αλγόριθμοι Προσομοίωσης

Η παραπάνω μοντελοποίηση, προσομοιώνεται προγραμματιστικά μέσω δύο ειδικών αλγορίθμων. Ο πρώτος σχετίζεται με την αρχικοποίηση του γράφου και των αντίστοιχων πινάκων δρομολόγησης για δεδομένο σύστημα. Ο δεύτερος υλοποιεί με την προσομοίωση της ασύρματης διάδοσης στούς γράφους. Στις παρακάτω ενότητες ακολουθεί η παρουσίαση των αλγορίθμων σε ψευδολόγιστα και η σχετική τους επεξηγήση.

2.3.1 Αλγόριθμος Αρχικοποίησης Γράφων

Ο αλγόριθμος αρχικοποίησης του γράφου είναι υπεύθυνος για τη δημιουργία των κόμβων, των ακμών και των συναρτήσεων EM, και στη συνέχεια τη χρήση τους για την αρχικοποίηση των πινάκων δρομολόγησης που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Algorithm 1 InitializeGraph()

```
RandomlyInitializeNodes()
InitializeEdges()
InitializeRoutingTables()
```

Η συνάρτηση 'RandomlyInitializeNodes()', που περιγράφεται στον Αλγόριθμο 2, είναι υπεύθυνη για τη αρχικοποίηση ενός σετ κόμβων σε τυχαίες θέσεις μέσα σε έναν κλειστό χώρο. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος δέχεται ως ορίσματα τα εξής:

- (a) τις καρτεσιανές διαστάσεις του δωματίου,
- (b) τον αριθμό των SDMs, μαζί με τον αριθμό των διαθέσιμων ηλεκτρομαγνητικών (H/M) λειτουργιών τους,
- (c) τον αριθμό των χρηστών,
- (d) τη συχνότητα λειτουργίας και τον εκθετικό συντελεστή απωλειών α (alpha),

(e) το κέρδος των SDM που χρησιμοποιούνται

(e) και έναν πομπό, του οποίου ο τύπος παραμετροποιείται ως προς το κέρδος, τον αριθμό των λοβών και την ισχύ εκπομπής.

Η συνάρτηση αυτή κατανέμει με ίση πυκνότητα τα SDMs στις επιφάνειες του χώρου, αρχικοποιεί ένα πομπό και τον αριθμό των χρηστών που δίνονται. Οι καρτεσιανές συντεταγμένες όλων των κόμβων τυχαιποιούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην συμπίπτουν μεταξύ τους.

Algorithm 2 RandomlyInitializeNodes()

```

nodeId ← 0
tiles ← new List()

for each surface in g.roomSurfaces do
    while tileCounter < surface.numberOfTiles do
        newTile ← RandomlyAttachTile(surface, nodeId)
        if not NodeIsFarEnough(newTile) then
            continue
        end if
        g.allNodes.add(newTile)
        tiles.add(newTile)
        tileCounter ← tileCounter + 1
        nodeId ← nodeId + 1
    end while
end for

g.transmitter.setPosition(Random(g.roomX), Random(g.roomY), Random(g.roomZ))
while not NodeIsFarEnough(g.transmitter) do
    g.transmitter.setPosition(Random(g.roomX), Random(g.roomY), Random(g.roomZ))
end while
g.transmitter.idx ← nodeId
g.allNodes.add(g.transmitter)
nodeId ← nodeId + 1

receiverCounter ← 0
while receiverCounter < g.numReceivers do
    receiver ← GenerateReceiver(nodeId)
    if not NodeIsFarEnough(receiver) or EuclidianDist(receiver, g.transmitter) < g.roomX / 4 then
        continue
    end if
    g.allNodes.add(receiver)
    receiverCounter ← receiverCounter + 1
    nodeId ← nodeId + 1
end while

```

Η πρακτική αξία αυτής της ρουτίνας είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επιτρέπει τη δημιουργία πολλαπλών τυχαίων γράφων, διευκολύνοντας έτσι την αξιόπιστη αξιολόγηση των προτεινόμενων λύσεων.

Algorithm 3 InitializeEdges()

```

edgeId ← 0
for all possibleNodePairs do
    if ConditionsAreMet() then
        newEdge ← new Edge(startNode.id, destNode.id)
        newEdge.length ← EuclidianDist(pair)
        newEdge.id ← edgeId
        graphEdges.Add(newEdge)
        startNode.outputEdges.Add(newEdge.id)
        endNode.inputEdges.Add(newEdge.id)
        edgeId ← edgeId + 1
    end if
end for

```

Εφόσον δημιουργηθούν οι κόμβοι του συστήματος, καλείται η συνάρτηση 'InitializeEdges()' η οποία είναι υπεύθυνη για τη αρχικοποίηση των ακμών (Αλγόριθμος 3). Κατά τη δημιουργία των ακμών, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις δυνατές διαδρομές διάδοσης, εξετάζονται όλα τα πιθανά ζεύγη κόμβων. Μια ακμή θεωρείται έγκυρη μόνο αν ισχύουν οι εξής τέσσερις προϋποθέσεις: (a) δεν επιτρέπονται συνδέσεις μεταξύ κόμβων που βρίσκονται στην ίδια επιφάνεια, (b) οι ακμές δεν μπορούν να κατευθύνονται προς έναν πομπό, (c) οι ακμές δεν μπορούν να προέρχονται από τον δέκτη, και (d) πρέπει να ικανοποιείται το κριτήριο της οπτικής επαφής (line-of-sight) μεταξύ των δύο κόμβων. Ο έλεγχος των προυποθέσεων αυτών γίνεται μέσω της συνάρτηση 'ConditionsAreMet()' boolean εξόδου. Κάθε ακμή αντιστοιχίζεται με έναν μοναδικό αριθμό 'edgeId' ο οποίος χρησιμοποιείται για την κωδικοποίηση της έτσι ώστε να ενθυλακωθεί στους πίνακες δρομολόγησης των πλακιδίων.

Οι νέες ακμές που δημιουργούνται προστίθενται στις λίστες εισερχόμενων και εξερχόμενων συνδέσεων των αντίστοιχων κόμβων. Αυτές οι λίστες χρησιμοποιούνται για την αρχικοποίηση των πινάκων δρομολόγησης, όπως περιγράφεται στη μέθοδο 'InitializeRoutingTables()' (Αλγόριθμος 4).

Algorithm 4 InitializeRoutingTables()

```

graphTiles ← GetTiles(graphNodes)
for each tile in graphTiles do
    routingTable ← new HashMap()
    for each edgeId in tile.inputEdges do
        for EMfuncId ← 0 to numEMFuncs do
            powerDist ← ProduceDist(tile.outputEdges)
            key ← edgeId + EMfuncId
            routingTable.Put(key, powerDist)
        end for
    end for
    routingTables.Add(routingTable)
end for

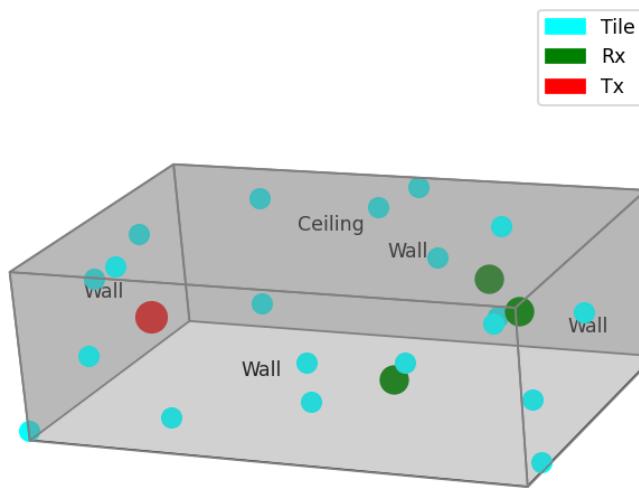
```

Η συνάρτηση 'InitializeRoutingTables()' αρχικοποιεί τους πίνακες δρομολόγησης για κάθε πλακίδιο του γράφου, διασφαλίζοντας ότι η κατανομή ισχύος αντιστοιχίζεται σωστά στις εισερχόμενες ακμές. Αρχικά, ανακτώνται όλα τα πλακίδια του γράφου μέσω 'GetTiles(graphNodes)', τα οποία αποθηκεύονται στη μεταβλητή 'graphTiles'. Στη συνέχεια, για κάθε πλακίδιο δημιουργείται ένας νέος πίνακας δρομολόγησης 'routingTable' ως 'HashMap()', όπου θα αποθηκευτούν οι κατανομές ισχύος για τις εισερχόμενες ακμές.

Για κάθε εισερχόμενη ακμή του πλακιδίου, η διαδικασία εκτελείται επαναληπτικά για κάθε ηλεκτρομαγνητική (EM) συνάρτηση που απαιτείται, από ο έως 'numEMFuncs'. Σε κάθε επανάληψη, η συνάρτηση 'ProduceDist(tile.outputEdges)' δημιουργεί την κατανομή ισχύος για τις εξερχόμενες ακμές, επιστρέφοντας έναν πίνακα διαστάσεων $2 \times N$, ο οποίος αποτελείται από ζεύγη τιμών που περιλαμβάνουν ένα κλάσμα ισχύος και τον αντίστοιχο δείκτη εξόδου. Κατόπιν, κατασκευάζεται ένα μοναδικό κλειδί 'key', το οποίο αποτελείται από τον δείκτη της εισερχόμενης ακμής και το ID της EM συνάρτησης, και στη συνέχεια η κατανομή ισχύος αποθηκεύεται στο 'routingTable' με το συγκεκριμένο κλειδί.

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία για όλες τις εισερχόμενες ακμές ενός πλακιδίου, ο 'routingTable' προστίθεται στη συνολική δομή 'routingTables', η οποία διατηρεί όλους τους πίνακες δρομολόγησης του συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε πλακίδιο διαθέτει έναν πλήρη πίνακα δρομολόγησης που καταγράφει τις πιθανές διαδρομές διάδοσης της ισχύος, λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλές ηλεκτρομαγνητικές συναρτήσεις, καθώς και τις απώλειες που προκύπτουν από ανακλάσεις και απορροφήσεις στον χώρο του συστήματος.

Αξίζει να σημειωθεί, πως με αυτόν τον τρόπο οι Η/Μ λειτουργικότητες των SDM έχουν κωδικοποιηθεί ως μοναδικοί ακέραιοι αριθμοί, με χρήση των οποίων η κατανομή εξόδου μπορεί να ανακτηθεί από τον πίνακα δρομολόγησης για δεδομένη εισερχόμενη ακμή.



Σχήμα 2.3: Visualization of Graph Initialization Algorithm Output

Algorithm 5 Class Definitions

```

class Graph
{
  List<Edge> allEdges
  List<Node> allNodes
  List<Ray> inputRays
  List<Surface> roomSurfaces
  HashMap<Integer, HashMap<String, double[][]>> routingTables
  int numberOfModes
  int numberOfTiles
  double wavelength
  double Gris
  double alpha
  Tx transmitter
  int numReceivers
  double roomX, roomY, roomZ
}
class Edge
{
  int id
  int start_node_id
  int dest_node_id
  double length
  double pathLoss
  boolean blocked
}
class Node
{
  int id
  int activeMode
  string type
  boolean isActive
  double x, y, z
}
  
```

Για να ξεκινήσει η λειτουργία του συστήματος, δημιουργείται ένα αρχικό σύνολο ακτίνων που προέρχονται από τον πομπό. Αυτές οι ακτίνες επιλέγονται από τυχαία επιλεγμένες ακμές, καθεμία από τις οποίες λαμβάνει ένα κανονικοποιημένο ποσοστό ισχύος ίσο με 1. (Σημειώνεται ότι, στο πλαίσιο της επερχόμενης αξιολόγησης, αυτή η διαδικασία χρησιμοποιεί προσομοιώσεις. Σε μια πραγματική εφαρμογή, το σύστημα θα ακολουθήσει μια αντίστοιχη φάση βαθμονόμησης μέσω μετρήσεων ισχύος) [33].

Τελικά, η έξοδος του αλγορίθμου αρχικοποίησης είναι ένα αντικείμενο Graph του οποίου οι μεταβλητές φαίνονται στους Αλγορίθμους 5 και 6. Στο σχήμα φαίνεται μια οπτικοποίηση του γράφου αυτού για ένα δωμάτιο διαστάσεων 15x10x5, τρείς δέκτες και έναν τυχαίο αριθμό προσαρτημένων SDMs.

Algorithm 6 Tx and Ray Class Definitions

```

class Tx extends Node
{
  double gain
  double power
  int numberofLobes
}
class Ray
{
  double power
  double length
  int current_node_id
  ArrayList<Integer> edges
}
  
```

2.3.2 Αλγόριθμος Προσομοίωσης Ασύρματης Διάδοσης

Ο Αλγόριθμος 7 προσομοιώνει την διάδοση των ακτινών στο δίκτυο των κόμβων του γράφου που αρχικοποιήθηκε στην προηγούμενη υποενότητα. Μοντελοποιεί τον τρόπο με τον οποίο τα σήματα ταξιδεύουν μέσω διαφορετικών διαδρομών, ανακλώνται σε κόμβους, λαμβάνουν υπόψη την απώλεια διαδρομής και καθορίζουν τη συνολική διασπορά καθυστέρησης στον δέκτη.

Algorithm 7 Propagate() Method

```

activeRays ← CopyList(inputRays)
while activeRays.isNotEmpty() do
  for each ray in activeRays do
    ReflectRay(ray)
  end for
  activeRays.RemoveAll()
  activeRays.AddAll(newRays)
  newRays.RemoveAll()
end while
Solution sol ← new Solution(EMfuncsChosen)
for each receiver do
  Solution.raySets.add(receiver.raySet)
end for
return Solution
  
```

Ο αλγόριθμος 'Propagate()' προσομοιώνει τη διαδικασία διάδοσης ακτίνων μέσω επαναλαμβανόμενης ανάκλασης. Αρχικά, δημιουργείται ένα αντίγραφο της λίστας των εισερχόμενων ακτίνων, το οποίο αποθηκεύεται ως 'activeRays'.

Στη συνέχεια, όσο η λίστα activeRays περιέχει στοιχεία, κάθε ακτίνα υφίσταται ανάκλαση μέσω της μεθόδου 'ReflectRay()'. Μετά την επεξεργασία όλων των ακτίνων, η λίστα 'activeRays' εκκαθαρίζεται και αντικαθίσταται με τις νέες ακτίνες που δημιουργήθηκαν κατά τη διαδικασία ανάκλασης.

Algorithm 8 ReflectRay(ray) Method

- 1: $routingTable \leftarrow GetRoutingTable(ray.nodeId)$
- 2: $node \leftarrow graphNodes[node.id]$
- 3: $ChooseEMFunction(node)$
- 4: $key \leftarrow node.activeEMFunctionId + ray.edgeId$
- 5: $powerDistribution \leftarrow routingTable[key]$
- 6: $CreateRays(ray, powerDistribution)$

Στον αλγόριθμο 8 φαίνεται η υλοποίηση της συνάρτησης 'ReflectRay()' που καλείται επαναληπτικά από την συνάρτηση 'Propagate()'. Η συνάρτηση αυτή προσομοιώνει τη διαδικασία ανάκλασης μιας ακτίνας η οποία έχει καταλήξει σε έναν κόμβο του γράφου, λαμβάνοντας υπόψη την ενεργή Η/Μ λειτουργία αντίστοιχου SDM. Αρχικά, ανακτάται ο κατάλληλος πίνακας δρομολόγησης (routingTable) μέσω της συνάρτησης 'GetRoutingTable(ray.nodeId)', ο οποίος περιέχει πληροφορίες για τη κατανομή της ισχύος των εξερχόμενων ακτίνων.

Αφού καθοριστεί η ενεργή ηλεκτρομαγνητική συνάρτηση, δημιουργείται ένα μοναδικό κλειδί ('key') ως συνδυασμός του αναγνωριστικού της ενεργής συνάρτησης

('node.activeEMFunctionId') και του αναγνωριστικού της εισερχόμενης ακμής ('ray.edgeId'). Αυτό το κλειδί χρησιμοποιείται για την ανάκτηση της κατανομής ισχύος (powerDistribution) από τον πίνακα δρομολόγησης, η οποία καθορίζει πώς η ισχύς της εισερχόμενης ακτίνας κατανέμεται στις εξερχόμενες ακτίνες.

Η συνάρτηση 'ChooseEMFunction()' ενεργοποιεί με τυχαίο τρόπο, καποιά Η/Μ συνάρτηση για το SDM, μόνο εφόσον δεν έχει ήδη ενεργοποιηθεί κάποια άλλη λειτουργία για αυτό. Πρακτικά, η συνάρτηση αυτή εξασφαλίζει την ενεργοποίηση ενός σετ Η/Μ λειτουργίων, με βάση κάποια προεπιλεγμένη κατανομή πιθανότητας. (Όπως θα αναλυθεί αργότερα η επίλυση του προβλήματος αξιοποιεί τεχνικές αλγορίθμων σμήνους, καθιστώντας αυτόν τον τρόπο επιλογής πιο πρακτικό).

Τέλος, η μέθοδος 'CreateRays(ray, powerDistribution)' (Αλγόριθμος 9) χρησιμοποιείται για τη δημιουργία νέων ακτίνων, οι οποίες προκύπτουν από την ανάκλαση της αρχικής ακτίνας, ακολουθώντας την καθορισμένη κατανομή ισχύος.

Αρχικά, για κάθε διαθέσιμη εξερχόμενη ακμή της τρέχουσας ακτίνας, ανακτάται το αναγνωριστικό της ακμής και το ποσοστό ισχύος που μεταφέρεται στη νέα ακτίνα. Στη συνέχεια, εντοπίζεται η αντίστοιχη ακμή στον γράφο και με βάση αυτή υπολογίζονται οι απώλειες ελεύθερου χώρου, λαμβάνοντας υπόψη το μήκος της νέας ακμής. Βάσει αυτών, υπολογίζονται το συνολικό μήκος της νέας διαδρομής καθώς και η συνολική ισχύς της νέας ακτίνας, ενσωματώνοντας τις απώλειες λόγω διαδρομής και τις απώλειες λόγω υλικών.

Ακολούθως, πραγματοποιούνται δύο έλεγχοι για την εγκυρότητα της νέας ακτίνας. Αρχικά, αν η συνολική ισχύς της είναι μικρότερη από ένα προκαθορισμένο κατώφλι, η ακτίνα θεωρείται πλήρως εξασθενημένη και

Algorithm 9 CreateRays(ray,distribution) Method

```

for  $i \leftarrow 0$  to  $\text{powerDistribution.length}$  do
     $\text{edgeId} \leftarrow \text{distribution}[0]_i$ 
     $\text{powerFraction} \leftarrow \text{distribution}[1]_i$ 
     $\text{newEdge} \leftarrow \text{allEdges}[\text{edgeId}]$ 
     $\text{pathLoss} \leftarrow \text{CalcPathLoss}(\text{ray.length}, \dots$ 
     $\dots \text{newEdge.length})$ 
     $\text{totalLength} \leftarrow \text{ray.length} + \text{newEdge.length}$ 
     $\text{totalPower} \leftarrow \text{ray.power} \times \text{powerFraction} \times$ 
     $\text{pathLoss} \times \text{materialLoss}$ 
    if  $\text{totalPower} \leq \text{threshold}$  then
        continue
    end if
    if  $\text{newEdge.destinationNode.isReceiver}()$  then
        continue
    end if
     $\text{newRay} \leftarrow \text{new Ray}(\text{totalPower}, \text{totalLength}, \dots$ 
     $\dots \text{newEdge})$ 
     $\text{newRays.Add}(\text{newRay})$ 
end for
  
```

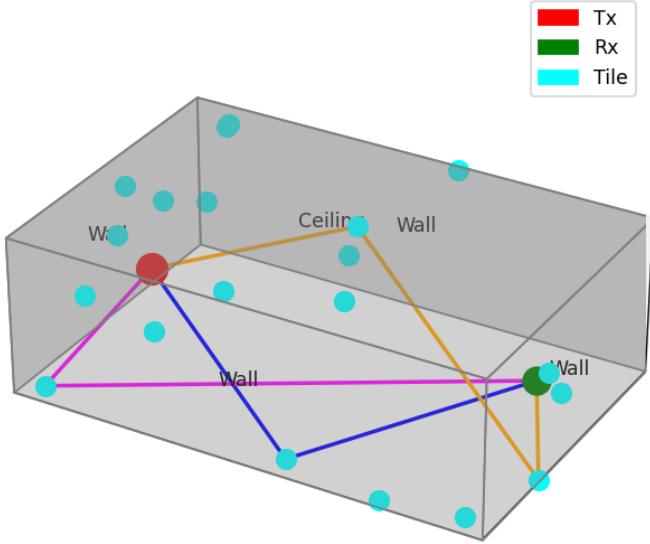
απορρίπτεται. Εάν, επιπλέον, η νέα ακτίνα καταλήγει σε έναν κόμβο που αποτελεί δέκτη, η περαιτέρω διάδοσή της σταματά. Αν δεν ισχύει καμία από τις δύο αυτές συνθήκες, δημιουργείται ένα νέο αντικείμενο ακτίνας με τις ενημερωμένες παραμέτρους και προστίθεται στη λίστα των νέων ακτίνων, ώστε να συνεχιστεί η διαδικασία προσομοίωσης της διάδοσης.

Εφόσον όλες οι ακτίνες του συστήματος έχουν εξασθενηθεί ή δρομολογηθεί στον δέκτη, ο αλγόριθμος προσομοίωσης θα επιστρέψει ένα αντικείμενο τύπου 'Solution'. Η οντότητα αυτή θα περιέχει το σετ των H/M συναρτήσεων που έχουν επιλεχθεί για όλα πλακίδια του συστήματος, όπως και τις λίστες που περιέχουν τις ακτίνες ('raySet') που έχουν δρομολογηθεί σε κάθε δέκτη. Εναλλακτικά, η συνάρτηση μπορεί να κληθεί παρέχοντας της ως είσοδο το σετ των ενεργοποιημένων H/M συναρτήσεων, επιστρέφοντας μόνο τις λίστες των ακτινών.

Algorithm 10 Solution Class Definition

```

class Solution
{
    List<int> EMfuncsChosen
    List< List<Ray> > raySets
}
  
```



Σχήμα 2.4: Output of the Propagation Algorithm. Visualization of paths to receiver

2.4 Απώλειες διαδρομής

Η μοντελοποίηση της διάδοσης των ασύρματων ακτίνων απαιτεί ακριβείς υπολογισμούς απώλειας διαδρομής, και για τον σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί δύο βασικά μοντέλα [34].

Το πρώτο μοντέλο, γνωστό ως γινόμενο των αποστάσεων, χωρίζει τη διαδρομή του σήματος σε τμήματα και υπολογίζει την απώλεια διαδρομής για κάθε τμήμα ξεχωριστά, πριν πολλαπλασιάσει αυτές τις απώλειες μεταξύ τους. Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε σενάρια μακρινής περιοχής (far-field), όπου ο πομπός, οι SDMs και ο δέκτης απέχουν σημαντικά μεταξύ τους και οι ανακλάσεις του σήματος συμβαίνουν σε μεγαλύτερες περιοχές. Το μοντέλο του γινομένου των αποστάσεων εκφράζεται μαθηματικά ως

$$r = \frac{P_t G_t G_r \prod_{i=1}^{N_{RIS}} G_{RIS,i}}{\prod_{i=1}^{N_{RIS}+1} (4\pi f/c)^2 d_i^\alpha}, \quad (2.1)$$

όπου P_t είναι η ισχύς του μεταδιδόμενου σήματος, G_t και G_r είναι τα κέρδη της κεραίας του πομπού και του δέκτη αντίστοιχα, και d_i αντιπροσωπεύει την απόσταση για κάθε τμήμα της διαδρομής του σήματος.

Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου ο SDM βρίσκεται πιο κοντά στους κόμβους επικοινωνίας ή όταν η επιφάνεια του SDM είναι μεγάλη, ένα διαφορετικό μοντέλο προσφέρει μια πιο πρακτική λύση. Το άθροισμα των αποστάσεων αντιμετωπίζει ολόκληρη τη διαδρομή του σήματος ως ένα ενιαίο τμήμα, απλοποιώντας τον υπολογισμό της απώλειας διαδρομής με το άθροισμα των αποστάσεων μεταξύ κάθε σημείου στη διαδρομή του σήματος. Αυτό το μοντέλο είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό σε συνθήκες κοντινού πεδίου (near-field), όπου το σήμα υφίσταται ελάχιστη διασπορά, και εκφράζεται μαθηματικά ως

$$r = \frac{P_t G_t G_r \prod_{i=1}^{N_{RIS}} G_{RIS,i}}{(4\pi f/c)^2 \left(\sum_{i=1}^{N_{RIS}+1} d_i \right)^\alpha}. \quad (2.2)$$

Ανάλογα με το εκάστοτε περιβάλλον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε το ένα είτε το άλλο μοντέλο, προσφέροντας ένα μοντέλο εξασθένησης των ακτίνων. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως όταν η ισχύς της ακτίνας πέσει κάτω από κάποιο προκαθορισμένο όριο, θεωρείται πλήρως εξασθενημένη και δεν παρακολουθείται πλέον.

2.5 Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης Δυναμικών Γράφων

Η βελτιστοποίηση δυναμικών γράφων είναι ένα κρίσιμο πεδίο έρευνας που στοχεύει στη βελτίωση της αποδοτικότητας, της ευρωστίας και της επεκτασιμότητας των δικτυακών υποδομών. Για την επίτευξη αυτών των στόχων, έχουν χρησιμοποιηθεί διάφοροι τύποι αλγορίθμων, οι οποίοι μπορούν να ταξινομηθούν σε ντετερμινιστικούς, στοχαστικούς, ευρετικούς και μεταευρετικούς.

I. Ντετερμινιστικοί Αλγόριθμοι Οι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι ακολουθούν μια προκαθορισμένη ακολουθία βημάτων και οδηγούν πάντα στο ίδιο αποτέλεσμα για τα ίδια δεδομένα εισόδου. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε προβλήματα βελτιστοποίησης που απαιτούν ακρίβεια και προβλεψιμότητα.

- **Γραμμικός και Μη Γραμμικός Προγραμματισμός:** Αυτές οι τεχνικές χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση πόρων, όπως η διαχείριση εύρους ζώνης και η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας.
- **Αλγόριθμοι Ροής Δικτύου (Network Flow Algorithms):** Όπως ο αλγόριθμος Ford-Fulkerson για τη μεγιστοποίηση ροής σε ένα δίκτυο, χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση κυκλοφορίας και τη βέλτιση κατανομή πόρων.
- **Αλγόριθμοι Δυναμικού Προγραμματισμού:** Χρησιμοποιούνται σε προβλήματα όπως η εύρεση της βέλτιστης δρομολόγησης και η διαχείριση της κίνησης σε δίκτυα με πολλαπλά μονοπάτια.

Παρόλο που οι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι προσφέρουν βέλτιστες λύσεις, η πολυπλοκότητά τους αυξάνεται εκθετικά καθώς μεγαλώνει το μέγεθος του δικτύου, καθιστώντας τους μη πρακτικούς για μεγάλα ή δυναμικά συστήματα.

- 2. Στοχαστικοί, Ευρετικοί και Μεταευρετικοί Αλγόριθμοι** Οι στοχαστικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν τυχαίες διεργασίες για την αναζήτηση βέλτιστων λύσεων και είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι σε πολύπλοκα και μεγάλα προβλήματα. Στους στοχαστικούς αλγορίθμους περιλαμβάνονται οι ευρετικοί, οι μεταευρετικοί

και οι αλγόριθμοι συμήνους, οι οποίοι παρέχουν προσεγγιστικές λύσεις σε πολυδιάστατα προβλήματα βελτιστοποίησης.

- **Ευρετικοί Αλγόριθμοι** Οι ευρετικοί αλγόριθμοι είναι στρατηγικές που προσπαθούν να βρουν καλές, αλλά όχι απαραίτητα βέλτιστες, λύσεις μέσα σε αποδεκτό χρονικό διάστημα. Παραδείγματα περιλαμβάνουν τον αλγόριθμο Dijkstra και τον A*, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την εύρεση συντομότερων διαδρομών σε δίκτυα δρομολόγησης, καθώς και τους άπληστους αλγόριθμους (Greedy Algorithms), οι οποίοι εφαρμόζονται σε προβλήματα κατανομής εύρους ζώνης και ελαχιστοποίησης καθυστερήσεων σε δίκτυα.
- **Μεταευρετικοί Αλγόριθμοι (Metaheuristic Algorithms):** Οι μεταευρετικοί αλγόριθμοι είναι πιο προηγμένες στρατηγικές που συνδυάζουν ευρετικές μεθόδους με στοχαστικές διαδικασίες για να βρουν καλύτερες λύσεις. Οι γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic Algorithms - GA) βασίζονται στη θεωρία της εξέλιξης και χρησιμοποιούνται ευρέως σε δυναμικά δίκτυα για τη βελτιστοποίηση δρομολόγησης και την ισορροπία φορτίου, ενώ η προσομοιωμένη ανόπτηση (Simulated Annealing) εφαρμόζεται σε προβλήματα βελτιστοποίησης με μεγάλους χώρους αναζήτησης.
- **Αλγόριθμοι Συμήνους (Swarm Intelligence Algorithms)** Οι αλγόριθμοι συμήνους εμπνέονται από τη συλλογική συμπεριφορά κοινωνικών οργανισμών (π.χ., μυρμήγκια, πουλιά, μέλισσες) και έχουν βρει εφαρμογή σε δίκτυα όπου η κατανεμημένη λήψη αποφάσεων είναι κρίσιμη.
 - **Particle Swarm Optimization (PSO):** Ένας από τους πιο δημοφιλείς αλγόριθμους, προσομοιώνει την κίνηση σωματιδίων σε έναν χώρο αναζήτησης και έχει χρησιμοποιηθεί για βελτιστοποίηση τοπολογίας και διαχείριση φορτίου σε κεντροποιημένα δίκτυα.
 - **Ant Colony Optimization (ACO):** Εμπνευσμένος από τη συμπεριφορά των μυρμηγκιών στην αναζήτηση τροφής, ο ACO χρησιμοποιείται για την εύρεση βέλτιστων διαδρομών δρομολόγησης.
 - **Artificial Bee Colony (ABC):** Βασίζεται στη συλλογική συμπεριφορά των μελισσών και έχει χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση πόρων και την κατανομή εύρους ζώνης.

Η επιλογή του κατάλληλου αλγορίθμου εξαρτάται από τη φύση του προβλήματος και τις απαιτήσεις του δικτύου:

Για μικρά ή στατικά δίκτυα, οι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι είναι αποτελεσματικοί λόγω της ακρίβειας τους. Για μεγάλα και δυναμικά δίκτυα, οι στοχαστικοί και μεταευρετικοί αλγόριθμοι, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι και το PSO, αποδεικνύονται πιο αποτελεσματικοί. Για βελτιστοποίηση διαδρομών και διαχείριση

ροής δεδομένων, οι αλγόριθμοι αποικιών μυρμηγκιών (ACO) και οι ευρετικοί αλγόριθμοι (Dijkstra, A*) είναι ιδανικοί. Οι αλγόριθμοι Swarm Intelligence είναι ιδιαίτερα αποδοτικοί σε περιβάλλοντα με κατανεμημένη επεξεργασία, καθώς αξιοποιούν τη συνεργατική συμπεριφορά των πρακτόρων για την εξεύρεση λύσεων. Σε μελέτες σύγκρισης, οι αλγόριθμοι PSO και ACO θεωρούνται από τις καλύτερες επιλογές για δυναμικά δίκτυα, ενώ η χρήση υβριδικών προσεγγίσεων (π.χ., συνδυασμός γενετικών αλγορίθμων με PSO) φαίνεται να προσφέρει ακόμα καλύτερα αποτελέσματα.

2.6 Καταλληλή Προσέγγιση του Πρόβληματος

Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος βελτιστοποίησης, μια κατάλληλη προσέγγιση είναι η χρήση μεταευρετικών αλγορίθμων, οι οποίοι είναι ειδικά σχεδιασμένοι για την αντιμετώπιση πολύπλοκων και μη γραμμικών προβλημάτων. Το συγκεκριμένο πρόβλημα χαρακτηρίζεται από έναν υψηλής διάστασης χώρο αναζήτησης, αλληλεξαρτώμενες μεταβλητές και δυναμικά μεταβαλλόμενες συνθήκες, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη χρήση κλασικών ντετερμινιστικών μεθόδων, όπως ο γραμμικός ή δυναμικός πρограмματισμός, οι οποίοι συχνά απαιτούν μεγάλο υπολογιστικό κόστος και αδυνατούν να προσαρμοστούν αποτελεσματικά σε αλλαγές του συστήματος.

Οι μεταευρετικοί αλγόριθμοι παρέχουν μια αποδοτική προσέγγιση, καθώς επιτρέπουν την εύρεση κοντά στο βέλτιστο λύσεων σε λογικό χρονικό διάστημα, ακόμα και όταν το πρόβλημα δεν διαθέτει κλειστή μαθηματική μορφή. Σε αντίθεση με τις κλασικές μεθόδους, οι μεταευρετικές τεχνικές δεν εγγυώνται πάντα την εύρεση της απόλυτα βέλτιστης λύσης, αλλά αξιοποιούν στρατηγικές όπως η τυχαιότητα, η εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και η προσαρμοστική μάθηση, ώστε να συγκλίνουν σε αποδοτικές λύσεις. Η ικανότητά τους να προσαρμόζονται δυναμικά σε σύνθετα περιβάλλοντα είναι ιδιαίτερα σημαντική για το προτεινόμενο σύστημα, καθώς επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, τη διαχείριση της ισχύος και τη μεγιστοποίηση της ποιότητας υπηρεσίας για τους χρήστες. Συνεπώς, η εφαρμογή μεταευρετικών προσεγγίσεων αποτελεί μια αποτελεσματική στρατηγική για τη διαχείριση και τον έλεγχο ενός τέτοιου πολύπλοκου και δυναμικού συστήματος.

Κεφάλαιο 3

Επίλυση του Προβλήματος

3.1 Αλγόριθμοι Σμήνους

Οι αλγόριθμοι σμήνους (Swarm Intelligence Algorithms) αποτελούν μια κατηγορία μεταευρετικών αλγόριθμων εμπνευσμένων από τη συλλογική συμπεριφορά φυσικών σμηνών, όπως των πουλιών, των ψαριών και των μυρμηγκιών. Αυτοί οι αλγόριθμοι βασίζονται σε αποκεντρωμένα, συνεργατικά συστήματα όπου οι απλοί κανόνες αλληλεπίδρασης μεταξύ των ατόμων του σμήνους οδηγούν σε πολύπλοκη και αποδοτική αναζήτηση λύσεων.

Δημοφιλή παραδείγματα περιλαμβάνουν τον Αλγόριθμο Σμήνους Σωματιδίων (PSO), την Βελτιστοποίηση με Αποικίες Μυρμηγκιών (ACO) και τον Αλγόριθμο Τεχνητής Κυψέλης Μελισσών (ABC). Οι αλγόριθμοι αυτοί βρίσκουν εφαρμογή σε προβλήματα βελτιστοποίησης, μηχανικής μάθησης, ρομποτικής και άλλων επιστημονικών πεδίων, λόγω της ικανότητάς τους να εξερευνούν μεγάλους χώρους αναζήτησης αποδοτικά και προσαρμοστικά.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των αλγορίθμων σμήνους είναι η ανθεκτικότητά τους σε τοπικά βέλτιστα και η ικανότητά τους να προσαρμόζονται σε δυναμικά περιβάλλοντα. Χάρη στη συνεργατική φύση τους, αυτοί οι αλγόριθμοι μπορούν να προσεγγίσουν πολύπλοκα προβλήματα χωρίς να απαιτούν αυστηρό μαθηματικό μοντέλο, καθιστώντας τους ιδιαίτερα χρήσιμους σε πραγματικές εφαρμογές όπου οι παραδοσιακές μέθοδοι αποτυγχάνουν.

3.2 Τεχνικές Βελτιστοποίησης Πολλαπλών Στόχων

Στην παρούσα εργασία, για την αξιολόγηση του σήματος στους χρήστες ενός PWE, θα ληφθούν υπόψη δύο βασικά μεγέθη: η διασπορά καθυστέρησης (delay spread) και η ισχύς. Αυτά τα δύο μεγέθη τείνουν να είναι αντικρουόμενα, καθώς η επίτευξη υψηλής ισχύος σήματος συχνά απαιτεί τη δημιουργία πολλαπλών μονοπατιών προς τον δέκτη, γεγονός που μπορεί να αυξήσει τη διασπορά καθυστέρησης. Αντίθετα, η προσπάθεια ελαχιστοποίησης του delay spread ενδέχεται να οδηγήσει στη διαμόρφωση ενός καναλιού που δεν ικανοποιεί πλήρως τις απαιτήσεις ισχύος. Αυτή η αντίθεση καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη τεχνικών βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικρουόμενων στόχων. Μία από τις κύριες προκλήσεις που παρουσιάζουν αυτές οι τεχνικές είναι ο τρόπος αξιολόγησης της ποιότητας των λύσεων.

3.2.1 Τρόποι Αξιολόγησης Λύσεων

- Η πρώτη προσέγγιση για την αξιολόγηση των λύσεων στην βελτιστοποίηση πολλαπλών μεγεθών είναι ο ορισμός μια κοινής συνάρτησης στόχου:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = x_1 \times w_1 + x_2 \times w_2 + \dots + x_n \times w_n$$

όπου w_1, w_2, \dots, w_n είναι τα βάρη που καθορίζουν τη σημασία κάθε στόχου. Αυτή ωστόσο η προσέγγιση παρουσιάζει δυσκολίες όταν οι στόχοι ανήκουν σε διαφορές τάξεις μεγέθους και χαρακτηρίζονται από υψηλές διακυμάνσεις, κατί που ισχύει στην περίπτωση των υπο βελτιστοποίηση στόχων. Έτσι ώστε να επιτευγχθεί μια ελεγχόμενη βελτιστοποίηση, οπου δηλαδή η συνάρτηση δεν κυριαρχείται από καποιο από τα δύο μεγέθη, είναι αναγκαία η δυναμική κανονικοποίηση τους, η οποία προυποθέτει την συνεχή συλλογή δεδομένων.

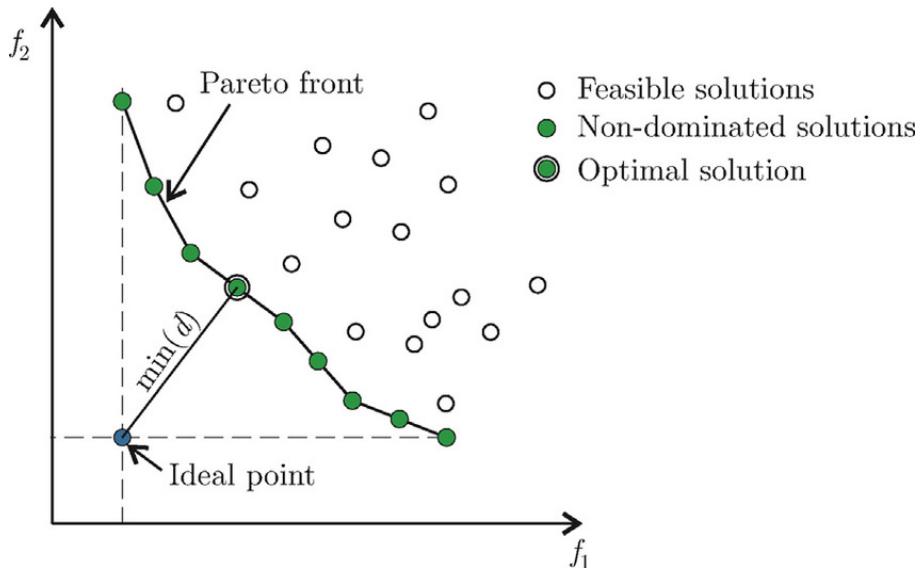
- Μια πρακτικότερη εναλλακτική, αποτελεί η παρετο-βελτιστοποίηση. Μια λύση θεωρείται παρετο-βέλτιστη, εάν δεν υπάρχει άλλη λύση που να είναι καλύτερη σε όλους τους στόχους ταυτόχρονα, δηλαδή αν δεν υπάρχει άλλη λύση που να κυριαρχεί σε αυτήν. Μια λύση x_1 κυριαρχεί σε μια άλλη λύση x_2 αν για όλους τους στόχους i έχουμε:

$$f_i(x_1) \leq f_i(x_2) \quad \forall i, \quad \text{και} \quad \exists j : f_j(x_1) < f_j(x_2)$$

όπου $f_i(x)$ είναι η τιμή του στόχου i για τη λύση x .

Στην περίπτωση της βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων, δεν είναι συνήθως δυνατό να βρούμε μια μοναδική βέλτιστη λύση. Αντίθετα, οι βέλτιστες λύσεις κατατάσσονται σε ένα παρετο-μέτωπο. Το παρετο-μέτωπο είναι το σύνολο όλων των λύσεων που δεν κυριαρχούνται από καμία άλλη λύση, δηλαδή το σύνολο των

λύσεων που είναι παρετο-βέλτιστες. Δηλαδή, το παρετο-μέτωπο αποτελεί ένα σύνολο ισοβαρών λύσεων που ανταγωνίζονται για την καλύτερη δυνατή επίδοση στους διάφορους στόχους.



Σχήμα 3.1: Visualization Of a Pareto Front

Συνολικά, η παρετο-βελτιστοποίηση είναι κατάλληλη για την επίλυση προβλημάτων όπου οι στόχοι δεν είναι εύκολα συνδυάσιμοι και μπορούν να υπάρξουν πολλές βέλτιστες λύσεις που αντιπροσωπεύουν διάφορες ισορροπίες μεταξύ των στόχων.

3.2.2 Αλγόριθμος Fast Non-Dominated Sorting

Ο αλγόριθμος **Fast Non-Dominated Sorting** αποτελεί μια αποδοτική μέθοδο για την οργάνωση και κατάταξη λύσεων σε προβλήματα πολυκριτήριας βελτιστοποίησης, ταξινομώντας τις σε διαφορετικά επίπεδα Pareto, γνωστά ως Pareto Fronts. Στόχος του είναι να διαχωρίσει τις λύσεις σε διακριτές ομάδες με βάση τη σχέση κυριαρχίας, όπου μια λύση θεωρείται κυρίαρχη αν υπερέχει τουλάχιστον σε ένα κριτήριο και δεν είναι χειρότερη στα υπόλοιπα[35].

Η διαδικασία ξεκινά με τον υπολογισμό του αριθμού των λύσεων που κυριαρχούν κάθε δεδομένη λύση, καθώς και του συνόλου των λύσεων που αυτή η ίδια κυριαρχεί. Οι λύσεις που δεν κυριαρχούνται από καμία άλλη τοποθετούνται στο πρώτο επίπεδο Pareto, ενώ στη συνέχεια αφαιρούνται από το σύνολο, ώστε να προκύψει το δεύτερο επίπεδο Pareto, το οποίο περιλαμβάνει τις επόμενες καλύτερες λύσεις που πλέον δεν κυριαρχούνται από καμία άλλη στην επικαιροποιημένη λίστα. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να ταξινομηθούν όλες οι λύσεις.

Ο αλγόριθμος αποτελεί βασικό στοιχείο πολλών εξελικτικών μεθόδων βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων, όπως ο NSGA-II, καθώς επιτρέπει την αποδοτική εύρεση και διατήρηση ενός ποικιλόμορφου συνόλου βέλτιστων λύσεων[35]. Η πολυπλοκότητά του ανέρχεται σε

$$O(MN^2)$$

όπου M είναι ο αριθμός των στόχων και N το πλήθος των λύσεων, καθιστώντας τον κατάλληλο για εφαρμογές όπου απαιτείται ισορροπία μεταξύ ακρίβειας και υπολογιστικής αποδοτικότητας. Η υλοποίηση του αλγορίθμου σε ψευδοκώδικα φαίνεται στον Αλγόριθμο II

3.2.3 Απόσταση Συνωστισμού (Crowding Distance)

Η απόσταση συνωστισμού (crowding distance) είναι ένα μέτρο που χρησιμοποιείται σε αλγορίθμους πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, για να ποσοτικοποιείται την πυκνότητα των λύσεων γύρω από ένα συγκεκριμένο σημείο στον χώρο των λύσεων. Βασικός στόχος της είναι να διασφαλίσει την ποικιλομορφία (diversity) των λύσεων σε ένα σύνολο μη κυριαρχούμενων λύσεων (non-dominated solutions)[35].

Η απόσταση συνωστισμού για μια λύση ορίζεται ως ο μέσος όρος των αποστάσεων μεταξύ των δύο πλησιέστερων λύσεων σε κάθε διάσταση του χώρου των στόχων. Με άλλα λόγια, για κάθε λύση, υπολογίζεται η απόσταση από τις γειτονικές της λύσεις σε κάθε μία από τις κριτήριες συναρτήσεις (objective functions). Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση συνωστισμού μιας λύσης, τόσο λιγότερο “πυκνοκατοικημένη” είναι η περιοχή γύρω της, πράγμα που σημαίνει ότι η λύση αυτή προσφέρει μεγαλύτερη ποικιλομορφία στο σύνολο των λύσεων.

Για να υπολογιστεί η απόσταση συνωστισμού για μια λύση i , ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

1. **Ταξινόμηση:** Ταξινομούνται όλες οι λύσεις σε κάθε κριτήριο ξεχωριστά.
2. **Απόσταση:** Για κάθε κριτήριο, υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ των δύο πλησιέστερων λύσεων (γειτονικών) της λύσης i .
3. **Κανονικοποίηση:** Οι αποστάσεις κανονικοποιούνται με βάση το εύρος των τιμών του κάθε κριτηρίου.
4. **Σύνολο:** Η απόσταση συνωστισμού της λύσης i είναι το άθροισμα των κανονικοποιημένων αποστάσεων για όλα τα κριτήρια.

Μαθηματικά, η απόσταση συνωστισμού CD_i για μια λύση i δίνεται από τον τύπο:

Algorithm II FastNonDominatedSort(solutions)

```

fronts ← new List
dominationCount ← new Dictionary
dominatedSolutions ← new Dictionary
for each p in solutions do
    dominationCount[p] ← 0
    dominatedSolutions[p] ← new List
    for each q in solutions do
        if Dominates(p, q) then
            dominatedSolutions[p].Add(q)
        else if Dominates(q, p) then
            dominationCount[p] ← dominationCount[p] + 1
        end if
    end for
    if dominationCount[p] == 0 then
        p.rank ← 0 {Rank o (best solutions)}
        if fronts.Count == 0 then
            fronts.Add(new List)
        end if
        fronts[0].Add(p)
    end if
end for
i ← 0
while i < fronts.Count and fronts[i].Count > 0 do
    nextFront ← new List
    for each p in fronts[i] do
        for each q in dominatedSolutions[p] do
            dominationCount[q] ← dominationCount[q] - 1
            if dominationCount[q] == 0 then
                q.rank ← i + 1 {Assign rank (higher = worse)}
                nextFront.Add(q)
            end if
        end for
    end for
    fronts.Add(nextFront)
end while
return fronts

```

$$CD_i = \sum_{j=1}^m \frac{|f_j(i+1) - f_j(i-1)|}{f_j^{\max} - f_j^{\min}}$$

όπου:

- *m* είναι ο αριθμός των κριτηρίων,
- $f_j(i+1)$ και $f_j(i-1)$ είναι οι τιμές των γειτονικών λύσεων στο κριτήριο *j*,

- f_j^{\max} και f_j^{\min} είναι οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές του κριτηρίου j .

Η χρήση της απόστασης συνωστισμού επιτρέπει στους αλγορίθμους πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης να διατηρούν μια καλή εξισορρόπηση μεταξύ της σύγκλισης (convergence) και της ποικιλομορφίας (diversity) των λύσεων. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε προβλήματα όπου υπάρχουν πολλαπλοί ανταγωνιστικοί στόχοι, καθώς εξασφαλίζει ότι οι λύσεις που επιλέγονται καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα του χώρου των στόχων. Στον Αλγόριθμο 12 παρουσιάζεται υλοποίηση σε ψευδοκώδικα.

Algorithm 12 CalculateCrowdingDistance(solutions)

```

numSolutions ← solutions.Count
if numSolutions == 0 then
    return
end if
for each sol in solutions do
    sol.crowdingDistance ← 0 {Reset crowding distance}
end for
solutions.Sort((a, b) → a.maxDelaySpread.CompareTo(b.maxDelaySpread)) {Sort by
maxDelaySpread}
solutions[0].crowdingDistance ← ∞ {Set boundary solutions to infinity}
solutions[numSolutions - 1].crowdingDistance ← ∞
maxD ← solutions[numSolutions - 1].maxDelaySpread - solutions[0].maxDelaySpread
if maxD > 0 then
    for i ← 1 to numSolutions - 2 do
        solutions[i].crowdingDistance ← solutions[i].crowdingDistance +
            (solutions[i + 1].maxDelaySpread - solutions[i - 1].maxDelaySpread)/maxD
    end for
end if
solutions.Sort((a, b) → a.minPower.CompareTo(b.minPower)) {Sort by minPower}
solutions[0].crowdingDistance ← ∞ {Set boundary solutions to infinity}
solutions[numSolutions - 1].crowdingDistance ← ∞
maxP ← solutions[numSolutions - 1].minPower - solutions[0].minPower
if maxP > 0 then
    for i ← 1 to numSolutions - 2 do
        solutions[i].crowdingDistance ← solutions[i].crowdingDistance +
            (solutions[i + 1].minPower - solutions[i - 1].minPower)/maxP
    end for
end if

```

3.2.4 Τεχνικές Αναζήτησης

Στους αλγορίθμους βελτιστοποίησης, μια από τις πιο διαδεδομένες προσεγγίσεις είναι η χρήση τοπικών και στοχαστικών μεθόδων αναζήτησης, οι οποίες επιτρέπουν την εξερεύνηση του χώρου λύσεων και την προσέγγιση του παγκόσμιου βέλτιστου σημείου.[36]

Ο αλγόριθμος **Local Search** είναι μια διαδικασία αναζήτησης λύσεων που βασίζεται στην έννοια της τοπικής βελτίωσης. Ξεκινώντας από μια αρχική, έγκυρη λύση, η μέθοδος αναζητά στη γειτονιά της τρέχουσας λύσης μία καλύτερη, συγκρίνοντάς τες ως προς μια αντικειμενική συνάρτηση κόστους ή απόδοσης. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να μην εντοπίζεται άλλη λύση στη γειτονιά που να προσφέρει βελτίωση, οπότε και επιτυγχάνεται ένα τοπικά βέλτιστο σημείο. Παρότι ο **Local Search** μπορεί να βρει ικανοποιητικές λύσεις γρήγορα, εμφανίζει το μειονέκτημα της παγίδευσης σε τοπικά βέλτιστα, δηλαδή σε λύσεις που μπορεί να μην είναι η συνολικά βέλτιστη αλλά είναι η καλύτερη στην άμεση γειτονιά τους. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, χρησιμοποιούνται τεχνικές που εισάγουν στοχαστικά στοιχεία στην αναζήτηση, επιτρέποντας την προσωρινή αποδοχή χειρότερων λύσεων ώστε να διερευνηθούν εναλλακτικές περιοχές του χώρου λύσεων.

Algorithm 13 ApplyLocalSearch(sol)

```

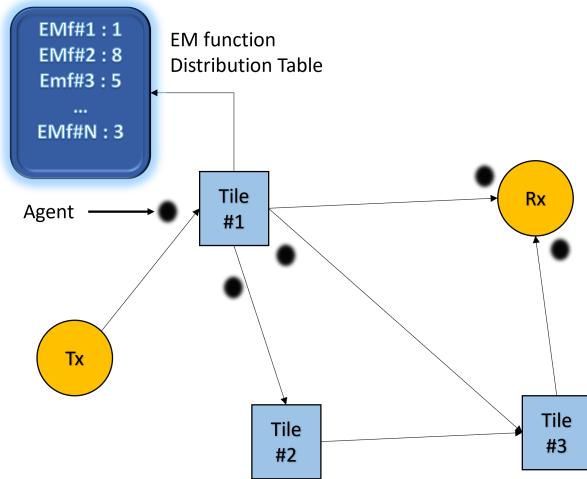
newSol ← sol
N ← ⌊localSearchChance · sol.list.Count⌋
for each j in nodeVector do
    mode ← sol.list[j][1]
    for i ← 0 to g.numberOfModes − 1 do
        if i == mode then
            continue
        end if
        solCopy ← new Solution(sol.list)
        solCopy.list[j][1] ← i
        Propagate(solCopy)
        if solCopy.minPower ≤ minPower then
            continue
        end if
        if Dominates(solCopy, newSol) then
            UpdateParetoArchive(newSol, paretoArchive)
        end if
    end for
end for
sol.localSearchApplied ← true

```

3.3 Προτεινόμενη Μεταευρετική Μέθοδος - HERA

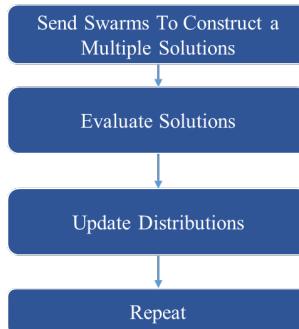
Θεωρούμε τον γράφο του Σχήματος 3.3, ο οποίος έχει αρχικοποιηθεί με τυχαίο τρόπο από τον αλγόριθμο Ι. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση Propagate() του αλγορίθμου 7, προσομοιώνουμε τη διάδοση της ισχύος στον χώρο.

Για καλύτερη κατανόηση του τρόπου ενσωμάτωσης, υποθέτουμε ότι κάθε ακτίνα που δρομολογείται μέσα στον γράφο συνοδεύεται από έναν "πράκτορα" του σμήνους, το οποίο ακολουθεί τη διαδρομή της ακτίνας και συμμετέχει στη διαδικασία προσαρμογής.



Σχήμα 3.2: Visualization of Swarm Integration With the Graph Model

Τα SDMs του συστήματος αρχικά θεωρούνται ανενεργά (δεν εκτελούν κάποια ηλεκτρομαγνητική λειτουργία) και συνοδεύονται από μια κατανομή πιθανοτήτων, η οποία καθορίζει την πιθανότητα ενεργοποίησης μιας συγκεκριμένης λειτουργίας. Όταν ένας πράκτορας καταφτάνει σε ένα ανενεργό πλακίδιο, ενεργοποιεί μία από τις διαθέσιμες λειτουργίες σύμφωνα με την αντίστοιχη κατανομή. Το SDM, στη συνέχεια, δρομολογεί τις ακτίνες ανάλογα, αποστέλλοντας νέους πράκτορες του συμήνους για να συνοδεύσουν τις ανακλώμενες ακτίνες και να συνεχίσουν τη διαδικασία. Μόλις μια λειτουργία ενεργοποιηθεί, παραμένει ενεργή μέχρι την ολοκλήρωση της διάδοσης.



Σχήμα 3.3: Steps of the Swarm Optimization Process

Στο τελικό στάδιο, οι πράκτορες που φτάνουν στον δέκτη αξιολογούν την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος. Με βάση μια προκαθορισμένη συνάρτηση ενημέρωσης, προσαρμόζουν τις κατανομές πιθανοτήτων των ενεργοποιημένων λειτουργιών, επηρεάζοντας την πιθανότητα επιλογής τους σε μελλοντικές επαναλήψεις της διαδικασίας.

Εφόσον όλες οι κατανομές των Η/Μ λειτουργιών έχουν οριστεί ως ομοιόμορφες (κατά προτίμιση στην τιμή I), αποστέλλονται συμήνη στον γράφο μέχρι να κατασκευαστεί ένας αριθμός N λύσεων. Λύσεις που δεν

Algorithm 14 SendSwarms(*numSolutions*)

```

numSolutionsConstructed ← 0
while numSolutionsConstructed < numSolutions do
    currentSolution ← rM.Propagate()
    if currentSolution.minPower ≤ minPower then
        continue
    end if
    allSolutions.Add(currentSolution)
    numSolutionsConstructed ← numSolutionsConstructed + 1
end while

```

ικανοποιούν τον περιορισμό δεν καταμετρούνται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι ο ζητούμενος αριθμός έγκυρων λύσεων να κατασευαστεί από τους πράκτορες. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στον αλγόριθμο 14.

Ο HERA αξιοποίει την κατασκευή των λύσεων μέσων της παραπάνω συνάρτησης σε δύο στάδια, κάθε ένα εξυπηρετώντας διαφορετικό σκοπό στην αναζήτηση των αναζήτησης.

- **Στάδιο Εξερεύνησης (Αλγόριθμος 15)** - Η φάση αυτή αποτελεί έναν από τους κεντρικούς πυλώνες του αλγορίθμου και έχει ως κύριο στόχο την εξερεύνηση του χώρου των δυνατών λύσεων, με στόχο την κατασκευή ενός ποικιλόμορφου και ισορροπημένου παρέτο μετώπου. Όταν καλείται η μέθοδος *SendSwarms()*, δημιουργούνται N λύσεις, οι οποίες στη συνέχεια κατατάσσονται σε διαβαθμισμένα παρέτο-μέτωπα με τη χρήση της συνάρτησης *FastNonDominatedSorting*, η οποία αναφέρθηκε αναλυτικά στην υποενότητα 3.2.2.

Algorithm 15 ExplorationPhase()

```

SendSwarms(numSolutions)
paretoFronts ← sM.FastNonDominatedSort(allSolutions)
paretoArchive ← sM.UpdateParetoArchive(paretoArchive, allSolutions, maxCapacity)
HERADistributionUpdateSA(paretoFronts, Q)
paretoFronts.Clear()
allSolutions.Clear()

```

Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος HERA προχωρά στην αύξηση των κατανομών των επιλεγμένων ηλεκτρομαγνητικών (Η/Μ) συναρτήσεων, βασιζόμενος στην εκθετική συνάρτηση $Q \times e^{-rank}$, όπου *rank* αντιπροσωπεύει τον βαθμό της αντίστοιχης λύσης στην ιεραρχία του παρέτο μετώπου και *Q* τον συντελεστή αύξησης. Επιπλέον, οι κατανομές ορισμένων τυχαίων λειτουργιών αυξάνονται κατά έναν τυχαίο αριθμό ανάλογο του *Q*, με στόχο την ενίσχυση της ποικιλομορφίας και την αποφυγή της παγίδευσης σε τοπικά βέλτιστα. Η πιθανότητα οι τυχαίες λύσεις να ενισχυθούν μείωνεται εκθετικά με τον αριθμό των επαναλήψεων του αλγορίθμου, προσεγγίζοντας έτσι μηχανισμό ψύξης της προσομοιωμένη ανόπτησης.

Όλες οι διαδικασίες αναβάθμισης των κατανομών εκτελούνται μέσω της συνάρτησης HERAUpdateDistributionsAS (Αλγόριθμος 16), η οποία διασφαλίζει την ορθή ενημέρωση των παραμέτρων του αλγορίθμου. Κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του αλγορίθμου, γίνεται συνεχής αποθήκευση των βέλτιστων λύσεων που ανήκουν στο παρέτο μέτωπο. Η συλλογή αυτή των λύσεων είναι γνωστή ως Pareto Archive και αποτελεί το τελικό αποτέλεσμα του αλγορίθμου.

Algorithm 16 HERADistributionUpdateSA(paretoFronts, Q)

```

rank ← 0
for each paretoFront in paretoFronts do
    for each solution in paretoFront do
        for each pair in solution.list do
            node ← g.allNodes[pair[0]]
            mode ← pair[1]
            node.distribution[mode] ← node.distribution[mode] + Q · exp(−rank)
        end for
    end for
    rank ← rank + 1
end for
probability ← exp(−temperature) {Annealing factor (decreases over time)}
temperature ← temperature + 0.01
extraUpdates ← ⌊probability · g.allNodes.Count · g.numberOfModes⌋ {Number of extra updates}
for i ← 1 to extraUpdates do
    randomNodeIndex ← rand.Next(g.allNodes.Count)
    randomNode ← g.allNodes[randomNodeIndex]
    randomMode ← rand.Next(g.numberOfModes) {Pick a random mode}
    randomSlope ← Q · rand.NextDouble() {Slightly randomized slope}
    randomNode.distribution[randomMode] ← randomNode.distribution[randomMode] +
    randomSlope
end for

```

- **Στάδιο Αξιοποίησης**(Αλγόριθμος 17) - Αυτό το στάδιο ενεργοποιείται μετά την ολοκλήρωση ενός προκαθορισμένου αριθμού επαναλήψεων. Αφού το αρχείο Pareto έχει εμπλουτιστεί με υψηλής ποιότητας λύσεις, ο αλγόριθμος HERA εκτελεί τοπικές αναζητήσεις στις λύσεις με τη μεγαλύτερη τιμή απόστασης συνωστισμού (Crowding Distance). Η διαδικασία αναζήτησης διαφοροποιεί την αρχική λύση, τροποποιώντας μία και μόνο H/M συνάρτηση του συνδυασμού, ενώ κάθε γειτονική λύση αξιολογείται εκ νέου. Εάν μια γειτονική λύση κυριαρχεί της προηγούμενης, αντικαθιστά τη θέση της στο αρχείο Pareto.

Η υλοποίηση της συνάρτησης τοπικής αναζήτησης περιγράφεται λεπτομερώς στον αλγόριθμο 13. Μετά την εκτέλεση ενός προκαθορισμένου αριθμού τοπικών αναζητήσεων, οι λύσεις του αρχείου Pareto κατατάσσονται σε φθίνουσα σειρά με βάση την απόσταση συνωστισμού. Σε αυτό το σημείο, ο συντελεστής αύξησης Q διπλασιάζεται.

Οι κατανομές των λύσεων ανανεώνονται, με βάρος που εξαρτάται από την κατάταξή τους, ακολουθώντας την εκθετική συνάρτηση:

Algorithm 17 ExploitationPhase()

```

 $j \leftarrow 0$ 
 $localSearchesApplied \leftarrow 0$ 
while  $j < paretoArchive.Count$  do
    if not  $paretoArchive[j].localSearchApplied$  then
         $ApplyLocalSearch(paretoArchive[j])$ 
         $localSearchesApplied \leftarrow localSearchesApplied + 1$ 
    end if
    if  $localSearchesApplied == numberOfLocalSearches$  then
        break
    end if
     $j \leftarrow j + 1$ 
end while
 $Q \leftarrow 2 \times Q$ 
 $HERADistributionUpdate(paretoArchive, Q)$ 
 $SendSwarms(N)$ 
 $paretoArchive \leftarrow UpdateParetoArchive(paretoArchive, allSolutions, maxCapacity)$ 
 $allSolutions.Clear()$ 

```

$$Q \times e^{-k \times \text{rank}} \quad (3.1)$$

όπου η μεταβλητή rank εκφράζει τη θέση της λύσης στην κατάταξη, ενώ η σταθερά k καθορίζει την κλίση της εκθετικής συνάρτησης. Μετά την ολοκλήρωση αυτής της ανανέωσης, καλείται η συνάρτηση sendSwarms(), η οποία δημιουργεί έναν μεγάλο αριθμό νέων λύσεων.

Οι νέες λύσεις, επηρεασμένες από την προηγούμενη ανανέωση του αρχείου Pareto, προκύπτουν ως τυχαίοι συνδυασμοί των πιο ελίτ λύσεων. Ο στόχος της φάσης αξιοποίησης είναι να εστιάσει στην εκμετάλλευση των ήδη καλών λύσεων, αντί της τυχαίας εξερεύνησης. Καθώς η διαδικασία βελτιστοποίησης προχωρά, η φάση αυτή ενεργοποιείται όλο και συχνότερα, οδηγώντας τον αλγόριθμο προς τη σύγκλιση.

Ο HERA (Hybrid Estimation Ranking-based Algorithm), ενορχηστρώνει μια πληθώρα ήδη υπάρχουσων μεταευριστικών τεχνικών έτσι ώστε να δημιουργήσει μια εξειδικευμένη και έξυπνη αναζήτηση, η οποία προσφέρει μια ποιοτική ισορροπία εξερεύνησης και ορθής εκμετάλλευσης των καλών λύσεων. Συνδυάζει τεχνικές όπως η τοπική αναζήτηση (local search), ανήκει στις αλγορίθμικές προσεγγίσεις εκτίμησης κατανομών (Estimation of Distribution Algorithms - EDA) και χρησιμοποιεί σύστημα αξιολόγησης με βάση την κατάταξη (ranking-based evaluation system).

3.4 NSGA-II

Ο NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) είναι ένας από τους πιο δημοφιλείς αλγορίθμους πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, σχεδιασμένος για να βρίσκει λύσεις σε προβλήματα με πολλαπλά αντικειμενικά κριτήρια χωρίς την ανάγκη συνδυασμού τους σε μία ενιαία συνάρτηση κόστους. Αναπτύχθηκε από τους Deb, Pratap, Agarwal και Meyarivan το 2002 και αποτελεί βελτιωμένη εκδοχή του αρχικού NSGA, εισάγοντας αποδοτικότερες μεθόδους ταξινόμησης, επιλογής και διατήρησης της ποικιλομορφίας του πληθυσμού.

Η διαδικασία του NSGA-II ξεκινά με την αρχικοποίηση ενός τυχαίου αρχικού πληθυσμού P_0 μεγέθους N , όπου κάθε άτομο αποτελεί μια πιθανή λύση του προβλήματος. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η μέθοδος Fast Non-Dominated Sorting, η οποία κατατάσσει τις λύσεις σε επίπεδα Pareto Fronts. Κάθε λύση ταξινομείται σε ένα μέτωπο ανάλογα με το πόσες άλλες λύσεις την κυριαρχούν, όπου οι μη κυριαρχούμενες λύσεις ανήκουν στο πρώτο μέτωπο, οι αμέσως επόμενες στο δεύτερο κ.ο.κ.

```

population ← InitializePopulation()
while numGenerations < maxNumGenerations do
    if not firstGenPassed then
        FastNonDominatedSort(population)
        CalculateCrowdingDistance(population)
        firstGenPassed ← true
    end if
    offspring ← GenerateOffspring(population)
    population.AddRange(offspring)
    Mutate(population)
    paretoFronts ← FastNonDominatedSort(population)
    paretoArchive ← UpdateParetoArchive(paretoArchive, population, 250)
    population ← SelectNextGeneration(paretoFronts)
end while

```

Μετά την ταξινόμηση, ο NSGA-II χρησιμοποιεί τον Crowding Distance Assignment, ένας μηχανισμός που αναλύθηκε εκτενώς στην υποενότητα 3.2.3

Η επιλογή γονέων πραγματοποιείται μέσω του Binary Tournament Selection, όπου δύο τυχαία επιλεγμένες λύσεις συγκρίνονται πρώτα με βάση το επίπεδο Pareto στο οποίο ανήκουν και, σε περίπτωση ισοπαλίας, με βάση την απόσταση συνωστισμού. Οι νικητές αυτού του μηχανισμού χρησιμοποιούνται για την παραγωγή απογόνων μέσω των γενετικών τελεστών διασταύρωσης (crossover) και μετάλλαξης (mutation), δημιουργώντας έναν νέο απόγονο πληθυσμό Q_t ίδιου μεγέθους με τον αρχικό.

Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει τη δημιουργία του ενδιάμεσου πληθυσμού R_t συνδυάζοντας τον αρχικό πληθυσμό P_t και τον απόγονο πληθυσμό Q_t . Ο συνδυασμένος πληθυσμός ταξινομείται εκ νέου με βάση το μη κυριαρχούμενο φίλτραρισμα, και οι N καλύτερες λύσεις επιλέγονται για να προχωρήσουν στην επόμενη

γενιά. Όταν τα μέτωπα Pareto περιέχουν περισσότερες λύσεις από όσες απαιτούνται, ο αλγόριθμος επιλέγει εκείνες με τη μεγαλύτερη απόσταση συνωστισμού για να διατηρήσει την ποικιλομορφία.

Algorithm 18 Crossover(parent1, parent2)

```

offspring ← new Solution()
for i ← 0 to parent1.list.Count – 1 do
    if rand.Next(2) == 0 then
        pair ← parent1.list[i]
        mode ← pair[1]
        offspring.list.Add(new []{i, mode})
    else
        pair ← parent2.list[i]
        mode ← pair[1]
        offspring.list.Add(new []{i, mode})
    end if
end for
return offspring
```

Algorithm 19 Mutate(population)

```

for each solution in population do
    for each pair in solution.list do
        if rand.NextDouble() < mutationChance then
            pair[1] ← rand.Next(g.numberOfModes)
            Propagate(solution)
            if solution.minPower < minPower then
                continue
            end if
            iterationCounter ← iterationCounter + 1
        end if
    end for
end for
```

Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται για έναν προκαθορισμένο αριθμό γενεών ή μέχρι να ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο σύγκλισης. Μέσω αυτής της εξελικτικής προσέγγισης, ο NSGA-II διατηρεί μια ισορροπία μεταξύ εξερεύνησης του χώρου αναζήτησης και εκμετάλλευσης των ήδη καλών λύσεων, ενώ παράλληλα εξασφαλίζει ότι οι τελικές λύσεις είναι κατανεμημένες ομοιόμορφα κατά μήκος του συνόλου Pareto.[35]

Οι μηχανισμοί διαστάνρωσης και μετάλλαξης που έχουν αναπτυχθεί φαίνονται στους Αλγορίθμους 18 και 19

Η συνάρτηση Crossover δημιουργεί ένα νέο άτομο (offspring) συνδυάζοντας χαρακτηριστικά από δύο γονείς (parent1 και parent2). Για κάθε στοιχείο στη λίστα των γονέων, επιλέγεται τυχαία από ποιον γονέα θα κληρονομήσει ο απόγονος το αντίστοιχο χαρακτηριστικό (mode). Αυτή η διαδικασία εξασφαλίζει ότι

ο απόγονος θα έχει ένα μείγμα χαρακτηριστικών και από τους δύο γονείς, προωθώντας έτσι την ποικιλομορφία στον πληθυσμό. Η τυχαιότητα στην επιλογή των χαρακτηριστικών βοηθά στη διατήρηση της εξερεύνησης του χώρου αναζήτησης.

Η συνάρτηση `Mutate` εισάγει τυχαίες αλλαγές στα άτομα του πληθυσμού με σκοπό να εξερευνήσει νέες περιοχές του χώρου αναζήτησης. Για κάθε άτομο, η συνάρτηση επεξεργάζεται τη λίστα των ζευγών του και, με μια πιθανότητα που καθορίζεται από το `mutationChance`, αλλάζει τυχαία το mode ενός ζεύγους. Μετά από κάθε μετάλλαξη, η λύση επαναπροωθείται χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `Propagate`, και ο μετρητής επαναλήψεων αυξάνεται.

Κεφάλαιο 4

Αποτελέσματα

4.1 Συγκρίσεις Αλγορίθμων

Ο HERA αξιολογείται μέσω ενός προσομοιωτή που έχει υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας δύο γλώσσες προγραμματισμού: Java και C#. Η αρχικοποίηση του συστήματος και η κατασκευή του γράφου πραγματοποιούνται σε Java, η οποία επιλέχθηκε λόγω της αποδοτικότητάς της στη διαχείριση σύνθετων δομών δεδομένων, όπως οι γράφοι, που αποτελούν τον πυρήνα της αρχιτεκτονικής του συστήματος.

Το δεύτερο μέρος του έργου, όπου εκτελούνται οι βασικοί αλγόριθμοι προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, έχει υλοποιηθεί σε C#, η οποία προσφέρει ανώτερη υπολογιστική απόδοση, καθιστώντας την ιδανική για το στάδιο της προσομοίωσης. Η χρήση δύο διαφορετικών γλωσσών αντανακλά μια στρατηγική απόφαση που εξισορροπεί την αποδοτικότητα και την ταχύτητα εκτέλεσης, διασφαλίζοντας την ομαλή και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος.

Στην προσομοίωση λαμβάνονται υπόψη πολλαπλά σενάρια, τα οποία διαφέρουν τόσο ως προς τον αριθμό των χρηστών που εξυπηρετούνται, όσο και ως προς τον αριθμό των SDMs που είναι τοποθετημένα στις επιφάνειες του χώρου. Συγκεκριμένα, εξετάζονται περιπτώσεις με 2, 4 και 8 χρήστες, καθώς και διαμορφώσεις με 8, 16, 32 και 64 πλακίδια, τα οποία κατανέμονται ομοιόμορφα στις πέντε εσωτερικές επιφάνειες ενός κλειστού χώρου (τέσσερις τοίχοι και οροφή).

Για κάθε συνδυασμό των παραπάνω παραμέτρων, δημιουργούνται 100 διαφορετικοί τυχαιοποιημένοι γράφοι εντός ενός χώρου διαστάσεων $15m \times 10m \times 5m$. Κάθε γράφος καθορίζει τυχαία τις θέσεις των SDMs πάνω στις επιφάνειες, καθώς και τις τοποθεσίες των χρηστών μέσα στον χώρο. Επιπλέον, κάθε SDM διαθέτει $M = 20$ ηλεκτρομαγνητικές (Η/Μ) συναρτήσεις, οι οποίες επίσης αρχικοποιούνται τυχαία. Ο αριθμός των ακτινών που παράγει ο πομπός, τίθεται ίσος με το αριθμό των χρηστών προς εξυπηρέτηση.

Η βελτιστοποίηση διαμορφώνεται με στόχο τη μεγιστοποίηση της ελάχιστης ισχύος και την ελαχιστοποίηση της μέγιστης RMS χρονικής διασποράς, υιοθετώντας την πολιτική Max-Min Fairness (MMF), η οποία δίνει έμφαση στη δίκαιη κατανομή των πόρων. Συγκεκριμένα, η προσέγγιση αυτή διασφαλίζει ότι ο χρήστης με τη χαμηλότερη απόδοση λαμβάνει τη μέγιστη δυνατή ενίσχυση, προάγοντας έτσι μια πιο ισορροπημένη και δίκαιη εξυπηρέτηση. Παράλληλα, τίθεται ως περιορισμός ότι η ελάχιστη ισχύς πρέπει να είναι θετική, ώστε να διασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος και η αξιόπιστη εξυπηρέτηση όλων των χρηστών.

Στην προσομοίωση πραγματοποιείται σύγκριση τριών αλγορίθμων: του HERA, του NSGA-II και του Random Search. Κάθε αλγόριθμος εκτελείται $N = 100$ φορές και τερματίζει όταν ολοκληρωθούν $R = 4500$ επαναλήψεις. Ως επανάληψη ορίζεται η κατασκευή μιας εφικτής λύσης, δηλαδή μιας λύσης που ικανοποιεί τους περιορισμούς ισχύος του προβλήματος. Η έξοδος κάθε εκτέλεσης ενός αλγορίθμου είναι ένα Παρέτο κυρίαρχο μέτωπο, το οποίο περιορίζεται στις 250 λύσεις με τη μεγαλύτερη απόσταση συνοστισμού. Από τα $N = 100$ runs, εφαρμόζεται ο αλγόριθμος Fast Non-Dominated Sorting στα 100 μέτωπα, παράγοντας τελικά ένα ενοποιημένο μέτωπο που περιέχει τις καλύτερες δυνατές λύσεις.

Η ποιότητα των παραγόμενων μετώπων αξιολογείται μέσω του στατιστικού Hypervolume (HV), το οπόιο, στην περίπτωση μετώπων δύο διαστάσεων, αντιστοιχεί στο εμβαδό της περιοχής που περικλείεται μεταξύ του Παρέτο μετώπου και ενός προκαθορισμένου σημείου αναφοράς. Το Hypervolume αποτελεί έναν ευρέως χρησιμοποιούμενο δείκτη για την αξιολόγηση αλγορίθμων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, καθώς αποτυπώνει τόσο την κατανομή όσο και την έκταση των λύσεων στον χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων.

Μαθηματικά, το Hypervolume σε δύο διαστάσεις μπορεί να εκφραστεί ως:

$$HV = \sum_{i=1}^N (r_1 - x_i) \cdot (r_2 - y_i)$$

όπου (x_i, y_i) είναι τα σημεία του Παρέτο μετώπου ταξινομημένα κατά αύξουσα τάξη στο πρώτο αντικειμενικό κριτήριο, (r_1, r_2) είναι το σημείο αναφοράς που ορίζεται αυστηρά χειρότερα από όλες τις λύσεις του μετώπου και N είναι το πλήθος των σημείων στο Παρέτο μέτωπο.

Για τους $K = 100$ γράφους και για κάθε αλγόριθμο υπολογίζεται η μέση τιμή στατιστικού HV με βάση την σχέση:

$$AvgHV_r = \frac{1}{K} \sum_{j=0}^{K-1} (HV(Front_{j,r})) \quad (4.1)$$

οπου $Front_{j,r}$ το τελικό κυρίαρχο μέτωπο για τον j γράφο και για τερματισμό του αλγορίθμου στην $r < R$ επανάληψη.

Παράμετρος	Τιμή
Διαστάσεις Χώρου	$15 \times 10 \times 5$
Ισχύς εκπομπής	0 dB ανα Λοβό
Κέρδος Tx	22 dB ανα Λοβό
Κέρδος SDM	42 dB
Συντελεστής απωλειών (α)	3
Συχνότητα	30 GHz
Αριθμός Χρηστών	{2, 4, 8}
Αριθμός Λοβών	Ένας ανα χρήστη
Αριθμός Tiles	{8, 16, 32, 64}
Ευαισθησία Δέκτη	-120dB
Μοντέλο Απωλειών	Γινόμενο Αποστάσεων (2.1)

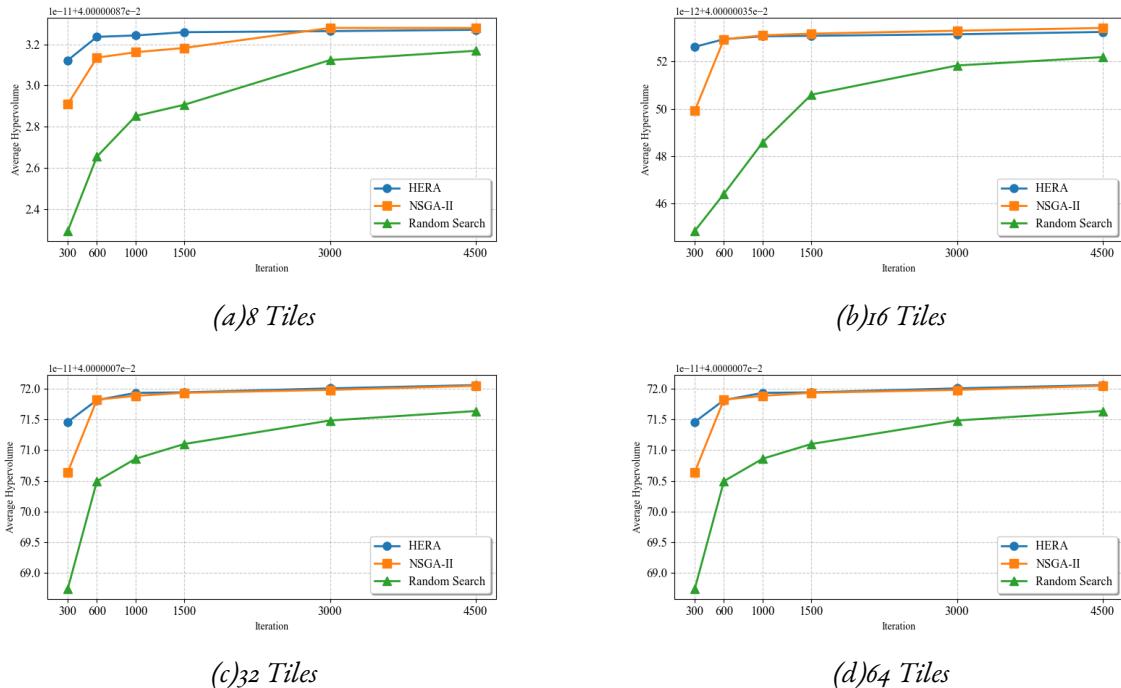
Πίνακας 4.1: Μεταβλητές Εισόδου Προσομοίωσης

Παράμετρος	Τιμή
Μέγεθος groups	30
Q	1
Εκκίνηση Φάσης Αξιοποίησης	1000 επαναλήψεις
Συχνότητα Φάσης Αξιοποίησης	ανά 300 επαναλήψεις
Αριθμός Τοπικών Αναζητήσεων	3

Πίνακας 4.2: Μεταβλητές Εισόδου HERA

Παράμετρος	Τιμή
Μέγεθος Πληθυσμού	30
Πιθανότητα μετάλλαξης	0.01
Πιθανότητα Διασταύρωσης	Δυναμική

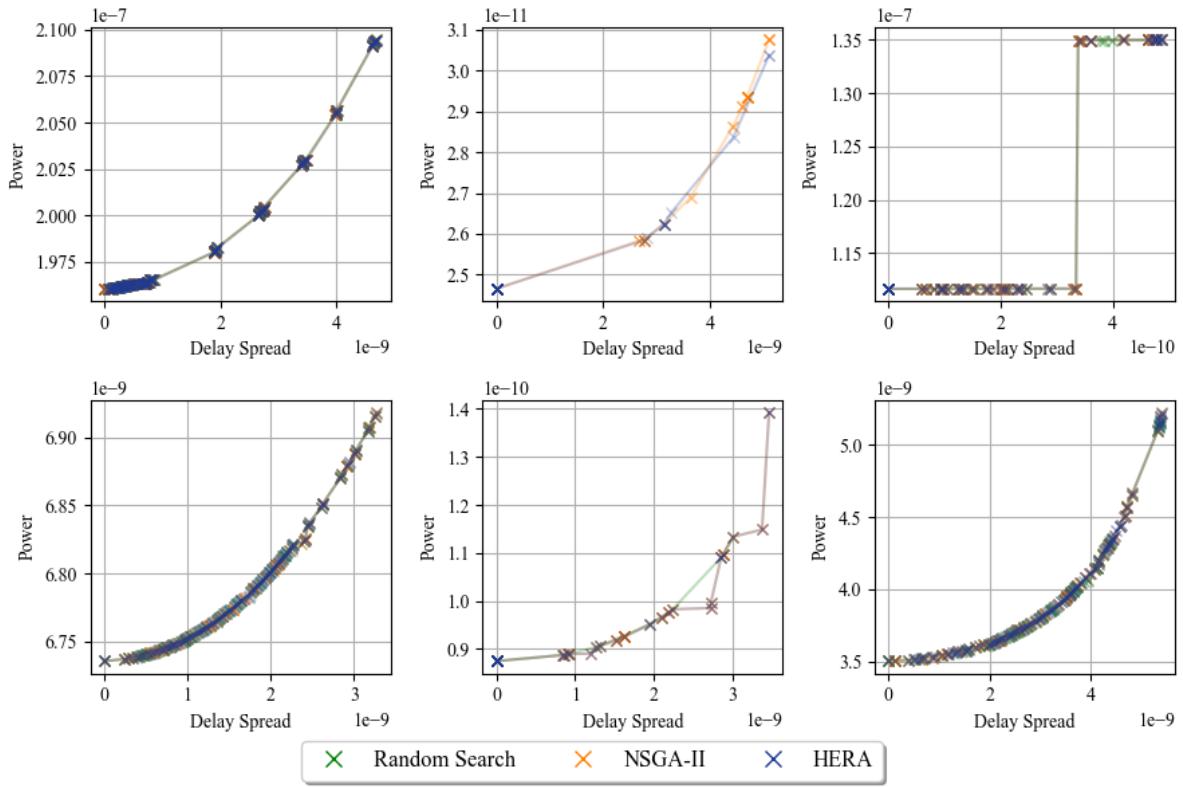
Πίνακας 4.3: Μεταβλητές Εισόδου NSGA-II



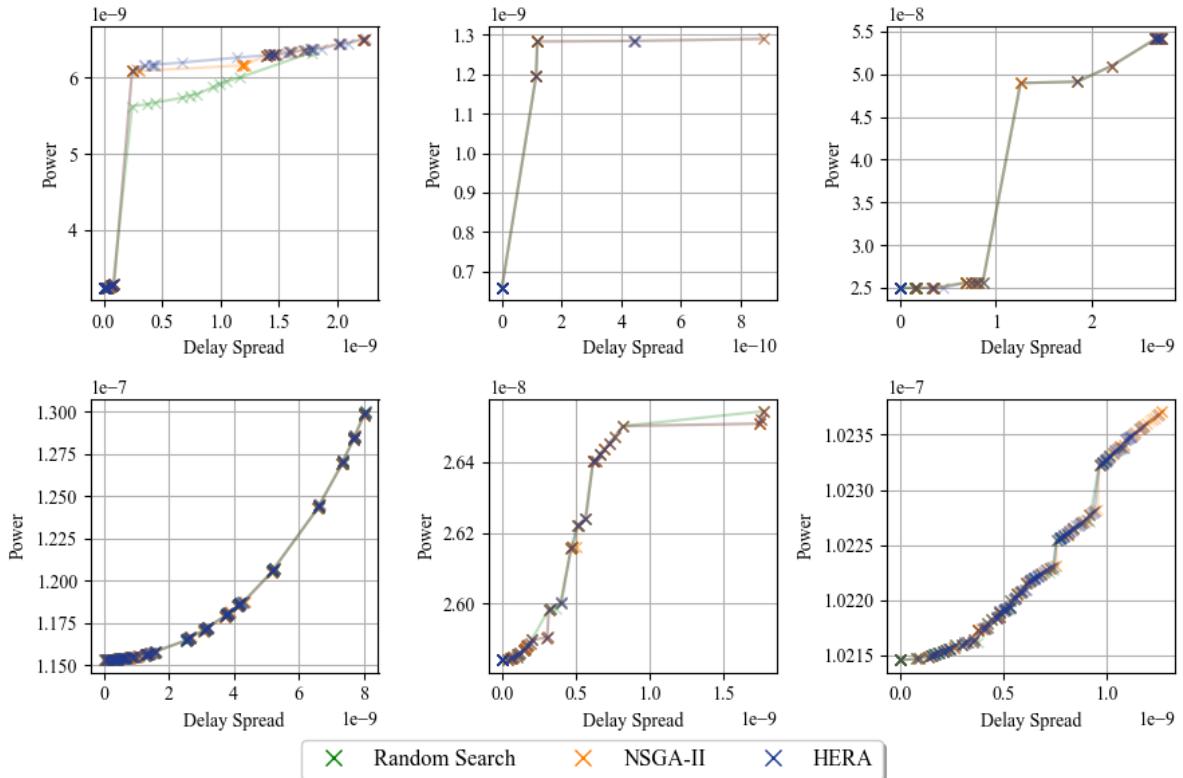
Σχήμα 4.1: Comparative performance between the proposed HERA, NSGA-II and random search in terms of achieved front hyperVolume for 2 Users.

4.1.1 2 Χρήστες

Στην περίπτωση των δύο χρηστών, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4.1, παρατηρούμε ότι ο HERA επιδεικνύει ταχύτερη σύγκλιση σε δλες τις περιπτώσεις. Η διαφορά αυτή αποτυπώνεται ξεκάθαρα στο Hypervolume κατά τις πρώτες 300 επαναλήψεις, όπου ο HERA υπερέχει σημαντικά έναντι των άλλων αλγορίθμων. Ωστόσο, σε μεγαλύτερους ορίζοντες επαναλήψεων, ο NSGA-II καταφέρνει να εντοπίσει ποιοτικότερα Παρέτο μέτωπα. Η ανωτερότητα αυτή οφείλεται στην αυξημένη ικανότητα εξερεύνησης που προσφέρει ο μηχανισμός της μετάλλαξης, επιτρέποντας στον αλγόριθμο να αποφεύγει τοπικά βέλτιστα σημεία και να αναζητά καλύτερες λύσεις. Επιπλέον, τα αποτελέσματα παραμένουν σταθερά και δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις για διαφορετικό αριθμό πλακιδίων, υποδηλώνοντας ότι ο αριθμός των SDMs δεν επηρεάζει καθοριστικά τη σύγκριση των αλγορίθμων. Στα σχήματα 4.2 και 4.3 φαίνονται τα μέτωπα των αλγορίθμων για διάφορους γράφους. Καθώς το πρόβλημα των 2 χρηστών είναι συγκριτικά ευκολότερο από τα υπόλοιπα, δεν παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα μέτωπα παράγει ο κάθε αλγόριθμος.

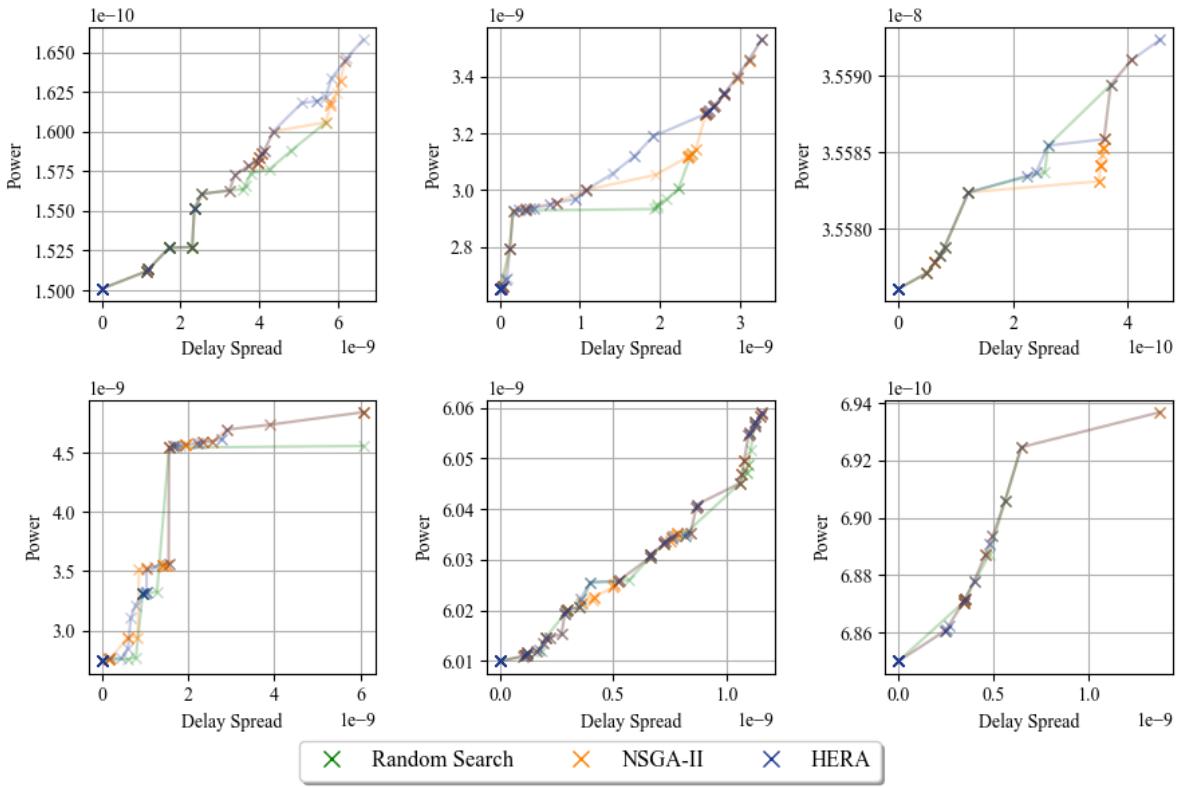


(a) 8 Tiles

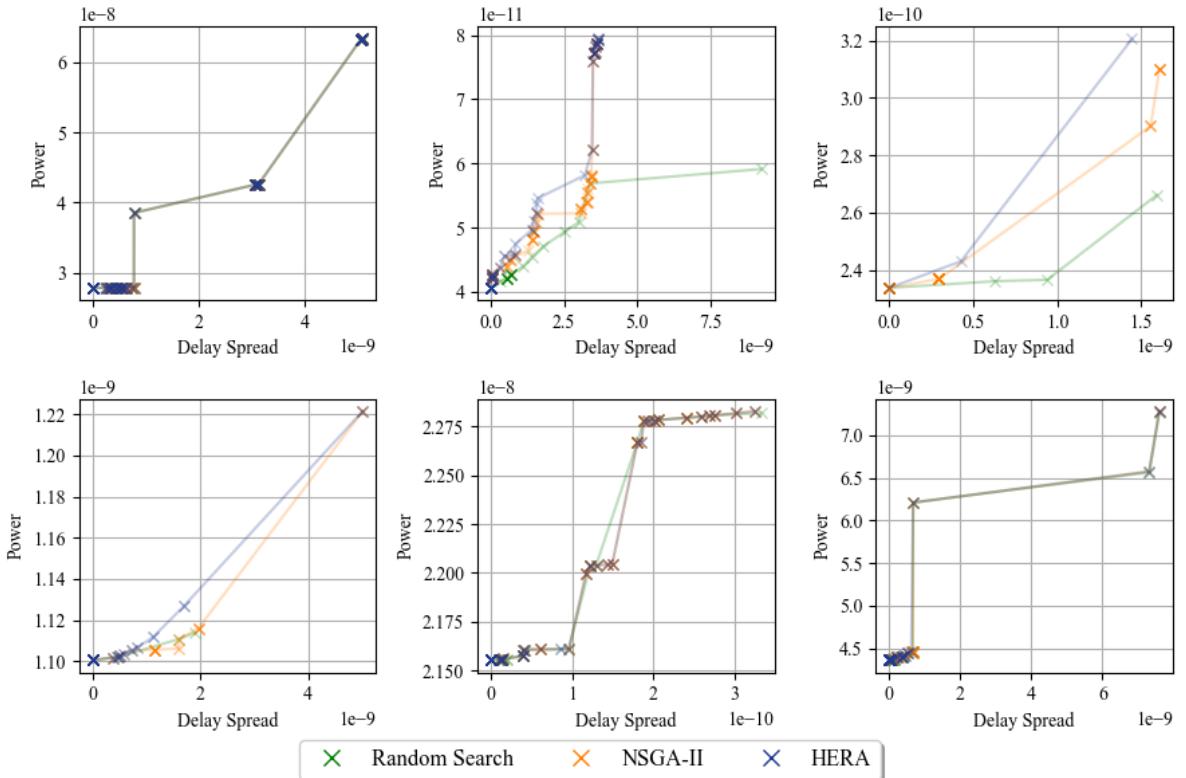


(b) 16 Tiles

Σχήμα 4.2: Pareto front visualization for various graphs of 2 Users after 1000 repetitions.

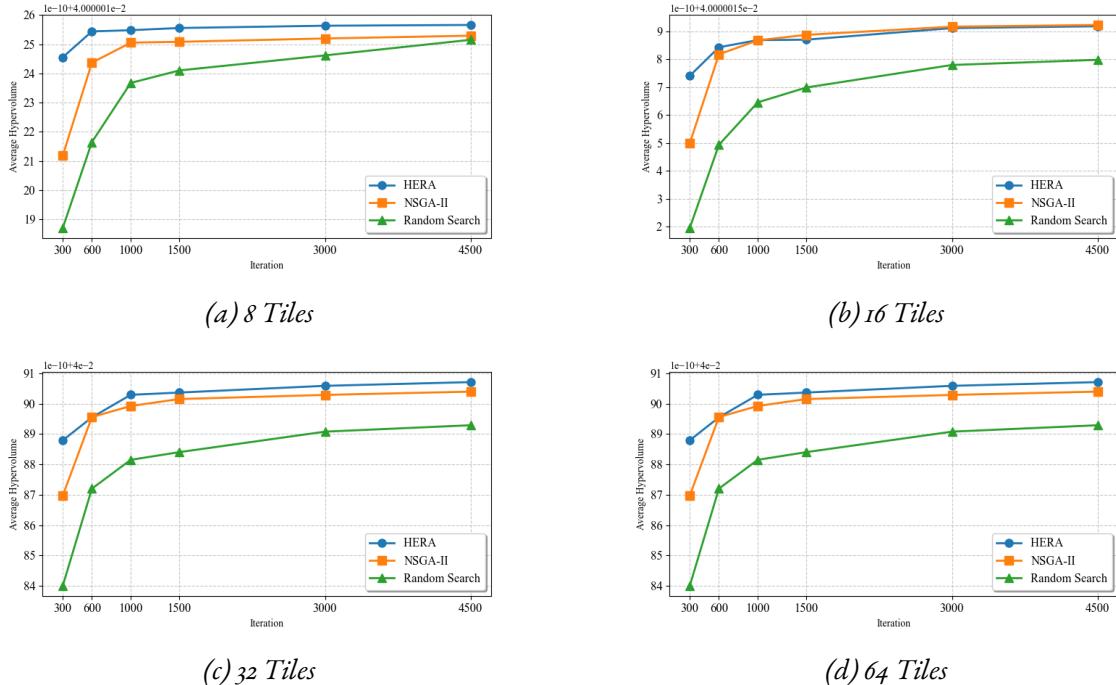


(c) 32 Tiles



(d) 64 Tiles

Σχήμα 4.3: Pareto front visualization for various graphs of 2 Users after 1000 repetitions.

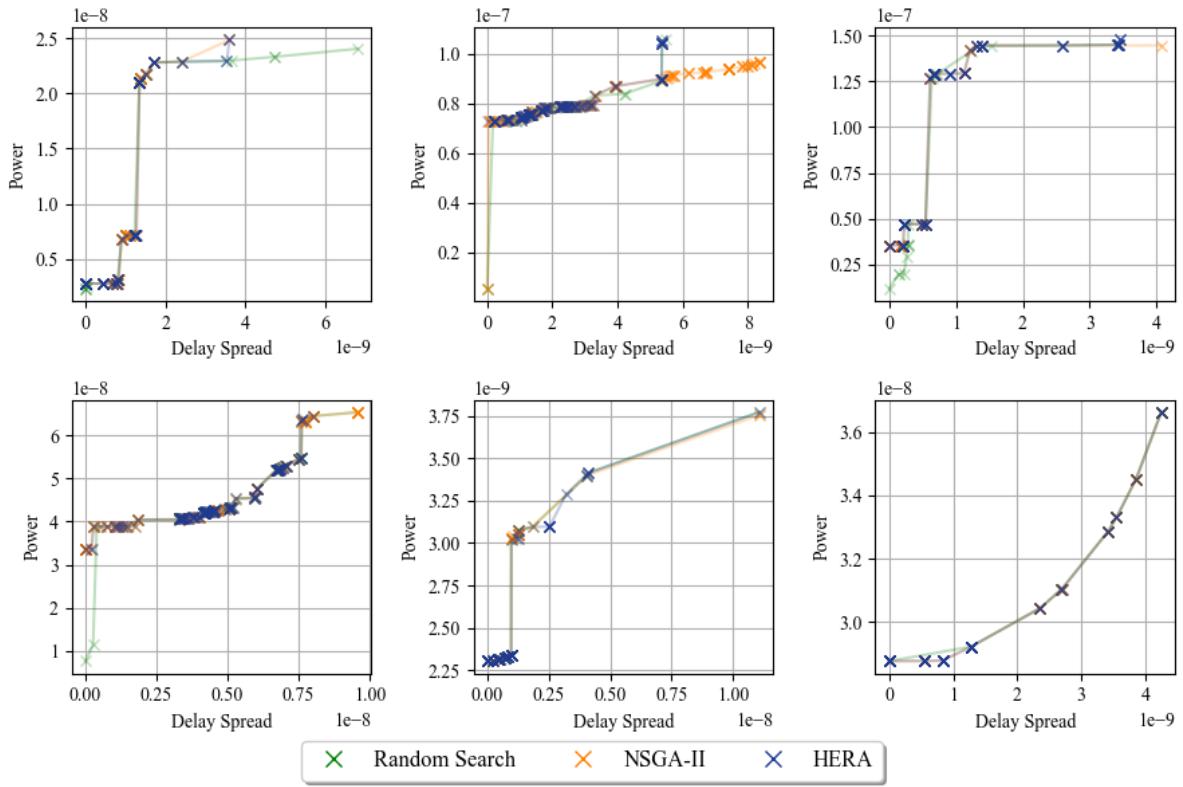


Σχήμα 4.4: Comparative performance between the proposed HERA, NSGA-II and random search in terms of achieved front hyperVolume for 4 Users.

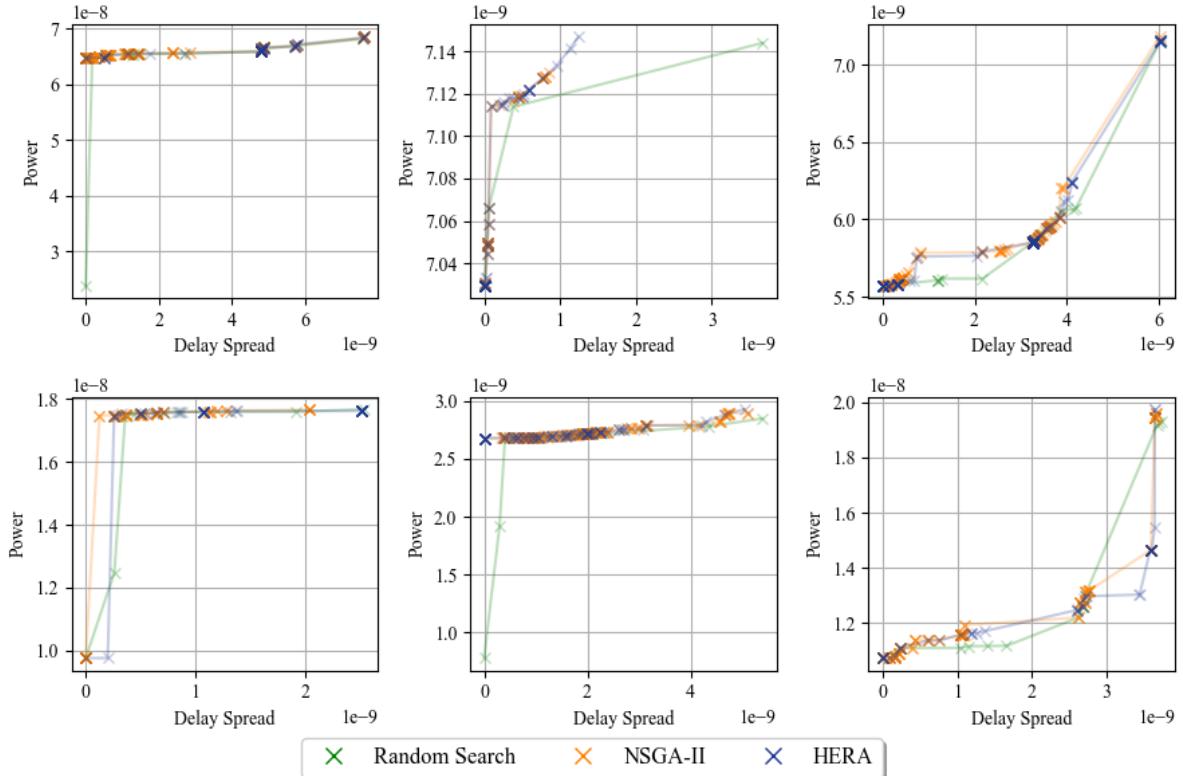
4.1.2 4 Χρήστες

Για τέσσερις χρήστες (Σχήμα 4.4), παρατηρούμε ότι ο HERA συνεχίζει να διατηρεί την ταχύτερη σύγκλισή του. Σε αντίθεση με την περίπτωση των δύο χρηστών, ο HERA καταφέρνει να υπερισχύσει του NSGA-II σε ποιότητα Παρέτο μετώπου για μεγάλο αριθμό επαναλήψεων στις περιπτώσεις των 8, 32 και 64 πλακιδίων. Για την περίπτωση των 16 πλακιδίων, ο NSGA-II επιτυγχάνει ελαφρώς καλύτερη απόδοση, αν και η διαφορά μεταξύ των δύο αλγορίθμων παραμένει μικρή.

Αναλύοντας τα Παρέτο μέτωπα που παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.5 και 4.6, διαπιστώνουμε ότι ο NSGA-II εμφανίζει έντονη αστάθεια στην απόδοσή του. Συγκεκριμένα, υπάρχουν περιπτώσεις όπου ο αλγόριθμος καταφέρνει να παράγει εξαιρετικά ποιοτικά μέτωπα, ενώ σε άλλες παρουσιάζει σημαντική υποβάθμιση της απόδοσής του. Αυτές οι διακυμάνσεις γίνονται αιθητές στο σχήμα 4.6 πιθανώς και οφείλονται στην τυχαιότητα της διαδικασίας μετάλλαξης, η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις επιτρέπει την ανακάλυψη ιδιαίτερα καλών λύσεων, ενώ σε άλλες εμποδίζει τη σταθερή βελτίωση του μετώπου.

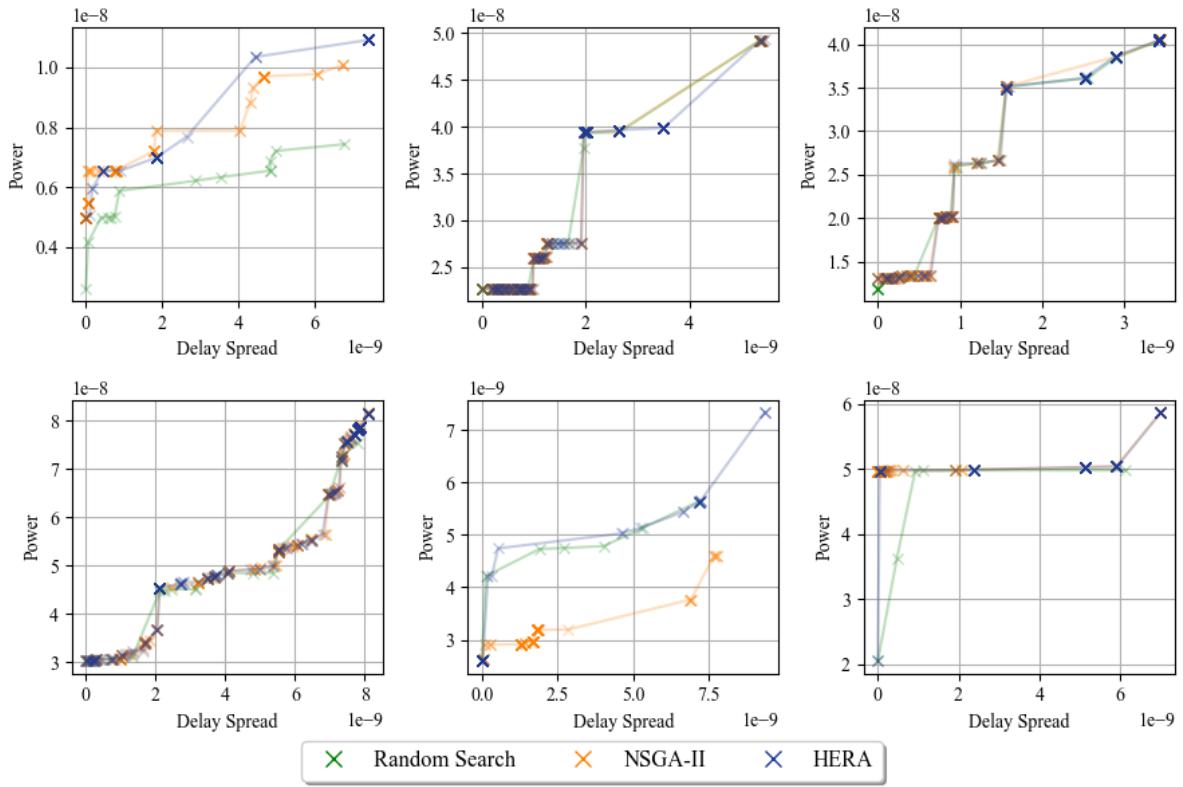


(a) 8 Tiles

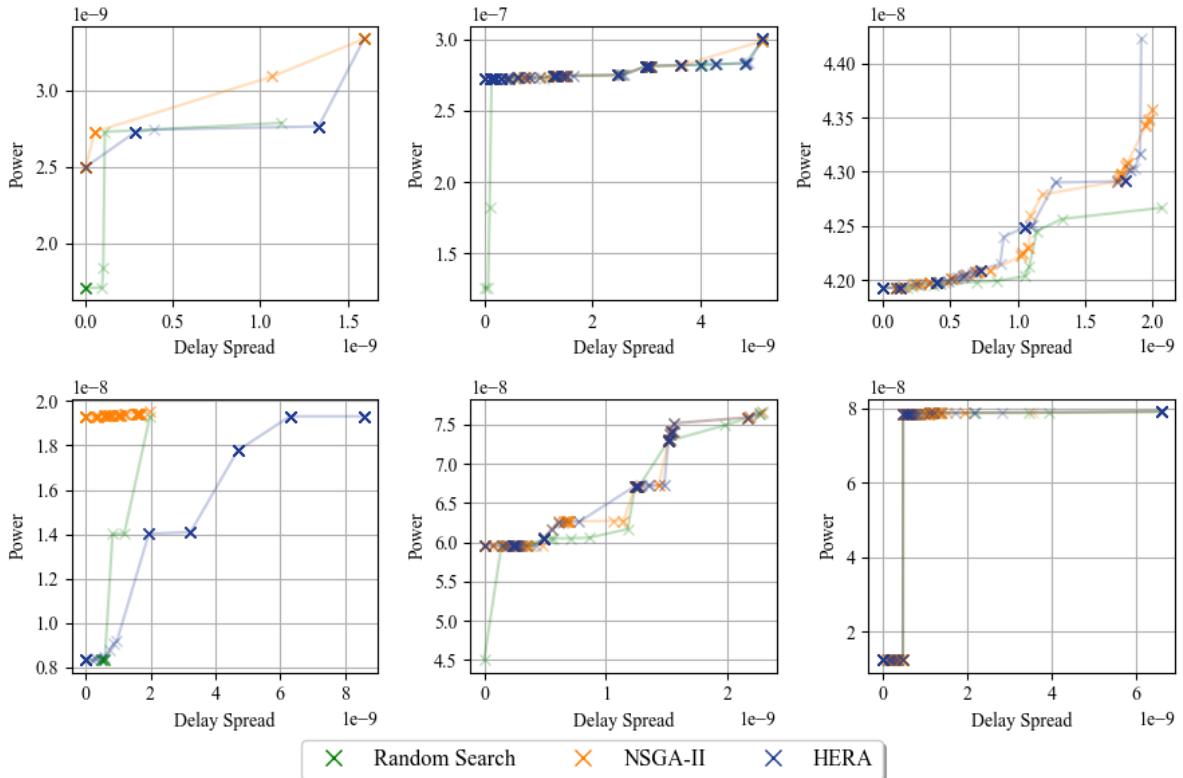


(b) 16 Tiles

Σχήμα 4.5: Pareto front visualization for various graphs of 4 Users after 1500 repetitions.

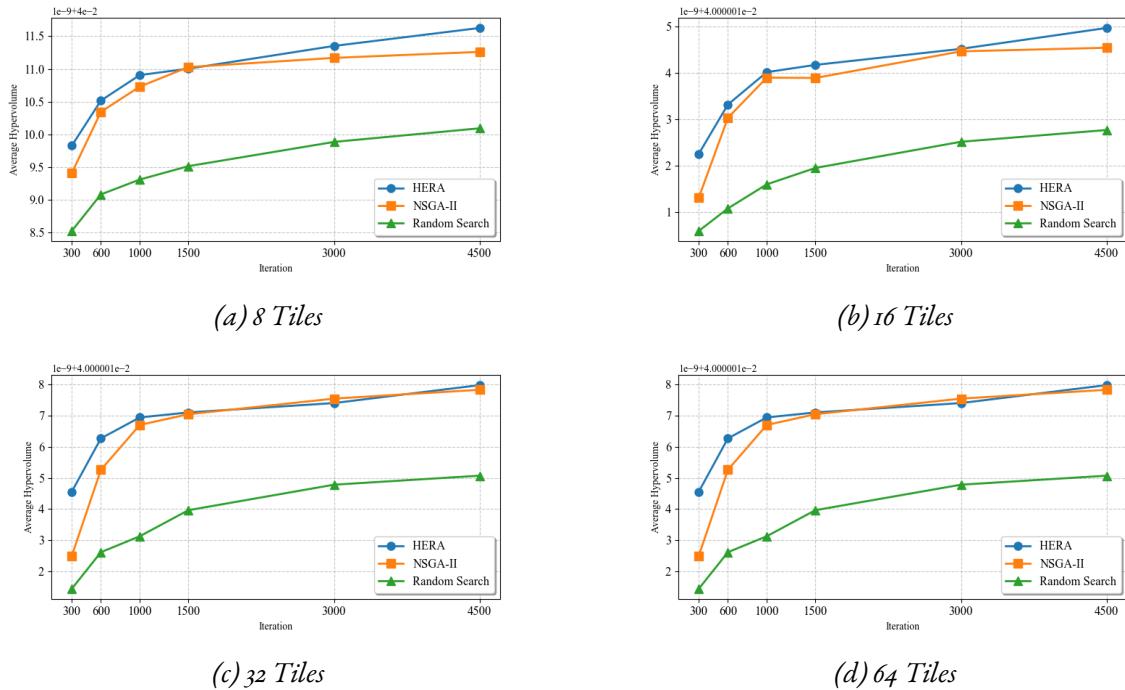


(c)32 Tiles



(d)64 Tiles

Σχήμα 4.6: Pareto front visualization for various graphs of 4 Users after 1500 repetitions.

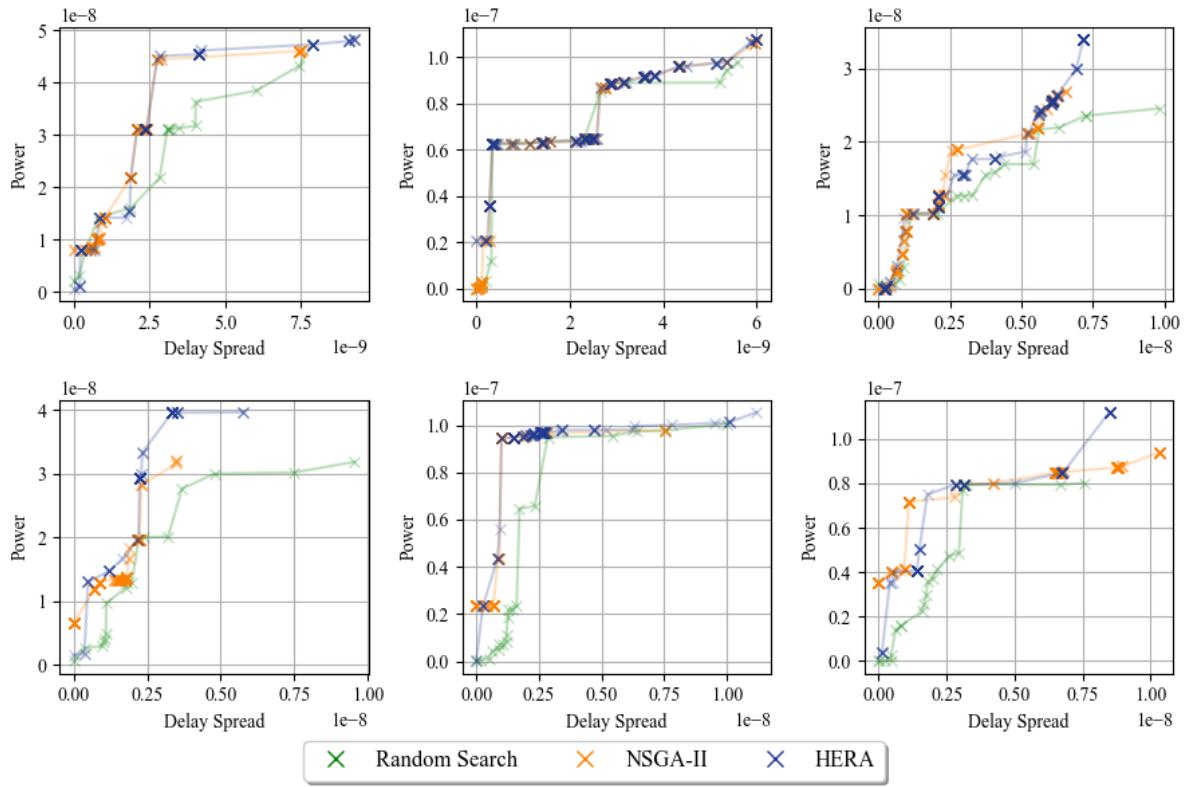


Σχήμα 4.7: Comparative performance between the proposed HERA, NSGA-II and random search in terms of achieved front hyperVolume for 8 Users.

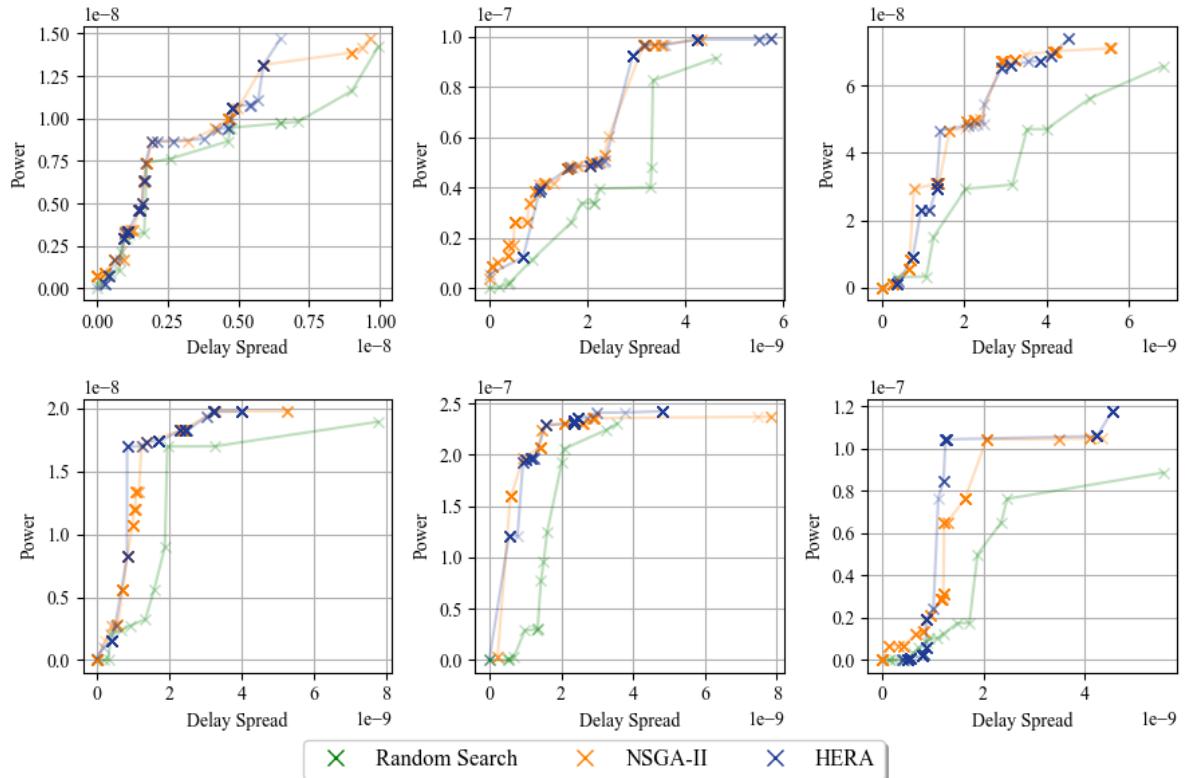
4.1.3 8 Χρήστες

Τέλος, για την περίπτωση των οκτώ χρηστών, η οποία αποτελεί το δυσκολότερο πρόβλημα βελτιστοποίησης, ο HERA διατηρεί την υπεροχή του όσον αφορά το Hypervolume. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των Σχημάτων 4.8 και 4.9. Από την απεικόνιση των Παρέτο μετώπων, παρατηρούμε ότι η υπεροχή του HERA, όπως αυτή αποτυπώνεται στο Σχήμα 4.7, δεν είναι τόσο εμφανής ως προς την ποιότητα των λύσεων.

Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μικρή διαφορά στο Hypervolume πιθανότατα οφείλεται περισσότερο στη μεγαλύτερη ποικιλομορφία των λύσεων που παράγει ο HERA, παρά σε σαφώς ανώτερη ποιότητα των βέλτιστων λύσεων. Με άλλα λόγια, ο HERA φαίνεται να διατηρεί ένα ευρύτερο και πιο ισορροπημένο σύνολο λύσεων, γεγονός που συμβάλλει στην αύξηση της τιμής του Hypervolume, χωρίς ωστόσο να συνεπάγεται απαραίτητα ότι κάθε επιμέρους λύση είναι αυστηρά καλύτερη από τις αντίστοιχες του NSGA-II.

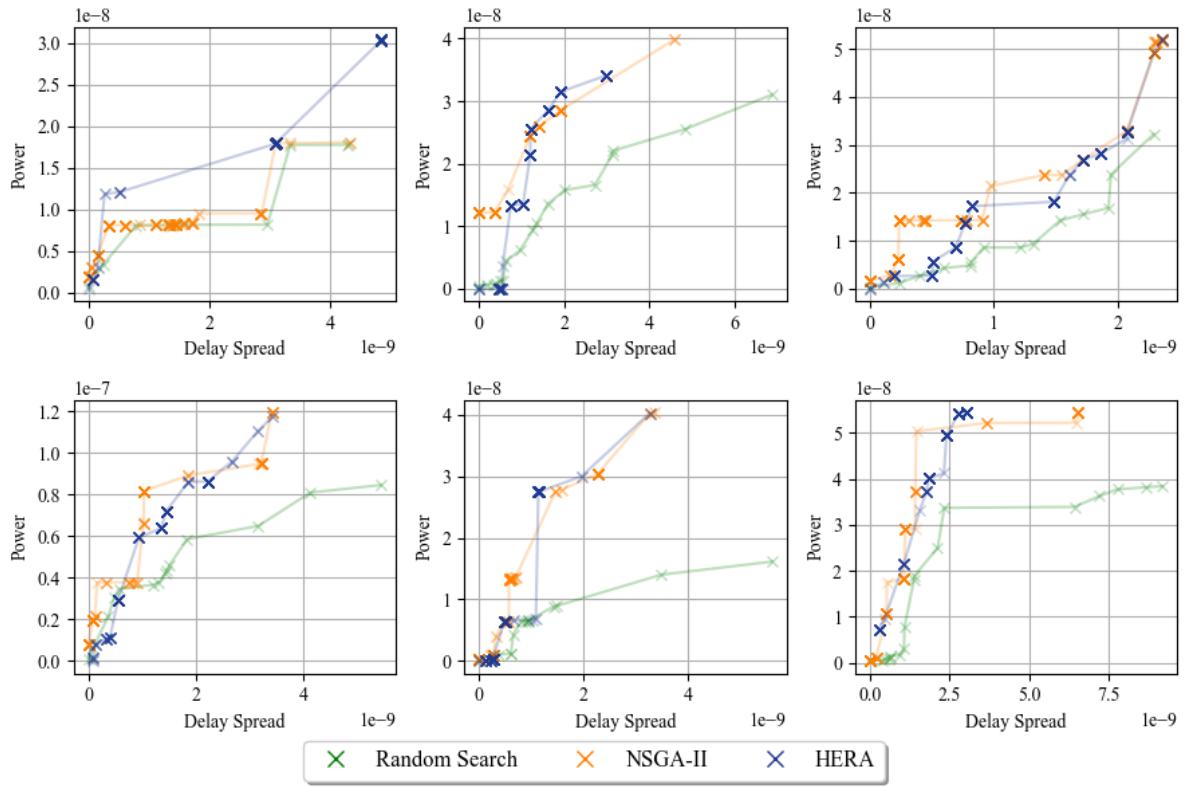


(a) 8 Tiles

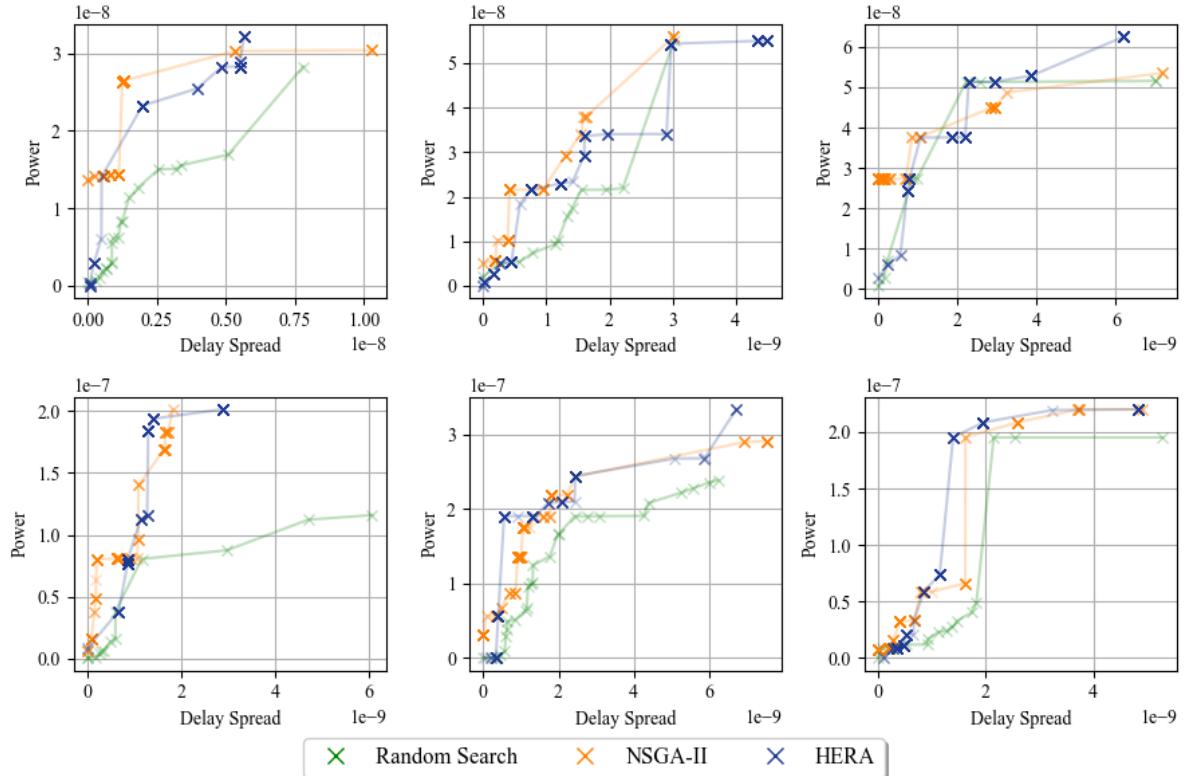


(b) 16 Tiles

Σχήμα 4.8: Pareto front visualization for various graphs of 8 Users after 4500 repetitions.



(c)32 Tiles



(d)64 Tiles

Σχήμα 4.9: Pareto front visualization for various graphs of 8 Users after 4500 repetitions.

Συνοψίζοντας, η σύγκριση των αλγορίθμων δείχνει ότι ο HERA επιτυγχάνει ταχύτερη σύγκλιση σε όλες τις περιπτώσεις, με τον NSGA-II να υπερέχει μακροπρόθεσμα στην ποιότητα των Παρέτο μετώπων λόγω της ικανότητάς του να αποφεύγει τοπικά ελάχιστα μέσω της μετάλλαξης. Για τέσσερις χρήστες, ο HERA υπερέχει στις περισσότερες περιπτώσεις, ενώ ο NSGA-II εμφανίζει αστάθεια στην απόδοσή του. Στην πιο απαιτητική περίπτωση των οκτώ χρηστών, η υπεροχή του HERA στο Hypervolume φαίνεται να οφείλεται κυρίως στη μεγαλύτερη ποικιλομορφία των λύσεων και όχι σε αισθητά ανώτερη ποιότητα. Και οι δύο αλγόριθμοι δείχουν σημαντική υπεροχή έναντι της τυχαίας αναζήτησης, ειδικότερα όσο ο αριθμός των χρηστών αυξάνεται.

4.2 Επίδραση Παραμέτρων στην ποιότητα του σήματος

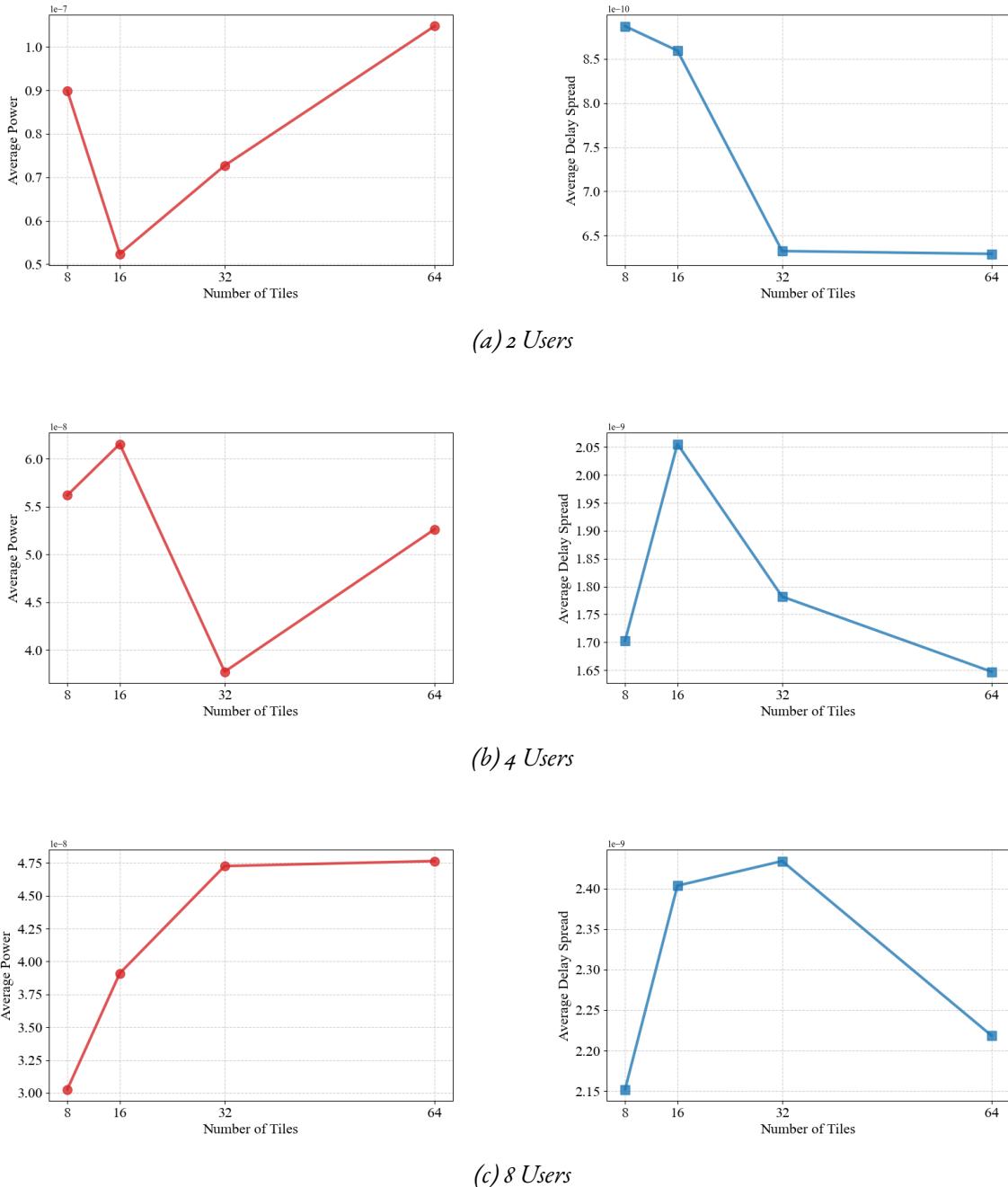
Για το συγκεκριμένο πείραμα, εξετάζουμε τα Παρέτο μέτωπα που παρήγαγε ο HERA έπειτα από $R = 4500$ επαναλήψεις και για $N = 100$ ανεξάρτητα runs. Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τη μέση τιμή της RMS χρονικής διασποράς καθυστέρησης και της ισχύος, εξετάζοντας διαφορετικούς αριθμούς SDMs. Η μέση τιμή υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τους $K = 100$ τυχαιοποιημένους γράφους, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στην Υποενότητα 4.1 για τα τρία πιθανά σενάρια αριθμού χρηστών.

$$AvgPower = \frac{1}{K} \sum_{j=0}^{K-1} (\text{AvgPower}(Front_j)) \quad (4.2)$$

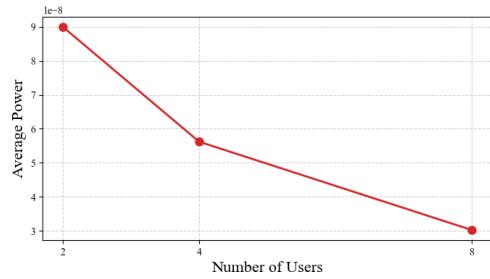
$$AvgDelaySpread = \frac{1}{K} \sum_{j=0}^{K-1} (\text{AvgDelaySpread}(Front_j)) \quad (4.3)$$

Από τα Σχήματα (a) και (c) παρατηρούμε ότι, στις περιπτώσεις των 2 και 8 χρηστών, η ισχύς βελτιώνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός των SDMs. Η βελτίωση αυτή είναι ιδιαίτερα έντονη στην περίπτωση των 64 πλακιδίων, όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη αύξηση στην ισχύ. Παρόμοιο μοτίβο εντοπίζεται και στο Delay Spread (σχήματα (a) και (b)), το οποίο τείνει να μειώνεται με την αύξηση των SDMs, οδηγώντας σε ένα πιο σταθερό και ποιοτικό σήμα. Αναμφίβολα, η περίπτωση των 64 SDMs προσφέρει την καλύτερη απόδοση τόσο σε όρους ισχύος όσο και σε όρους Delay Spread.

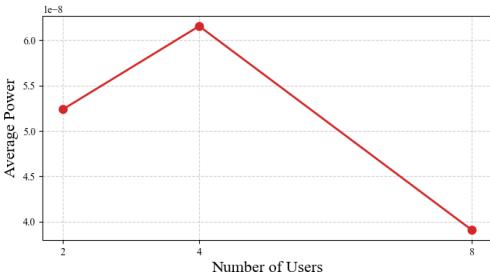
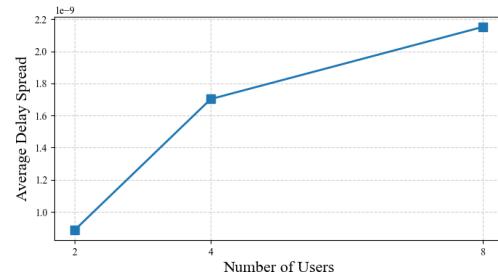
Εκτελώντας την ίδια διαδικάσια κρατώντας όμως σταθερό τον αριθμό των SDMs και μεταβάλλοντας τον αριθμό των χρηστών, εξάγονται τα σχήματα 4.18. Εδώ η πτώση της ποιότητας του σήματος στον πιο αδύνατο χρήστη καθώς ο αριθμός των χρηστών αυξάνεται είναι ξεκάθαρη για όλες της πιθανές διαμορφώσεις SDM.



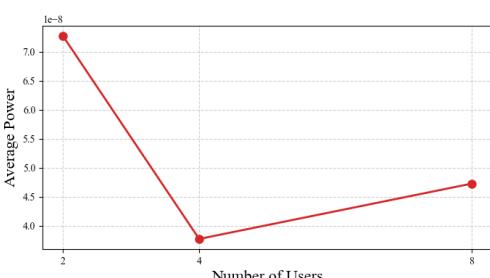
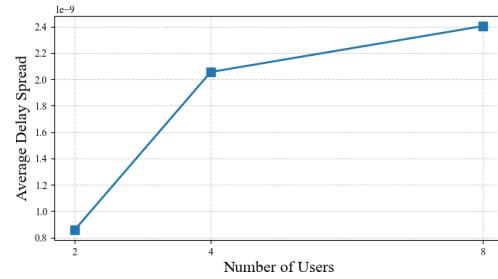
Σχήμα 4.13: Impact of the number of users on signal quality for different configurations



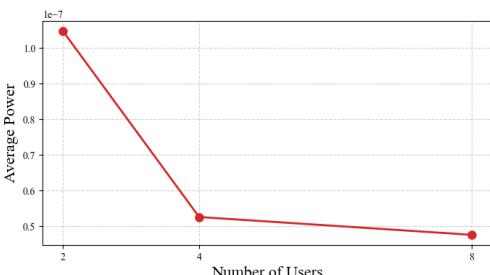
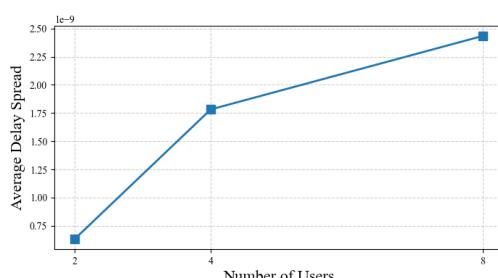
(a) 8 Tiles



(b) 16 Tiles



(c) 32 Tiles



(d) 64 Tiles

Σχήμα 4.18: Impact of number of Users on signal quality for different Tile configurations

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα και Μελλοντικές Διερευνήσεις

Στην παρούσα μελέτη, εξετάσαμε τη συμπεριφορά των αλγορίθμων HERA και NSGA-II σε προβλήματα βελτιστοποίησης πολυκριτηριακών στόχων για διαφορετικούς αριθμούς χρηστών και SDMs. Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν, μπορούμε να εξαγάγουμε τα εξής βασικά συμπεράσματα:

5.1 Συμπεράσματα

- Ταχύτητα σύγκλισης και ποιότητα λύσεων:** Ο HERA επιδεικνύει ταχύτερη σύγκλιση σε όλες τις περιπτώσεις, όπως καταγράφεται από το Hypervolume στις πρώτες επαναλήψεις. Ο NSGA-II, λόγω της αυξημένης ικανότητας εξερεύνησης που προσφέρει η μετάλλαξη, καταφέρνει να εντοπίσει ποιοτικότερα Παρέτο μέτωπα σε μεγάλα χρονικά διαστήματα για μεγάλο αριθμό χρηστών. Για δύο χρήστες, η διαφορά μεταξύ των αλγορίθμων είναι σχετικά μικρή, ενώ για την περίπτωση των τεσσάρων χρηστών ο HERA δείχνει υπεροχή από κάθε άποψη.
- Σταθερότητα και ποικιλομορφία λύσεων:** Ο NSGA-II παρουσιάζει μεγαλύτερη αστάθεια, καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις καταφέρνει να βρει εξαιρετικά καλές λύσεις, ενώ σε άλλες η ποιότητά τους είναι σημαντικά χαμηλότερη. Η υπεροχή του HERA στο Hypervolume για μεγάλο αριθμό χρηστών πιθανότατα οφείλεται στη διατήρηση μιας μεγαλύτερης ποικιλομορφίας λύσεων και στην αυξημένη σταθερότητα του, και όχι σε αυστηρά καλύτερη ποιότητα μετώπου.
- Συμπεριφορά σε διαφορετικούς αριθμούς SDMs:** Η αύξηση των SDMs συνεισφέρει σημαντικά στη βελτίωση τόσο της ισχύος του σήματος όσο και της διασποράς καθυστέρησης (Delay Spread). Στην περίπτωση των 64 SDMs παρατηρείται η μεγαλύτερη βελτίωση, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αύξηση των SDMs προσφέρει πιο ποιοτικά σήματα.

5.2 Μελλοντικές Διερευνήσεις

Για την περαιτέρω βελτίωση των αποτελεσμάτων και την ακριβέστερη αποτίμηση της απόδοσης των αλγορίθμων, προτείνονται οι ακόλουθες κατευθύνσεις:

- **Αύξηση του αριθμού των τυχαιοποιημένων γράφων:** Η χρήση περισσότερων γράφων θα μπορούσε να μειώσει την επίδραση της στοχαστικότητας και να προσφέρει πιο αξιόπιστα στατιστικά συμπεράσματα.
- **Βελτίωση της ακρίβειας της προσομοίωσης:** Η εφαρμογή πιο λεπτομερών προσομοιώσεων, λαμβάνοντας υπόψη επιπλέον παράγοντες όπως παρεμβολές και διαφορετικά προφίλ καναλιών, περιορισμούς των SDMs και ακριβέστερη μοντελοποίηση του χώρου θα μπορούσε να δώσει πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα.
- **Δοκιμή διαφορετικών μεθόδων αναζήτησης:** Η δοκιμή εναλλακτικών στρατηγικών αναζήτησης, όπως και ο διαφορετικός χειρισμός των μη εφικτών λύσεων ενδεχομένως να οδηγήσουν στην εύρεση ποιοτικότερων μετώπων.
- **Εφαρμογή σε μεγαλύτερα δίκτυα:** Η μελέτη της απόδοσης των αλγορίθμων σε ακόμα μεγαλύτερα και πιο πολύπλοκα προβλήματα, π.χ. με περισσότερους χρήστες ή διαφορετικές διατάξεις κελιών, θα μπορούσε να δώσει χρήσιμα συμπεράσματα για την κλιμάκωση των προσεγγίσεων.

Συνοψίζοντας, η μελέτη μας ανέδειξε την ανωτερότητα του HERA σε όρους ταχύτητας σύγκλισης, σταθερότητας και ποικιλομορφίας, ενώ ο NSGA-II απέδειξε τη χρησιμότητά του στην εξεύρεση βελτιστων λύσεων σε μεγάλο αριθμό επαναλήψεων. Μελλοντικές βελτιώσεις στη μεθοδολογία θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ακόμα πιο αποδοτικούς αλγορίθμους για τη βελτιστοποίηση δικτύων πολλαπλών SDMs και πολλαπλών χρηστών.

Βιβλιογραφία

- [1] Sergi Abadal, Tie-Jun Cui, Tony Low, and Julius Georgiou. Programmable metamaterials for software-defined electromagnetic control: Circuits, systems, and architectures. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 10(1):6–19, 2020.
- [2] Christos Antoniadis, Kostas Katsalis, Dimitrios Tyrovolas, Sotiris A Tegos, Sotiris Ioannidis, Panagiotis D Diamantoulakis, George K Karagiannidis, and Christos Liaskos. Hera: A novel heuristic resource allocator for multi-sdm multi-user settings. In *2024 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, pages 141–146. IEEE, 2024.
- [3] Emil Björnson, Özgecan Özdogan, and Erik G Larsson. Intelligent reflecting surface versus decode-and-forward: How large surfaces are needed to beat relaying? *IEEE wireless communications letters*, 9(2):244–248, 2019.
- [4] Hou-Tong Chen, Antoinette J Taylor, and Nanfang Yu. A review of metasurfaces: physics and applications. *Reports on progress in physics*, 79(7):076401, 2016.
- [5] Tie Jun Cui, Mei Qing Qi, Xiang Wan, Jie Zhao, and Qiang Cheng. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. *Light: science & applications*, 3(10):e218–e218, 2014.
- [6] Kalyanmoy Deb, Amrit Pratap, Sameer Agarwal, and TAMT Meyarivan. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2):182–197, 2002.
- [7] Philipp Del Hougne, Mathias Fink, and Geoffroy Lerosey. Optimally diverse communication channels in disordered environments with tuned randomness. *Nature Electronics*, 2(1):36–41, 2019.
- [8] Marco Di Renzo, Konstantinos Ntontin, Jian Song, Fadil H Danufane, Xuewen Qian, Fotis Lazarakis, Julien De Rosny, Dinh-Thuy Phan-Huy, Osvaldo Simeone, Rui Zhang, et al. Reconfigurable intelligent surfaces vs. relaying: Differences, similarities, and performance comparison. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 1:798–807, 2020.

- [9] Di Sha Dong, Jing Yang, Qiang Cheng, Jie Zhao, Li Hua Gao, Shao Jie Ma, Shuo Liu, Hai Bin Chen, Qiong He, Wei Wei Liu, et al. Terahertz broadband low-reflection metasurface by controlling phase distributions. *Advanced Optical Materials*, 3(10):1405–1410, 2015.
- [10] 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. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 6(3):990–1002, 2020.
- [11] Xi Gao, Wan Li Yang, Hui Feng Ma, Qiang Cheng, Xin Hua Yu, and Tie Jun Cui. A reconfigurable broadband polarization converter based on an active metasurface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(11):6086–6095, 2018.
- [12] Qiong He, Shulin Sun, and Lei Zhou. Tunable/reconfigurable metasurfaces: physics and applications. *Research*, 2019.
- [13] Chongwen Huang, Sha Hu, George C Alexandopoulos, Alessio Zappone, Chau Yuen, Rui Zhang, Marco Di Renzo, and Merouane Debbah. Holographic mimo surfaces for 6g wireless networks: Opportunities, challenges, and trends. *IEEE wireless communications*, 27(5):118–125, 2020.
- [14] Sean Victor Hum and Julien Perruisseau-Carrier. Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: A review. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 62(1):183–198, 2013.
- [15] Nadège Kaina, Matthieu Dupré, Geoffroy Lerosey, and Mathias Fink. Shaping complex microwave fields in reverberating media with binary tunable metasurfaces. *Scientific reports*, 4(1):6693, 2014.
- [16] Lanju Liang, Meiqing Qi, Jing Yang, Xiaopeng Shen, Jiquan Zhai, Weizong Xu, Biaobing Jin, Weiwei Liu, Yijun Feng, Caihong Zhang, et al. Anomalous terahertz reflection and scattering by flexible and conformal coding metamaterials. *Advanced optical materials*, 3(10):1374–1380, 2015.
- [17] Christos Liaskos, Lefteris Mamatas, Arash Pourdamghani, Ageliki Tsioliaridou, Sotiris Ioannidis, Andreas Pitsillides, Stefan Schmid, and Ian F. Akyildiz. Software-defined reconfigurable intelligent surfaces: From theory to end-to-end implementation. *Proceedings of the IEEE*, 110(9):1466–1493, 2022.
- [18] Christos Liaskos, Shuai Nie, Ageliki Tsioliaridou, Andreas Pitsillides, Sotiris Ioannidis, and Ian Akyildiz. A new wireless communication paradigm through software-controlled metasurfaces. *IEEE communications magazine*, 56(9):162–169, 2018.

- [19] Christos Liaskos, Shuai Nie, Ageliki Tsioliariidou, Andreas Pitsillides, Sotiris Ioannidis, and Ian Akyildiz. Realizing wireless communication through software-defined hypersurface environments. In *2018 IEEE 19th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks"(WoWMoM)*, pages 14–15. IEEE, 2018.
- [20] Yuanwei Liu, Xiao Liu, Xidong Mu, Tianwei Hou, Jiaqi Xu, Marco Di Renzo, and Naofal Al-Dhahir. Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities. *IEEE communications surveys & tutorials*, 23(3):1546–1577, 2021.
- [21] Qian Ma, Lei Chen, Hong Bo Jing, Qiao Ru Hong, Hao Yang Cui, Yi Liu, Lianlin Li, and TieJun Cui. Controllable and programmable nonreciprocity based on detachable digital coding metasurface. *Advanced Optical Materials*, 7(24):1901285, 2019.
- [22] Nemanja Stefan Perović, Marco Di Renzo, and Mark F Flanagan. Channel capacity optimization using reconfigurable intelligent surfaces in indoor mmwave environments. In *ICC 2020-2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–7. IEEE, 2020.
- [23] Sivarama Prasad Tera, Ravikumar Chinthaginjala, Giovanni Pau, and Tae Hoon Kim. Toward 6g: An overview of the next generation of intelligent network connectivity. *IEEE Access*, 13:925–961, 2025.
- [24] Tommi E Rimpiläinen and Riku Jäntti. Multiple scattering model for beam synthesis with reconfigurable intelligent surfaces. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 71(6):4990–5000, 2023.
- [25] Michele Segata, Paolo Casari, Marios Lestas, Alexandros Papadopoulos, Dimitrios Tyrovolas, Taqwa Saeed, George Karagiannidis, and Christos Liaskos. Cooperis: A framework for the simulation of reconfigurable intelligent surfaces in cooperative driving environments. *Computer Networks*, 248:110443, 2024.
- [26] Stefan Voß, Silvano Martello, Ibrahim H Osman, and Catherine Roucairol. Meta-heuristics: Advances and trends in local search paradigms for optimization. 2012.
- [27] Xiang Wan, Qian Zhang, Tian Yi Chen, Lei Zhang, Wei Xu, He Huang, Chao Kun Xiao, Qiang Xiao, and Tie Jun Cui. Multichannel direct transmissions of near-field information. *Light: science & applications*, 8(1):60, 2019.
- [28] Qingqing Wu and Rui Zhang. Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network. *IEEE communications magazine*, 58(1):106–112, 2019.

- [29] Rui Yuan Wu, Lei Zhang, Lei Bao, Liang Wei Wu, Qian Ma, Guo Dong Bai, Hao Tian Wu, and Tie Jun Cui. Digital metasurface with phase code and reflection–transmission amplitude code for flexible full-space electromagnetic manipulations. *Advanced Optical Materials*, 7(8):1801429, 2019.
- [30] Huanhuan Yang, Xiangyu Cao, Fan Yang, Jun Gao, Shenheng Xu, Maokun Li, Xibi Chen, Yi Zhao, Yuejun Zheng, and Sijia Li. A programmable metasurface with dynamic polarization, scattering and focusing control. *Scientific reports*, 6(1):35692, 2016.
- [31] Lei Zhang, Xiao Qing Chen, Shuo Liu, Qian Zhang, Jie Zhao, Jun Yan Dai, Guo Dong Bai, Xiang Wan, Qiang Cheng, Giuseppe Castaldi, et al. Space-time-coding digital metasurfaces. *Nature communications*, 9(1):4334, 2018.
- [32] Lei Zhang, Xiao Qing Chen, Rui Wen Shao, Jun Yan Dai, Qiang Cheng, Giuseppe Castaldi, Vincenzo Galdi, and Tie Jun Cui. Breaking reciprocity with space-time-coding digital metasurfaces. *Advanced materials*, 31(41):1904069, 2019.
- [33] Lei Zhang, Shuo Liu, Lianlin Li, and Tie Jun Cui. Spin-controlled multiple pencil beams and vortex beams with different polarizations generated by pancharatnam-berry coding metasurfaces. *ACS applied materials & interfaces*, 9(41):36447–36455, 2017.
- [34] Lei Zhang, Rui Yuan Wu, Guo Dong Bai, Hao Tian Wu, Qian Ma, Xiao Qing Chen, and Tie Jun Cui. Transmission-reflection-integrated multifunctional coding metasurface for full-space controls of electromagnetic waves. *Advanced Functional Materials*, 28(33):1802205, 2018.
- [35] Jie Zhao, Qiang Cheng, Jie Chen, Mei Qing Qi, Wei Xiang Jiang, and Tie Jun Cui. A tunable metamaterial absorber using varactor diodes. *New Journal of Physics*, 15(4):043049, 2013.
- [36] Shaoqing Zhou, Wei Xu, Kezhi Wang, Marco Di Renzo, and Mohamed-Slim Alouini. Spectral and energy efficiency of irs-assisted miso communication with hardware impairments. *IEEE wireless communications letters*, 9(9):1366–1369, 2020.