



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

Επιστήμη και Τεχνολογία της Πληροφορικής και των Υπολογιστών

Ειδίκευση: Δικτύων Επικοινωνιών και Κατανεμημένων Συστημάτων

Διπλωματική Εργασία

Αναδιαρθρώσιμες ευφείς επιφάνειες για ασύρματες επικοινωνίες πέραν της 5ης γενιάς

Κωνσταντίνος Δ. Καραπάτης

Υπεύθυνος καθηγητής: Νικόλαος Μυριδάκης

Αθήνα, 2022



UNIVERSITY OF WEST ATTICA

SCHOOL OF ENGINEERS

DEPARTMENT OF COMPUTER ENGINEERING

MASTER OF SCIENCE

Science and Technology of Informatics and Computers

Option: Communication Networks & Distributed Systems

Master Thesis

Reconfigurable intelligent surfaces for wireless communications beyond the 5th generation

Konstantinos D.Karapatis

Supervisor: Nikolaos Miridakis

Athens, 2022

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αναδιαρθρώσιμες ευφυείς επιφάνειες για ασύρματες επικοινωνίες πέραν της 5ης γενιάς

Καραπάτης Κωνσταντίνος

A.M. 20027

Εισηγητής:

Επίκουρος καθηγητής κ.Μυριδάκης Νικόλαος

Εξεταστική Επιτροπή:

Καθηγητής κ.Αντώνιος Μπόγρης

Επίκουρος καθηγητής κ.Παναγιώτης Καρκαζής

Ημερομηνία εξέτασης:18/1/2022

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΑΡΑΠΑΤΗΣ του ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ, με αριθμό μητρώου MCSE20027 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ του Τμήματος ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από εμένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου». Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι την απόκτηση του πτυχίου μου και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή.

The undersigned KONSTANTINOS DIMITRIOU KARAPATIS, with registration number MCSE20027 student's Program Graduate Studies SCIENCE & TECHNOLOGY OF INFORMATION AND Department COMPUTER ENGINEERING COMPUTER & COMPUTER of Engineering of the University of Western Attica, declare that: "I am author of this master's thesis and that all the help I had for its preparation is fully recognized and refers to the work. Also, any sources from which I have used data, ideas or words, whether exact or paraphrased, are listed in their entirety, with full reference to the authors, the publisher or the magazine, including any sources that may have been used by the internet. I also certify that this work has been written by me exclusively and is a product of intellectual property of both myself and the Foundation. Violation of my above academic responsibility is an essential reason for the revocation of my degree ". I wish the denial of access to the full text of my work until my degree is obtained and upon my request to the library and approval of the supervising professor.

Όνοματεπώνυμο & Υπογραφή Υποψηφίου

(Surname and first name of the candidate):

ΚΑΡΑΠΑΤΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

(KARAPATIS KONSTANTINOS)



Πνευματική ιδιοκτησία © 2022 Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Όλα τα δικαιώματα διατηρούνται

Copyright © 2022 University of West Attica

All rights reserved

ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΡΙΟ ΜΗΝΥΜΑ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Μυριδάκη Νικόλαο, τόσο για την ανάληψη της επίβλεψης της εργασίας, όσο και για την υποστήριξή του στο έργο μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω το σύνολο των καθηγητών καθώς και των συμφοιτητών μου, με τους οποίους απέκτησα μια εποικοδομητική και ωφέλιμη συνεργασία στη διάρκεια του προγράμματος εκπαίδευσης αλλά και των εξεταστικών περιόδων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για την υποστήριξή τους με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, αλλά και για την υπομονή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Στην εποχή που ζούμε αλλά και στα χρόνια που έρχονται οι πιο ενεργειακά αποδοτικές συσκευές και τεχνολογίες είναι αυτές που θα επικρατήσουν και σιγα σιγά θα απωθήσουν τις παρωχημένες οι οποίες σύντομα στο μέλλον θα αποτελούν μια ανάμνηση. Οι αναδιαρθρώσιμες ευφυείς επιφάνειες (RIS) που ήδη έχουν αρχίσει και αποσπάνε αρκετά το ενδιαφέρον θα έχουν την δυνατότητα της ενίσχυσης και προώθησης του εισερχόμενου σήματος χωρίς την πρόσληψη κάποιας ενεργειακής ενίσχυσης. Στην ουσία θα ανακλούν και θα ενισχύουν το σήμα όντας σχεδόν παθητικές και θα προσφέρουν πολύ μεγαλύτερη ευελιξία από θέμα οικονομίας ενέργειας καθώς επίσης στο μέλλον οι συσκευές και η ροή των δεδομένων θα αυξηθούν με εκρηκτικό ρυθμό κάτι που βλέπουμε ότι έχει συμβεί ήδη συγκριτικά με μια δεκαετία πριν.

Στα πρώτα τρία κεφάλαια της εργασίας θα υλοποιηθεί βιβλιογραφική έρευνα σχετικά με τις μελλοντικές εξελίξεις μετά την 5^η καθώς και για την 6^η γενιά κινητών επικοινωνιών. Θα αναφερθούν πολλές περιπτώσεις χρήσεις που θα απαιτείται η 6^η γενιά και οι τεχνολογίες της ώστε να εξυπηρετήσει αυτές τις περιπτώσεις χρήσης. Στη συνέχεια θα γίνει περιγραφή του RIS. Θα αναφερθούν εφαρμογές του RIS. Επίσης θα γίνει αναφορά στα πλεονεκτήματα του RIS και σε διαφορετικές κατηγορίες του RIS. Στη συνέχεια της βιβλιογραφικής έρευνας θα περιγραφούν κάποια smart radio environments, ενώ θα ακολουθήσουν κάποιες συγκρίσεις του RIS με άλλου τύπου τεχνολογίες που κι αυτές σκοπό έχουν να ενισχύσουν το σήμα. Στο τέλος της βιβλιογραφικής έρευνας θα αναφερθούν κάποιες προκλήσεις που θα κληθεί να αντιμετωπίσει το RIS τα επόμενα χρόνια όπως μοντελοποίηση καναλιού και απόκτηση καναλιού και σχεδιασμός συστήματος υπό αβεβαιότητα CSI.

Στη συνέχεια της εργασίας θα υλοποιηθεί αλγόριθμος και θα γίνουν μετρήσεις της ενεργειακής απόδοσης αλλά και του transmit power του RIS, του DF relay αλλά και του SISO πάνω σε διάφορες τοπολογίες και σενάρια. Επίσης στο ίδιο κεφάλαιο θα γίνει σχολιασμός των γραφημάτων και των αποτελεσμάτων καθώς θα πραγματοποιηθεί και σύγκριση ανάμεσα στα διάφορα σενάρια και simulations για να εξαχθούν τα ανάλογα συμπεράσματα. Σκοπός είναι, μέσω των συγκεκριμένων σεναρίων και συστημάτων, να αποδειχθεί σε κάθε περίπτωση πιο σύστημα αποδίδει καλύτερα, πόσο ο παράγοντας απόσταση επηρεάζει την απόδοση του κάθε συστήματος και πότε το σύστημα χρειάζεται περαιτέρω ενίσχυση.

Λέξεις κλειδιά: αναδιαρθρώσιμες ευφυείς επιφάνειες, RIS, 5^η γενιά, 6^η γενιά, έξυπνα ραδιοφωνικά περιβάλλοντα, μοντελοποίηση καναλιού, απόκτηση καναλιού, ενεργειακή απόδοση, ενέργεια μετάδοσης, DF ρελέ, SISO.

ABSTRACT

In the age we live in but also in the years to come, the most energy efficient devices and technologies are the ones that will prevail and will gradually repel the obsolete ones which will soon be a memory in the future. Reconfigurable intelligent surfaces (RIS) that have already started and are quite distracting will be able to amplify and promote the incoming signal without receiving any energy boost. In essence they will reflect and amplify the signal being almost passive and will offer much more flexibility in terms of energy saving as well as in the future devices and data flow will increase at an explosive rate which we see has already happened compared to a decade ago.

In the first three chapters of the work, a bibliographic research will be carried out on future developments after the 5th as well as on the 6th generation of mobile communications. Many uses will be required for the 6th generation and its technologies to serve these uses. The RIS will then be described. RIS applications will be reported. Reference will also be made to the advantages of RIS and different categories of RIS. In the continuation of the bibliographic research, some smart radio environments will be described, while some comparisons of RIS with other types of technologies will follow, which also aim to strengthen the signal. At the end of the literature research, some challenges that RIS will face in the coming years will be mentioned, such as channel modeling and channel acquisition and system design under CSI uncertainty.

In the continuation of the work, an algorithm will be implemented and measurements of energy efficiency and transmit power of RIS, DF relay and SISO will be made on various topologies and scenarios. Also in the same chapter the graphs and the results will be commented as a comparison will be made between the different scenarios and simulations in order to draw the corresponding conclusions. The aim is, through the specific scenarios and systems, to prove in each case which system performs better, how much the distance factor affects the performance of each system and when the system needs further reinforcement.

Keywords: reconfigurable intelligent surfaces, RIS, 5th generation, 6th generation, smart radio environments, channel modelling, channel acquisition, energy efficiency, transmit power DF relay, SISO.

Περιεχόμενα

1 Περιγραφή beyond 5G – 6G	23
1.1 Εισαγωγή.....	23
1.2 State-of-the-art related works	24
1.3 Drivers	25
1.4 Εκρηκτική ανάπτυξη του mobile traffic	25
1.5 Πιθανές use cases	27
1.5.1 Holographic – Type Communication (HTC):.....	27
1.5.2 Extended Reality (ER):.....	28
1.5.3 Tactile Internet:.....	28
1.5.4 Multi – Sense Experience:.....	29
1.5.5 Digital Twin:	29
1.5.6 Pervasive Intelligence:	29
1.5.7 Ευφυείς Μεταφορές και Logistics:	30
1.5.8 Enhanced On – Board Communications:	30
1.5.9 Global Ubiquitous Connectability:	30
2 Περιγραφή του RIS.....	33
2.1 Εισαγωγή.....	33
2.2 Reconfigurable Metasurfaces	34
2.3 Εφαρμογές του RIS στις ασύρματες επικοινωνίες	35
2.3.1 Anomalous reflection/transmission	35
2.3.2 Beamforming/focusing	35
2.3.3 Joint transmitter/RIS encoding	36
2.3.4 Single-RF multi-stream transmitter design	36
2.4 The advantages of RISs	36
2.4.1 Easy to deploy	36
2.4.2 Spectral efficiency enhancement.....	36
2.4.3 Environment friendly	36
2.4.4 Compatibility	37
2.5 Διαφορετικές κατηγορίες RISs.....	37
2.5.1 Εισαγωγή.....	37
2.5.2 Waveguide RIS	38

2.5.3 Refracting RIS	38
2.5.4 Reflecting RIS	39
2.6 Smart Radio Enviroments	39
2.6.1 Από την προσαρμογή στον έλεγχο και στον προγραμματισμό.....	39
2.6.2 Χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός Smart Radio Enviroment	40
2.6.3 Signal engineering.....	40
2.6.4 Interference engineering	40
2.6.5 Security engineering	41
2.6.6 Scattering engineering	41
2.7 Reconfigurable Intelligent Surfaces vs Relays.....	41
2.7.1 Hardware Complexity	41
2.7.2 Noise	42
2.7.3 Spectral Efficiency	42
2.7.4 Power Budget.....	43
2.7.5 Average Signal-To-Noise Ratio VS. Number of Elements.....	43
2.7.6 Average Signal-To-Noise Ratio VS. Transmission Distance	44
2.7.7 Electrically large RISs.....	45
2.7.8 Electrically small RISs	45
2.7.9 Κυριότερα μηνύματα από τη σύγκριση.....	46
2.8 Numerical results	47
2.8.1 RISs vs Relays as a function of the transmission distance	48
2.8.2 RISs: Anomalous reflectors vs. Focusing lenses	49
2.8.3 RISs vs. Relays as a function of the carrier frequency	50
2.8.4 RISs vs. Relays as a function of the size of the RIS.....	50
3 Challenges	51
3.1 Channel Modelling and Channel Acquisition	51
3.2 Σχεδιασμός συστήματος υπό αβεβαιότητα CSI.....	52
3.3 RIS Design.....	53
3.4 Joint Transceiver and RIS Design.....	54
3.5 Low-Complexity robust system design	55
3.6 Robustness against channel estimation errors.....	55
3.7 Robustness against low-resolution phase shifts.....	57
3.8 Ris-Aided edge intelligence	57

3.9 RIS-Aided Physical-Layer Security	58
4 Περιγραφή του Project - Αλγόριθμος και διαγράμματα ροής – Συγκρίσεις και Σχόλια	60
4.1 Project - Αλγόριθμος.....	60
4.2 Βήματα Αλγορίθμου	60
4.3 Περιπτώσεις με 1 RIS/Relays	63
4.3.1 Περίπτωση 1	63
4.3.2 Σύγκριση DF Relay-RIS περίπτωση 1.....	65
4.3.3 Περίπτωση 2	66
4.3.4 Σύγκριση DF Relay-Ris περίπτωσης 2	68
4.3.5 Σύγκριση RIS περιπτώσεων 2vs1	68
4.3.6 Περίπτωση 3	69
4.3.7 Σύγκριση DF Relay-Ris περίπτωσης 3	71
4.3.8 Σύγκριση RIS περιπτώσεων 3vs2	71
4.3.9 Σύγκριση RIS περιπτώσεων 3vs1	72
4.4 Περιπτώσεις με 2 RIS/Relays σε σειρά	72
4.4.1 Περίπτωση 4	72
4.4.2 Σύγκριση DF Relay-RIS περίπτωση 4.....	75
4.4.3 Περίπτωση 5	75
4.4.4 Σύγκριση DF Relay-Ris περίπτωσης 5	77
4.4.5 Σύγκριση RIS περιπτώσεων 5vs4	78
4.4.6 Περίπτωση 6	78
4.4.7 Σύγκριση DF Relay-Ris περίπτωσης 6	80
4.4.8 Σύγκριση RIS περιπτώσεων 6vs5	80
4.4.9 Σύγκριση RIS περιπτώσεων 6vs4	81
4.5 Περιπτώσεις με 2 RIS/Relays παράλληλα.....	81
4.5.1 Περίπτωση 7	81
4.5.2 Σύγκριση DF Relay-RIS περίπτωση 7.....	83
4.5.3 Περίπτωση 8	84
4.5.4 Σύγκριση DF Relay-Ris περίπτωσης 8	86
4.5.5 Σύγκριση RIS περιπτώσεων 8vs7	87
4.5.6 Περίπτωση 9	87
4.5.7 Σύγκριση DF Relay-Ris περίπτωσης 9	89
4.5.8 Σύγκριση RIS περιπτώσεων 9vs8	90

4.5.9 Σύγκριση RIS περιπτώσεων 9vs7	90
4.6 Σχόλια και Συγκρίσεις με κριτήριο τον σχηματισμό	90
4.6.1 Σχολιασμός Περιπτώσεων 1,4,7	90
4.6.2 Σύγκριση RIS περιπτώσεων 1,4,7.....	91
4.6.3 Σύγκριση DF relays περιπτώσεων 1,4,7	91
4.6.4 Σχολιασμός Περιπτώσεων 2,5,8	92
4.6.5 Σύγκριση RIS περιπτώσεων 2,5,8.....	92
4.6.6 Σύγκριση DF relays περιπτώσεων 2,5,8.....	92
4.6.7 Σχολιασμός Περιπτώσεων 3,6,9	93
4.6.8 Σύγκριση RIS περιπτώσεων 3,6,9.....	93
4.6.9 Σύγκριση DF Relays περιπτώσεων 3,6,9	93
4.6.10 Σύγκριση SISO περιπτώσεων 1,2,3	94
4.7 Περιπτώσεις με 3 RIS/Relays σε σειρά και παράλληλα.....	94
4.7.1 Περίπτωση 1	94
4.7.2 Σύγκριση περιπτώσεων τριών RIS/Relays σε σειρά vs δύο RIS/Relays σε σειρά	97
4.7.3 Περίπτωση 2	98
4.7.4 Σύγκριση περιπτώσεων τριών RIS/Relays παράλληλα vs δύο RIS/Relays παράλληλα	100
4.7.5 Σύγκριση περιπτώσεων τριών RIS/Relays παράλληλα vs τριών RIS/Relays σε σειρά.....	101
4.8 Περίπτωση με 4 RIS/Relays σε τετραγωνικό σχηματισμό	101
4.8.1 Σύγκριση περιπτώσεων τετραγωνικού σχηματισμού vs 3 RIS σειρά	104
4.9 Περιπτώσεις με 8 RIS/Relays σε σειρά	105
4.9.1 Περίπτωση 1	105
4.9.2 Σύγκριση DF Relay-RIS Περίπτωσης 1.....	107
4.9.3 Σύγκριση 8 RIS σε σειρά (απόσταση 80 m) – 1 RIS σε σειρά (απόσταση 80 m).....	107
4.9.4 Σύγκριση 8 RIS σε σειρά (απόσταση 80 m) – 2 RIS σε σειρά (απόσταση 80 m).....	108
4.9.5 Περίπτωση 2	108
4.9.6 Σύγκριση DF Relay-RIS Περίπτωσης 2.....	111
4.9.7 Σύγκριση 8 RIS σε σειρά (απόσταση 160 m) – 8 RIS σε σειρά (απόσταση 80 m).....	111
4.9.8 Περίπτωση 3	112
4.9.9 Σύγκριση DF Relay-RIS Περίπτωσης 3.....	115
4.9.10 Σύγκριση 8 RIS σε σειρά (απόσταση 240 m) – 8 RIS σε σειρά (απόσταση 160 m).....	115
5 Συμπεράσματα - Επίλογος - Μελλοντικές προεκτάσεις.....	117
5.1 Συμπεράσματα.....	117

5.2 Επίλογος.....	118
5.3 Μελλοντικές προεκτάσεις	118
6 Παράρτημα	120
6.1 Κώδικας Περιπτώσεων 1,2,3	120
6.2 Κώδικας Περιπτώσεων 4,5,6	123
6.3 Κώδικας Περιπτώσεων 7,8,9	126
6.4 Κώδικας Περίπτωσης με 3 RIS/Relays σε σειρά	129
6.5 Κώδικας Περίπτωσης με 3 RIS/Relays παράλληλα.....	133
6.6 Κώδικας περίπτωσης με 4 RIS/Relays σε τετραγωνικό σχηματισμό	136
6.7 Κώδικας περιπτώσεων με 8 RIS/Relays σε σειρά	139
7 Αναφορές.....	144

Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1 RISs in wireles comminications networks.[2].....	24
Εικόνα 2 Estimated global mobile subscriptions and mobile traffic from 2020 to 2030.[3]	27
Εικόνα 3 typical 5G usage scenarions (eMBB, URRC, and mMTC).[3]	31
Εικόνα 4 The considered RIS-based multi-user MISO system.[1]	34
Εικόνα 5 Possible uses of reconfigurable intelligent surfaces.[5].....	35
Εικόνα 6 Different types of metasurfaces[2]	38
Εικόνα 7 Example of smart radio enviroment.[5]	40
Εικόνα 8 Rate for Relays and RIS[5]	44
Εικόνα 9 Data rate of RISs and relays versus the transmission distance[5]	47
Εικόνα 10 Data rate of RISs and relays versus the transmission frequency.[5]	49
Εικόνα 11 Data rate of RISs and relays versus the size of the RIS.[5].....	50
Εικόνα 12 A RIS-assisted massive MIMO system[4]	52
Εικόνα 13 An illustration of the tradeoff between the achievable rate[4].....	53
Εικόνα 14 Achievable rate versus channel estimation error in a RIS assisted[4]	55
Εικόνα 15 MSE vs. message passing iterations in the matrix calibration based.[4]	56
Εικόνα 16 Περίπτωση με 1 RIS/Relay σε απόσταση 80 m.....	63
Εικόνα 17 Energy Efficiency περίπτωση 1	64
Εικόνα 18 Transmit Power περίπτωση 1	65
Εικόνα 19 Περίπτωση με 1 RIS/Relay σε απόσταση 120 m.....	66
Εικόνα 20 Energy Efficiency περίπτωση 2	67
Εικόνα 21 Transmit Power περίπτωση 2	68
Εικόνα 22 Περίπτωση με 1 RIS/Relay σε απόσταση 150 m.....	69
Εικόνα 23 Energy Efficiency περίπτωση 3	70
Εικόνα 24 Transmit Power περίπτωση 3	71
Εικόνα 25 Περίπτωση με 2 RIS/Relays σε σειρά σε συνολική απόσταση 80 m	72
Εικόνα 26 Energy Efficiency περίπτωση 4	74
Εικόνα 27 Transmit Power περίπτωση 4	74
Εικόνα 28 Περίπτωση με 2 RIS/Relays σε σειρά σε συνολική απόσταση 120 m	75
Εικόνα 29 Energy Efficiency περίπτωση 5	76
Εικόνα 30 Transmit Power περίπτωση 5	77
Εικόνα 31 Περίπτωση με 2 RIS/Relays σε σειρά σε συνολική απόσταση 150 m	78
Εικόνα 32 Energy Efficiency περίπτωση 6	79
Εικόνα 33 Transmit Power περίπτωση 6	80
Εικόνα 34 Περίπτωση με 2 RIS/Relays παράλληλα σε απόσταση 80 m το καθένα	81
Εικόνα 35 Energy Efficiency περίπτωση 7	82
Εικόνα 36 Transmit Power περίπτωση 7	83
Εικόνα 37 Περίπτωση με 2 RIS/Relays παράλληλα σε απόσταση 120 m το καθένα	84
Εικόνα 38 Energy Efficiency περίπτωση 8	85
Εικόνα 39 Transmit Power περίπτωση 8	86

Εικόνα 40 Περίπτωση με 2 RIS/Relays παράλληλα σε απόσταση 150 m το καθένα	87
Εικόνα 41 Energy Efficiency περίπτωση 9	88
Εικόνα 42 Transmit Power περίπτωση 9	89
Εικόνα 43 Περίπτωση με 3 RIS/Relays σε σειρά σε συνολική απόσταση 150 m	94
Εικόνα 44 Energy Efficiency περίπτωση 1	96
Εικόνα 45 Transmit Power περίπτωση 1	97
Εικόνα 46 Περίπτωση με 3 RIS/Relays παράλληλα σε απόσταση 150 m το καθένα	98
Εικόνα 47 Energy Efficiency περίπτωση 2	99
Εικόνα 48 Transmit Power περίπτωση 2	100
Εικόνα 49 Περίπτωση με 4 Ris Relays σε τετραγωνικό σχηματισμό σε συνολική απόσταση 150 m ανα δυάδες	101
Εικόνα 50 Energy Efficiency περίπτωση τετραγωνικού σχηματισμού	103
Εικόνα 51 Transmit power περίπτωση τετραγωνικού σχηματισμού	104
Εικόνα 52 Περίπτωση 1 8 RIS/Relays σε σειρά σε 80 m απόσταση συνολικά από την πηγή.	105
Εικόνα 53 Energy Efficiency Περίπτωση 1 8 RIS/Relays σε σειρά	106
Εικόνα 54 Transmit Power Περίπτωση 1 8 RIS/Relays σε σειρά	107
Εικόνα 55 Περίπτωση 2 8 RIS/Relays σε σειρά 160 m συνολική απόσταση από την πηγή.	108
Εικόνα 56 Energy Efficiency Περίπτωση 2 8 RIS/Relays σε σειρά	110
Εικόνα 57 Transmit Power Περίπτωση 2 8 RIS/Relays σε σειρά	111
Εικόνα 58 Περίπτωση 3 8 RIS/Relays σε σειρά 240 m συνολικά από την πηγή.....	112
Εικόνα 59 Energy Efficiency Περίπτωση 3 8 RIS/Relays σε σειρά	114
Εικόνα 60 Transmit Power Περίπτωση 3 8 RIS/Relays σε σειρά	115

Συντομογραφίες

2D	Second Dimension
3D	Third Dimension
5G	Fifth Generation
6G	Sixth Generation
ADC	Analog To Digital Converter
AF	Amplify And Forward
AI	Artificial Intelligence
BS	Base Station
CSI	Channel State Information
DAC	Digital To Analog Converter
DB	Decibels
DF	Decode And Forward
dRD	Distance Relay Destination
dSR	Distance Source Relay
E2E	End To End
EB	Exabytes
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
ER	Extended Reality
FD	Full Duplex
GB	Gigabytes
GBPS	Gigabits Per Seconds
HD	Half Duplex
HTC	Holographic Type Communication
IOT	Internet Of things
IRS	Intelligent Reflecting Surfaces

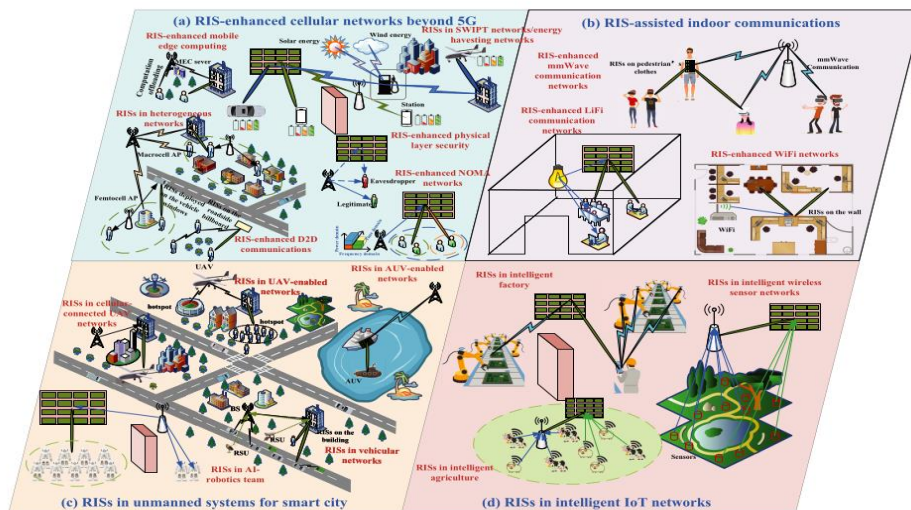
ITU-R	ITU Radiocommunication Sector
ITU-T	ITU Telecommunication Standardization Sector
LIS	Large Intelligent Surfaces
LoS	Line Of Sight
MBB	Mobile Broadband
MIMO	Multiple Input Multiple Output
ML	Machine Learnig
mMTC	Massive Machine Type Communications
MS	Milisecond
MSE	Mean Squared Error
MT	Mobile Terminal
mW	Milli Watt
PBIT	Passive Beamforming And Information Transfer
QoS	Quality Of Service
RF	Radio Frequency
RIS	Reconfigurable Intelligent Surfaces
SDN	Software Defined Network
SIMO	Single Input Multiple Output
SINR	Signal To Interference Plus Noise Ratio
SISO	Single Input Single Output
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
THz	Terahertz
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communications
VR	Virtual Reality

1 Περιγραφή beyond 5G – 6G

1.1 Εισαγωγή

Η υψηλή σε απαίτηση ροή δεδομένων των αναδυόμενων και μελλοντικών ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς και beyond, έχουν γεννήσει πολλά ερωτηματικά σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας. Αυτά τα δίκτυα προβλέπεται να συνδέονται σε πάνω από 50 δισεκατομμύρια συσκευές με ασύρματες δυνατότητες τα χρόνια που έρχονται, μέσω υλοποιήσεων multi-antenna σταθμών βάσης και access points. Σαν συνέπεια η bit-per-joule ενεργειακή αποτελεσματικότητα έχει αναδειχθεί σαν ένας κύριος παράγοντας απόδοσης για πράσινα και βιώσιμα δίκτυα και διάφορες ενεργειακά αποτελεσματικές λύσεις έχουν προταθεί. Μια έρευνα στις διαφορετικές προσεγγίσεις των υλοποιήσεων ενεργειακά αποτελεσματικών 5G ασύρματων δικτύων έχουν εμφανιστεί πρόσφατα. Οι ερευνητές σημειώνουν ότι η ενεργειακή πρόκληση μπορεί να κατακτηθεί με συγχρονισμένη χρήση πολλαπλών προσεγγίσεων ξεκινώντας από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ενεργειακά αποτελεσματικό hardware και βελτιστοποιημένες ενεργειακά τεχνικές και υλοποιήσεις.[1]

Οι πρωτοφανείς απαιτήσεις για υψηλής ποιότητας και πανταχού παρούσες ασύρματες υπηρεσίες επιβάλλουν τεράστια πρόκληση στα υπάρχοντα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Εφαρμογές όπως η rate-centric ενισχυμένη ευρυζωνική κινητή τηλεφωνία (eMBB), εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες χαμηλής καθυστέρησης (URLLC) και υπηρεσίες επικοινωνίας massive machine-type(mMTC) είναι οι στόχοι σχεδιάζοντας την πέμπτη γενιά (5G) συστημάτων επικοινωνίας. Ωστόσο, οι στόχοι των συστημάτων έκτης γενιάς (6G) κινητών επικοινωνιών αναμένεται να είναι μετασχηματιστικές και επαναστατικές εφαρμογές που περιλαμβάνουν data-driven, ultra massive και ubiquitous ασύρματη συνδεσιμότητα, καθώς και συνδεδεμένη νοημοσύνη. Επομένως, απαιτούνται νέες τεχνολογίες μετάδοσης για την υποστήριξη αυτών των νέων εφαρμογών και υπηρεσιών. Οι αναδιαμορφώσιμες εφνείς επιφάνειες (RIS), οι οποίες ονομάζονται επίσης και έξυπνες ανακλαστικές επιφάνειες(IRS) ή μεγάλες έξυπνες επιφάνειες (LIS), περιλαμβάνουν μια σειρά από ανακλαστικά στοιχεία για την αναδιαμόρφωση των incident signals. Λόγω της ικανότητάς τους να τροποποιούν προληπτικά το περιβάλλον ασύρματης επικοινωνίας, τα RIS έχουν γίνει ένα κομβικό σημείο έρευνας στις ασύρματες επικοινωνίες για να μετριάσουν ένα ευρύ φάσμα προκλήσεων που αντιμετωπίζονται σε διάφορα ασύρματα δίκτυα.[2]



Εικόνα 1 RISs in wireless communications networks.[2]

Προς το παρόν, η 5η γενιά είναι ακόμη σε διαδικασία εξάπλωσης κατά μήκος και πλάτος όλου του πλανήτη, αλλά ήδη έχει φτάσει η στιγμή, για την ακαδημία και την βιομηχανία να στρέψουν το βλέμμα τους beyond 5g και προς 6g συστήματα, ώστε να ικανοποιήσουν τις μελλοντικές απαιτήσεις για πληροφορία και τεχνολογία επικοινωνιών μέχρι το 2030. Ωστόσο διάλογοι είναι σε εξέλιξη με την κοινότητα ασύρματων επικοινωνιών για το πότε ακριβώς θα προκύψει πραγματική ανάγκη για 6g ή μετρώντας τις γενιές αν θα έπρεπε να σταματούσαμε στην 5η γενιά. Υιοθετώντας τη λογική της Microsoft ότι τα Windows 10 είναι η απόλυτη έκδοση. Διάφορες πρωτοποριακές εργασίες πάνω στην επόμενη γενιά των ασύρματων δικτύων έχουν ξεκινήσει. Ένα focus group το οποίο ονομάζεται Technologies for Network 2030 μέσα στη διεθνή ένωση τηλεπικοινωνιών (ITU-T) θεσπίστηκε τον Ιούλιο του 2018. Το συγκεκριμένο γκρούπ έχει πρόθεση να μελετήσει τις ικανότητες των δικτύων για το 2030 και επείτα, όταν και αναμένεται να υποστηρίζονται προηγμένα σενάρια, όπως holographic-type επικοινωνίες, αστείρευτη ευφυία, tactile internet και πολύπλευρη εμπειρία και ψηφιακό δίδυμο.[3]

1.2 State-of-the-art related works

Από το ξεκίνημα του 2020, ο αριθμός των δημοσιεύσεων σχετικά με το 6G μεγαλώνει λίγο γρηγορότερα από τα 2 προηγούμενα χρόνια. Το 6G θα έπρεπε να είναι ανθρωποκεντρικό (όπως σημειώνεται σε μια δημοσίευση), και γιαυτό το λόγο η ασφάλεια, η μυστικότητα και η προστασία προσωπικών δεδομένων πρέπει να είναι βασικά χαρακτηριστικά. Για να υποστηριχτεί αυτό το όραμα, ένα συστηματικό πλαίσιο, απαιτούμενες τεχνολογίες, και αναμενόμενες προκλήσεις περιγράφηκαν. Στη συνέχεια μια έρευνα σε machine learning τεχνολογίες εφαρμόστηκε, για επικοινωνίες, δικτύωση και

θέματα ασφάλειας δικτύων οχημάτων, και μια άποψη των τρόπων προς ένα εφυές 6G οδικό δίκτυο έγινε διαθέσιμο.[3]

1.3 Drivers

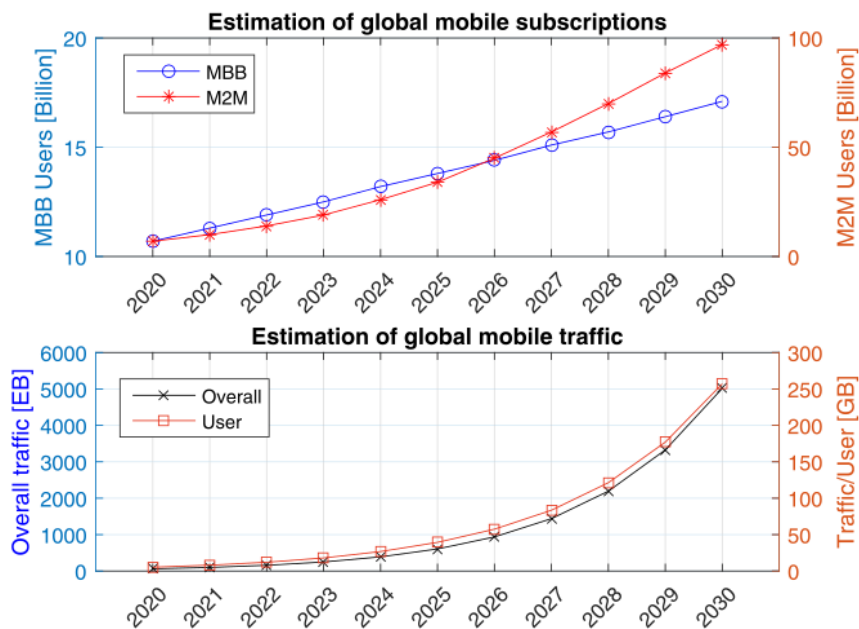
Από τα μέσα του 2019, τα εμπορικά 5G κινητά δίκτυα έχουν ξεκινήσει να εξαπλώνονται σε όλο τον κόσμο και ήδη έχουν φτάσει μια πολύ μεγάλη κλίμακα σε κάποιες χώρες. Για παράδειγμα ο αριθμός των ανεπτυγμένων 5G σταθμών βάσης στην Κίνα ξεπερνάει τις 500000 στο τέλος του 2020, εξυπηρετώντας περισσότερους από 100 εκατομμύρια συνδρομητές 5G. Ακολουθώντας την παραδοχή ότι μια νέα γενιά εμφανίζεται κάθε δεκαετία, έχει φτάσει η ώρα για την ακαδημία και την βιομηχανία να αρχικοποιήσουν την εξερεύνηση του διαδόχου της 5G. Στο δρόμο προς την 6G, ωστόσο, το πρώτο πρόβλημα που ερχόμαστε αντιμέτωποι είναι ότι υπάρχουν πολλές ανησυχίες του τύπου “χρειαζόμαστε πραγματικά την 6G;” ή “είναι το 5G ήδη αρκετό;”. Για να διευθετήσουμε ερωτήσεις σαν κι αυτές πρέπει πρώτα να ξεκαθαρίσουμε ποιές είναι οι δυνάμεις που καθοδηγούν την 6G.[3]

Η ανάπτυξη ενός συστήματος μιας επόμενης γενιάς καθοδηγείται όχι μόνο από την εκθετική αύξηση του mobile traffic και των συνδρομών κινητής τηλεφωνίας αλλά ακόμη και από καινοτόμες υπηρεσίες και εφαρμογές στον ορίζοντα. Επιπροσθέτως, καθοδηγείται από την εσωτερική ανάγκη της κοινωνίας των κινητών επικοινωνιών για συνεχή βελτίωση του δικτύου, λιγότερο οικονομικό κόστος, μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, καλύτερη εκμετάλλευση φάσματος και βελτιστοποίηση στη λειτουργία. Με την έλευση εξελιγμένων τεχνολογιών όπως τεχνητή νοημοσύνη, THz, σχηματισμό δορυφόρων μεγάλης κλίμακας, το δίκτυο επικοινωνιών είναι σε θέση να εξελιχθεί προς ένα πιο ισχυρό και αποτελεσματικό σύστημα ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις των τωρινών δικτύων και να ανοίγει την δυνατότητα για να προσφέρει πρωτοποριακές υπηρεσίες που δεν έχουν ξαναειδοθεί.[3]

1.4 Εκρηκτική ανάπτυξη του mobile traffic

Βρισκόμαστε σε μια πρωτοφανή περίοδο που ένας τεράστιος αριθμός από έξυπνες συσκευές, διαδραστικές υπηρεσίες, και εφυές εφαρμογές έρχονται στην επιφάνεια και εξελίσσονται με ένα αστραπιαίο τρόπο, υποβάλλοντας μια τεράστια απαίτηση σε κινητές επικοινωνίες. Μπορεί να προβλεφθεί ότι τα συστήματα 5G είναι δύσκολο να ικανοποιήσουν τον τρομερό βαθμό του mobile traffic το 2030 και έπειτα. Λόγω του πολλαπλασιασμού των πλούσιων σε βίντεο εφαρμογών, ενισχυμένων συσκευών με ανάλυση οθόνης, επικοινωνία συσκευής προς συσκευή, υπηρεσίες mobile cloud, κτλ, το παγκόσμιο mobile traffic συνεχόμενα θα αυξάνεται με ένα εκρηκτικό τρόπο, μέχρι 5016 EB ανά μήνα το έτος 2030 συγκριτικά με τα 62 EB το έτος 2020, σύμφωνα με υπολογισμούς του ITU-R το 2015. Μια αναφορά από την Ericsson αποκαλύπτει ότι το παγκόσμιο mobile traffic έχει φθάσει τα 33EB ανά μήνα στο τέλος του 2019, η οποία δικαιολογεί και αποδεικνύει ότι η πρόβλεψη της ITU-R είναι εύστοχη.[3]

Την προηγούμενη δεκαετία, ο αριθμός των smartphones και tablets έχει βιώσει εκθετική αύξηση λόγω του πολλαπλασιασμού του mobile broadband. Αυτό το trend θα συνεχιστεί και στη δεκαετία του 2020 καθώς η διείσδυση των smartphones και tablets δεν είναι κορεσμένη, ειδικά στις αναπτυσσόμενες χώρες. Εν τω μεταξύ νέου τύπου τερματικά χρηστών, όπως wearable electronics και VR glasses, αναδύονται στην αγορά σε ταχύτατους ρυθμούς και υιοθετούνται από τους καταναλωτές σχεδόν άμεσα. Αναμένεται ότι ο συνολικός αριθμός των MBB συνδρομητών παγκοσμίως θα αγγίξει τα 17.1 δισεκατομμύρια από το 2030. Από την άλλη πλευρά η απαίτηση για traffic ανά MBB χρήστη συνεχώς διογκώνεται μαζί με την αύξηση του αριθμού των χρηστών. Αυτό κυρίως συμβαίνει λόγω της δημοφιλίας υπηρεσιών mobile video όπως το youtube, το Netflix, και πιο πρόσφατα το Tik-Tok, όπως επίσης και η σταθερή βελτίωση της ανάλυσης οθόνης στις κινητές συσκευές. Η μεταφορά δεδομένων η οποία προέρχεται από υπηρεσίες mobile video ήδη υπολογίζονται ως τα 2/3 της συνολικής κίνησης δεδομένων του διαδικτύου την σημερινή εποχή και στο μέλλον έπεται να διαδραματίσουν πιο σημαντικό ρόλο ακόμη. Σε κάποιες ανεπτυγμένες χώρες, μια σημαντική ανάπτυξη traffic πριν το 2025 καθοδηγείται από πλούσια video-services και επίσης ένα κύμα μακροπρόθεσμης ανάπτυξης θα συνεχιστεί λόγω της διείσδυσης των εφαρμογών επαυξημένης και εικονικής πραγματικότητας. Ο μέσος όρος κατανάλωσης δεδομένων για κάθε mobile χρήστη θα αυξηθεί από γύρω στα 5 GB το 2020 σε περίπου 250 GB το 2030. Επιπροσθέτως στην ανθρωποκεντρική επικοινωνία, η κλίμακα της επικοινωνίας μηχανής με μηχανή δεν θα κορεστεί νωρίτερα από το 2030. Προβλέπεται ότι ο αριθμός των μηχανή με μηχανή συνδρομών θα φτάσει τα 97 δισεκατομμύρια, περίπου 14 φορές περισσότερο από ότι το 2020. Γεγονός που εξυπηρετεί σαν άλλη μια δύναμη που καθοδηγεί προς εκρηκτική αύξηση του mobile traffic.[3]



Εικόνα 2 Estimated global mobile subscriptions and mobile traffic from 2020 to 2030.[3]

1.5 Πιθανές use cases

Με την έλευση νέων τεχνολογιών και συνεχόμενης εξέλιξης σε ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες, όπως holography, robotics, μικροηλεκτρονική, photo-electronics, τεχνητή νοημοσύνη και space technology, πολλές πρωτοεμφανιζόμενες εφαρμογές μπορούν να υιοθετηθούν στα κινητά δίκτυα. Για να τονίσουμε ρητά τα μοναδικά χαρακτηριστικά και να καθορίσουμε τις τεχνικές απαιτήσεις του 6G, προβλέπουμε διάφορες αντιπροσωπευτικές use cases όπως ακολουθούν παρακάτω.[3]

1.5.1 Holographic – Type Communication (HTC):

Συγκρίνοντας τα παραδοσιακά 3D videos τα οποία χρησιμοποιούν διόφθαλμη δίοπτρα, τα true holograms μπορούν να ικανοποιήσουν όλες τις οπτικές ενδείξεις παρατήρησης τρισδιάστατων αντικειμένων με γυμνό μάτι όσο το δυνατόν πιο φυσικό. Με μια σημαντική πρόοδο της τεχνολογίας ολογραφικής απεικόνισης τα τελευταία χρόνια όπως το HoloLens της Microsoft, προβλέπεται ότι η εφαρμογή της θα γίνει πραγματικότητα την επόμενη δεκαετία. Η απομακρυσμένη απόδοση ολογραμμάτων υψηλής ευκρίνειας, μέσω ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας, θα προσφέρει πραγματικά καθηλωτική εμπειρία. Για παράδειγμα, η ολογραφική telepresence θα επιτρέψει απομακρυσμένους συμμετέχοντες να

προβληθούν ως ολογράμματα σε μια συνάντηση δωματίου ή να επιτραπεί στον συμμετέχοντα τηλεεκπαίδευσης ή εκπαίδευσης ώστε να αλληλεπιδρά με το εξαιρετικά ρεαλιστικό δίκτυο κινητών αντικειμένων. Ωστόσο, η HTC οδηγεί σε τεράστιες απαιτήσεις εύρους ζώνης της τάξης των terabit ανά δευτερόλεπτο ακόμη και με συμπίεση εικόνας. Επιπλέον για να λάβουμε υπόψη τον ρυθμό καρτέ, την ανάλυση και το βάθος χρώματος σε διδιάστατο (2D) βίντεο, η ποιότητα του ολογράμματος περιλαμβάνει επίσης τα ογκομετρικά δεδομένα όπως κλίση, γωνία και θέση. Αν αναπαριστά ένα αντικείμενο με εικόνες κάθε 0,3°, ένα ολόγραμμα βασισμένο σε εικόνα με οπτικό πεδίο 30° και κλίση των 10° χρειάζεται μια διάταξη 2D με 3300 ξεχωριστές εικόνες. Το HTC απαιτεί επίσης εξαιρετικά χαμηλό λανθάνοντα χρόνο για πραγματική εμπύθιση και συγχρονισμό υψηλής ακρίβειας σε τεράστια πακέτα αλληλένδετων ρευμάτων για την ανακατασκευή ολογραμμάτων.[3]

1.5.2 Extended Reality (ER):

Συνδυάζοντας επαυξημένη, εικονική, και μικτή πραγματικότητα, η ER αρχίζει να μπαίνει στην πρακτική εφαρμογή- σε εποχή 5G, αλλά είναι ακόμα σε αρχικό στάδιο στην υπηρεσία βίντεο του διαδικτύου για κινητά. Για να επιτύχουμε το ίδιο επίπεδο ποιότητας εικόνας, συσκευές ER με οπτικό πεδίο 360° χρειάζονται πολύ υψηλότερα δεδομένα σε σύγκριση με τη ροή βίντεο 2D. Για μια ιδανική εμπειρία υπηρεσίας, ποιότητα βίντεο με υψηλότερη ανάλυση, υψηλότερος ρυθμός καρτέ, μεγαλύτερο βάθος χρώματος και υψηλή δυναμική απαιτούνται, οδηγώντας σε ζήτηση εύρους ζώνης άνω 1,6 Gbps ανά συσκευή. Παρόμοια με την κίνηση βίντεο που προκαλεί κορεσμό στα δίκτυα 4G, ο πολλαπλασιασμός των συσκευών ER θα αποκλειστεί από την περιορισμένη χωρητικότητα του 5G με peak rate των 20 Gbps, ειδικά στην άκρη του κελιού. Επιπρόσθετα στο εύρος ζώνης, διαδραστικές εφαρμογές ER όπως το immersive gaming, τηλεχειρουργική και remote industrial control , απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή αξιοπιστία.[3]

1.5.3 Tactile Internet:

Παρέχει εξαιρετικά χαμηλή end to end καθυστέρηση η οποία ικανοποιεί το χρόνο αντίδρασης που φτάνει το 1 ms ή λιγότερο αγγίζοντας το όριο της ανθρώπινης αίσθησης. Σε συνδυασμό με υψηλή αξιοπιστία, υψηλή διαθεσιμότητα, υψηλή ασφάλεια και μερικές φορές υψηλή ταχύτητα διακίνησης, ένα ευρύ φάσμα real-time desruptive εφαρμογών είναι ενεργοποιημένες. Θα παίξει κρίσιμο ρόλο στον τομέα της real-time παρακολούθησης και της απομακρυσμένης βιομηχανικής διαχείρισης για τη βιομηχανία 4.0 και Smart Grid. Για παράδειγμα με τις οπτικές ροές με καθηλωτικό ήχο που παρέχονται από τη ροή ER ή HTC, μαζί με δεδομένα απτικής ανίχνευσης, ένας χειριστής μπορεί από απόσταση να ελέγξει τα μηχανήματα σε ένα μέρος που περιβάλλεται από βιολογικά θερμικούς ή χημικούς κινδύνους, καθώς και εξ αποστάσεως ρομποτική χειρουργική μπορεί να διενεργηθεί από γιατρούς από εκατοντάδες μίλια μακριά. Ο τυπικός έλεγχος κλειστού βρόχου, ειδικά για συσκευές ή μηχανήματα που κινούνται γρήγορα, είναι πολύ ευαίσθητος στο χρόνο, όπου αναμένεται λανθάνουσα κατάσταση E2E κάτω από 1 ms.[3]

1.5.4 Multi – Sense Experience:

Ο άνθρωπος έχει πέντε αισθήσεις (όραση, ακοή, αφή, όσφρηση και γεύση) για την αντίληψη του εξωτερικού περιβάλλοντος, ενώ οι τρέχουσες επικοινωνίες επικεντρώνονται μόνο σε οπτικά (κείμενο, εικόνα και βίντεο) και ακουστικά (ήχος, φωνή, και μουσική) μέσα. Η εμπλοκή των αισθήσεων της γεύσης και της όσφρησης μπορεί να δημιουργήσει πλήρως καθηλωτική εμπειρία, η οποία μπορεί να φέρει μερικές νέες υπηρεσίες για παράδειγμα στα τρόφιμα και την βιομηχανία υφής. Επιπλέον, η εφαρμογή της απτικής επικοινωνίας θα παίξει πιο σημαντικό ρόλο και θα αυξήσει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών όπως τηλεχειρουργική, απομακρυσμένη διαχείριση και καθηλωτικό παιχνίδι. Αυτή η περίπτωση χρήσης φέρνει μια αυστηρή απαίτηση για χαμηλή καθυστέρηση.[3]

1.5.5 Digital Twin:

χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου και λεπτομερούς εικονικού αντίγραφου ενός φυσικού (γνωστού και ως πραγματικού) αντικείμενου. Το λογισμικό αντίγραφο είναι εξοπλισμένο με μια μεγάλη γκάμα από χαρακτηριστικά, πληροφορίες και ιδιότητες που σχετίζονται με το πρωτότυπο αντικείμενο. Ένα τέτοιο δίδυμο χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την κατασκευή πολλαπλών αντιγράφων ενός αντικείμενου με πλήρη αυτοματισμό και ευφυία. Η πρώιμη κυκλοφορία του digital twin έχει προσελκύσει σημαντική προσοχή πολλών βιομηχανιών και κατασκευαστών. Ωστόσο, η πλήρης ανάπτυξη του αναμένεται να υλοποιηθεί με την ανάπτυξη δικτύων 6G.[3]

1.5.6 Pervasive Intelligence:

Με την εξάπλωση των έξυπνων κινητών συσκευών και την εμφάνιση νέων συνδεδεμένων εξοπλισμών όπως ρομπότ, έξυπνα αυτοκίνητα, drones και VR γυαλιά, έξυπνες υπηρεσίες over-the-air αναμένεται να γνωρίσουν άνθιση. Αυτές οι έξυπνες εργασίες βασίζονται κυρίως σε παραδοσιακές υπολογιστικές τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης : όραση υπολογιστή, ταυτόχρονος εντοπισμός και χαρτογράφηση (SLAM), πρόσωπο και αναγνώριση ομιλίας, επεξεργασία φυσικής γλώσσας, έλεγχος κίνησης, για να αναφέρουμε μερικά. Για να ξεπεραστούν οι αυστηροί υπολογισμοί, οι περιορισμοί αποθήκευσης, ισχύος και απορρήτου σε κινητές συσκευές, τα δίκτυα 6G θα προσφέρουν διάχυτη νοημοσύνη με ένα AI-as-a-Service τρόπο με τη χρήση κατανεμημένων υπολογιστικών πόρων σε όλο το νέφος, το mobile edge και τις τελικές συσκευές, και καλλιεργώντας αποτελεσματική επικοινωνία εκπαίδευσης ML και παρεμβαλλόμενους μηχανισμούς. Για παράδειγμα, ένα ανθρωποειδές ρομπότ όπως ο Atlas από τη Boston Dynamics είναι δυνατό να εκφορτώνει το υπολογιστικό του φορτίο για SLAM προς την άκρη των υπολογιστικών πόρων, προκειμένου να βελτιωθεί η ακρίβεια της κίνησης, να παραταθεί η διάρκεια ζωής της μπαταρίας και να γίνει πιο ελαφρύ με την αφαίρεση ορισμένων ενσωματωμένων υπολογιστικών στοιχείων. Επιπρόσθετα στις εντατικές εργασίες υπολογισμού, η διάχυτη νοημοσύνη επίσης διευκολύνει εργασίες τεχνητής νοημοσύνης

ευαίσθητες στον χρόνο για να αποφευχθεί ο περιορισμός της καθυστέρησης του cloud computing όταν λαμβάνονται γρήγορες αποφάσεις ή απαντήσεις που απαιτούνται ανάλογα τις προϋποθέσεις.[3]

1.5.7 Ευφυείς Μεταφορές και Logistics:

Το 2030 και πέρα, εκατομμύρια αυτόνομα οχήματα και drones θα παρέχουν ασφαλή, αποτελεσματική και πράσινη μετακίνηση ανθρώπων και αγαθών. Τα συνδεδεμένα αυτόνομα οχήματα θα έχουν αυστηρές απαιτήσεις σχετικά με την αξιοπιστία και την καθυστέρηση για την εγγύηση της ασφάλειας επιβατών και πεζών. Μη επανδρωμένα οχήματα και σμήνος drones, θα αφήνουν ανοικτό το ενδεχόμενο για μια μεγάλη ποικιλία πρωτοφανών εφαρμογών, ενώ θα προκαλέσουν επίσης πολύ υψηλές απαιτήσεις για τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.[3]

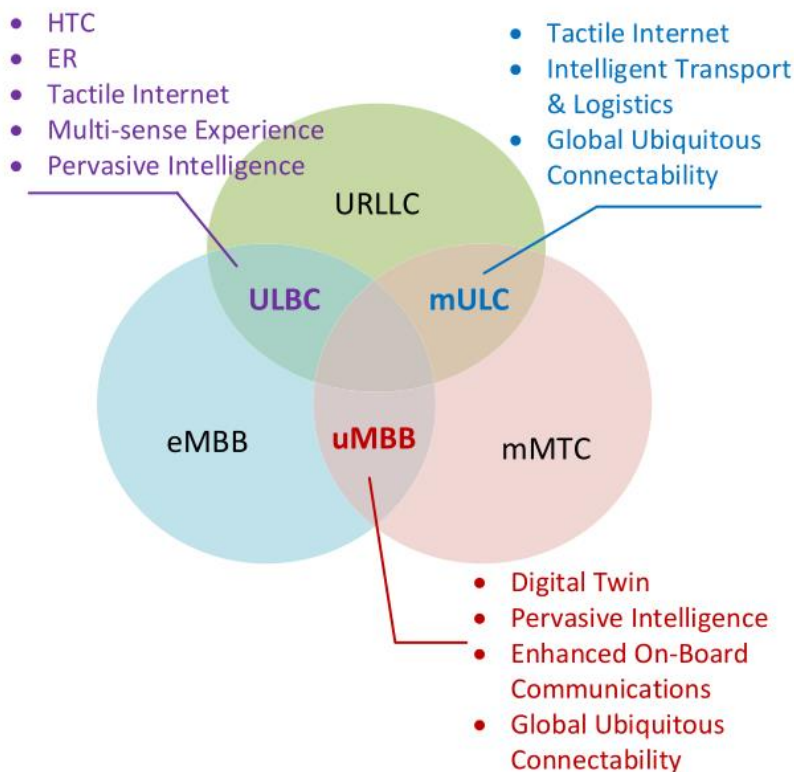
1.5.8 Enhanced On – Board Communications:

Με την ανάπτυξη της οικονομίας, η σφαίρα δραστηριότητας των ανθρώπων και η συχνότητα των κινήσεών τους θα αυξηθεί γρήγορα την επόμενη δεκαετία. Ο αριθμός των επιβατών που θα ταξιδεύουν μέσω εμπορικών αεροπλάνων, ελικοπτέρων, τρένων υψηλής ταχύτητας, κρουαζιερόπλοιων και άλλων οχημάτων, θα είναι τεράστια, φέρνοντας αυξανόμενες απαιτήσεις για επικοινωνία υψηλής ποιότητας. Παρά τις προσπάθειες στις προηγούμενες γενιές μέχρι το 5G, είναι αναμφισβήτητο ότι η ενσωματωμένη συνδεσιμότητα απέχει πολύ από το να είναι ικανοποιητική στις περισσότερες περιπτώσεις λόγω της υψηλής κινητικότητας, συχνό handover, αραιή κάλυψη των επίγειων δικτύων, περιορισμένο εύρος ζώνης και υψηλό κόστος των δορυφορικών επικοινωνιών. Βασιζόμενο σε τεχνολογίες επαναχρησιμοποίησης χώρου και μαζικής παραγωγής δορυφόρων, η ανάπτυξη δορυφορικού σχηματισμού μεγάλης κλίμακας όπως το Starlink του SpaceX το οποίο γίνεται πραγματικότητα, επιτρέποντας οικονομική και υψηλής απόδοσης παγκόσμια κάλυψη. Να κρατήσουμε αυτό κατά νου, το 6G αναμένεται να είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα επίγειων δικτύων, δορυφορικού σχηματισμού και άλλων εναέριων πλατφορμών για την παροχή απρόσκοπτης 3D κάλυψης, η οποία θα προσφέρει υψηλής ποιότητας, χαμηλού κόστους και global-roaming σε ευρεία κλίμακα υπηρεσίες επικοινωνίας.[3]

1.5.9 Global Ubiquitous Connectability:

Οι προηγούμενες γενιές κινητών επικοινωνιών επικεντρώνονται κυρίως σε πυκνές μητροπολιτικές περιοχές, ειδικά σε σενάρια εσωτερικών χώρων. Ωστόσο, ένας μεγάλος πληθυσμός σε απομακρυσμένες, αραιές και αγροτικές περιοχές δεν έχει καν πρόσβαση σε βασικές υπηρεσίες ΤΠΕ, δημιουργώντας μεγάλο ψηφιακό χάσμα μεταξύ των ανθρώπων σε όλο τον κόσμο. Επίσης, περισσότερο από το 70% της επιφάνειας της Γης καλύπτεται από νερό, όπου η ανάπτυξη των ναυτιλιακών εφαρμογών απαιτεί δικτυακή κάλυψη τόσο για την επιφάνεια του νερού όσο και για το βυθό. Ωστόσο, ubiquitous κάλυψη σε ολόκληρο τον πλανήτη με επαρκή χωρητικότητα, αποδεκτή ποιότητα υπηρεσιών (QoS) και προσιτή στο

κόστος, είναι ένα γεγονός που απέχει πολύ από την πραγματικότητα. Από τη μια πλευρά, τεχνικά είναι αδύνατο για τα επίγεια δίκτυα να καλύψουν απομακρυσμένες περιοχές και ακραίες τοπογραφίες όπως ωκεανούς, ερήμους και υψηλές ορεινές περιοχές, ενώ είναι πολύ δαπανηρό να προσφέρεις δοκιμαστικές υπηρεσίες επικοινωνίας για αραιοκατοικημένες περιοχές. Από την άλλη πλευρά, οι γεωστατικοί δορυφόροι της γης είναι ακριβοί στην ανάπτυξη και η χωρητικότητά τους περιορίζεται σε αρκετά Gbps ανά δορυφόρο, που προορίζεται μόνο για χρήστες υψηλού επιπέδου, όπως η ναυτιλιακή και η αεροναυπηγική βιομηχανία. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ανάπτυξη δορυφορικού σχηματισμού μεγάλης κλίμακας χαμηλής τροχιάς, θα επιτρέψει υπηρεσίες χαμηλού κόστους, παγκόσμιας επικοινωνίας και υψηλής απόδοσης. Τα 6G συστήματα προβλέπεται να κάνουν χρήση της συνέργειας των επίγειων δικτύων, των δορυφορικών σχηματισμών και άλλων εναέριων πλατφορμών ώστε να πραγματοποιήσουν την ubiquitous συνδεσιμότητα για παγκόσμιους χρήστες MBB και εφαρμογές IoT ευρείας περιοχής.[3]



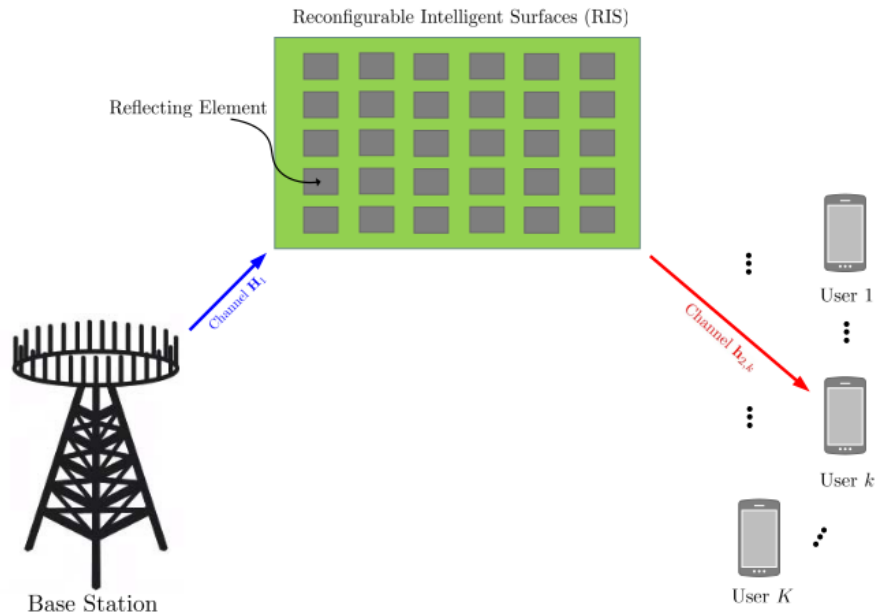
Εικόνα 3 typical 5G usage scenarios (eMBB, URRC, and mMTC).[3]

2 Περιγραφή του RIS

2.1 Εισαγωγή

Το RIS είναι μια meta-surface εξοπλισμένη με ενσωματωμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα τα οποία μπορεί να προγραμματιστούν για να μετατρέψουν ένα εισερχόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο με ένα εξατομικευμένο τρόπο. Αποτελείται από ένα ή μερικά επιπεδα στοίβας επιπέδων δομών τα οποία μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας μεθόδους λιθογραφίας και nano-printing. Κάθε μονάδα RIS είναι υλοποιημένη από αντανακλαστικές συστοιχίες οι οποίες προσλαμβάνουν varactor διόδους ή άλλα μικροηλεκτρικά-μηχανικά συστήματα, των οποίων η συχνότητα είναι ηλεκτρονικά ελγχόμενη. Οι μονάδες RIS οι οποίες λειτουργούν στο εισερχόμενο πεδίο μπορούν να διαδοθούν πάνω από μία meta-surface με συνέχεια και σε διακεκριμένες θέσεις.[1]

Ασχετα από την συγκεκριμένη υλοποίηση, αυτό που κάνει την RIS τεχνολογία ελκυστική συγκριτικά με μία ενεργειακά καταναλωτική μονάδα, είναι η δυνατότητα της ενίσχυσης και προώθησης του εισερχόμενου σήματος χωρίς την πρόσληψη κάποιας ενεργειακής ενίσχυσης, αλλά με το να σχεδιάζει τις μετακινήσεις φάσης με ομοιόμορφο τρόπο εφαρμόζοντας κάθε ανακλώμενο στοιχείο, με σκοπό να κατασκευάσει συνδυαστικά κάθε ανακλώμενο σήμα. Ξεκάθαρα, από τότε που κανένας ενισχυτής δεν χρησιμοποιείται, μια μονάδα RIS θα καταναλώνει πολύ λιγότερη ενέργεια από ένα συνηθισμένο ενισχύω-και-προωθώ(amplify-and-forward) αναμεταδότη. Ακόμη περισσότερο, οι RIS δομές μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν στο περιβάλλον επικοινωνίας, από τη στιγμή που το πολύ χαμηλό σε ίχνος υλικό που τα αποτελεί, επιτρέπει την εύκολη εγκαταστασή τους σε προσόψεις κτιρίων, δωμάτια, ταβάνια εργοστασίων, θήκες υπολογιστών, μέχρι και στα ρούχα των ανθρώπων. Από την άλλη πλευρά, η έλειψη ενισχυτή υποδηλώνει ότι το κέρδος από ένα RIS θα είναι μικρότερο από ότι μπορεί να επιτευχθεί από ένα AF αναμεταδότη με ένα αριθμο από κεραίες ίσο με τον αριθμό από ανακλώμενα στοιχεία της RIS μονάδας.[1]



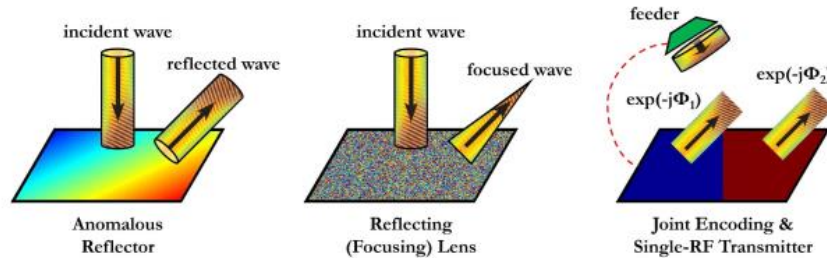
Εικόνα 4 The considered RIS-based multi-user MISO system.[1]

2.2 Reconfigurable Metasurfaces

Οι metasurfaces μπορούν είτε να είναι αναδιαρθρώσιμες, είτε όχι. Στις μη αναδιαρθρώσιμες μεταεπιφάνειες τα meta-atoms έχουν σταθερή δομή και διαστάσεις. Το οποίο ως αποτέλεσμα έχει την στατική διαδραστικότητα με τα προσκρούμενα ραδιοκύματα η οποία δεν μπορεί να τροποποιηθεί από τη στιγμή που οι meta-surfaces κατασκευάζονται. Στις αναδιαρθρώσιμες meta-surfaces υπάρχει περιθώριο τροποποίησης. Η δυνατότητα αναδιάρθρωσης μπορεί να ενεργοποιηθεί από ηλεκτρονικά συστατικά αλλαγής φάσης, όπως ημιαγωγούς ή γραφήνιο, τα οποία χρησιμοποιούνται σαν διακόπτες ή ρυθμιζόμενα, αντιδραστικά και αντιστατικά στοιχεία. Μπορούν είτε να εισέλθουν ανάμεσα σε meta-atoms είτε να καθορίσουν τις ιδιότητες των ξεχωριστών meta-atoms. Το μέτωπο ενός ραδιοκύματος το οποίο έχει μεταδοθεί από μια metasurface μπορεί να χειραγωγηθεί με το να ελεγχθεί η κατάσταση των διακοπών, και να μπορεί να βελτιστοποιηθεί μέσω ενός κεντρικού ελεγχτή βασισμένου σε δικτύωση οριζόμενη από το λογισμικό(SDN technology).[5]

Μια σημαντική διαφορά ανάμεσα στις στατικές και reconfigurable metasurfaces είναι κυρίως η κατανάλωση ενέργειας. Οι στατικές metasurfaces μπορούν να είναι τελείως παθητικές καθώς κανένα ενεργό ηλεκτρονικό κύκλωμα δεν απαιτείται. Οι αναδιαρθρώσιμες metasurfaces μπορούν να είναι σχεδόν παθητικές, από τη στιγμή που περισσότερη ενέργεια

χρειάζεται για να ελεγχθούν τα switches, και για να ληφθούν σήματα ελέγχου για την τροποποίησή τους. Από τη στιγμή που η metasurface είναι κατάλληλα τροποποιημένη, δεν χρειάζεται αφιερωμένος προμηθευτής ενέργειας για μετάδοση σήματος. Γενικά, το σύστημα ελέγχου των meta-atoms και του SDN-based ελεγκτή είναι σημαντικά συστατικά της RIS, τα οποία επηρεάζουν το βαθμό που η meta-surface είναι αναδιαρθρώσιμη.[5]



Εικόνα 5 Possible uses of reconfigurable intelligent surfaces.[5]

2.3 Εφαρμογές του RIS στις ασύρματες επικοινωνίες

Στις ασύρματες επικοινωνίες και δίκτυα, το RIS μπορεί να υιοθετηθεί με πολλούς τρόπους.[5]

2.3.1 Anomalous reflection/transmission

Το RIS έχει τροποποιηθεί ώστε να αντανακλά ή να διαθλά τα προσκρουόμενα ραδιοκύματα προς ενδεδειγμένες διαδρομές οι οποίες όχι απαραίτητα υπακούουν στους νόμους της αντανάλασης και διάθλασης. Το πλεονέκτημα αυτής της εφαρμογής είναι ότι η λειτουργία του RIS είναι ανεξάρτητη από ξεθωριασμένα κανάλια και τοποθεσίες δεκτών. Ο περιορισμός είναι ότι γενικά το signal-to-noise-ratio δεν μεγιστοποιείται και η χωρητικότητα του συστήματος δεν φτάνει στα όρια του.[5]

2.3.2 Beamforming/focusing

Το RIS είναι τροποποιημένο ώστε να κάνει focus στα προσκρουόμενα ραδιοκύματα προς συγκεκριμένες τοποθεσίες. Το πλεονέκτημα αυτής της εφαρμογής είναι ότι το signal-to-noise-ratio μεγιστοποιείται στις περιοχές ενδιαφέροντος. Η πρόκληση είναι ότι, εν γένει, η βελτιστοποίηση του RIS εξαρτάται από τα ξεθωριασμένα κανάλια και τις τοποθεσίες των δεκτών. Επίσης, η χωρητικότητα του συστήματος δεν φτάνει στο μέγιστο.[5]

2.3.3 Joint transmitter/RIS encoding

Το RIS είναι τροποποιημένο ώστε να βελτιστοποιεί την χωρητικότητα του συστήματος. Το πλεονέκτημα αυτής της εφαρμογής είναι ότι το συγκεκριμένο status των meta-atoms χρησιμοποιείται ώστε να καταμετρήσει περισσότερα δεδομένα. Η πρόκληση είναι ότι, εν γένει, ο πομπός και το RIS χρειάζεται να βελτιστοποιηθούν συγχρόνως. Επιπρόσθετα, η ρύθμιση του RIS εξαρτάται από τα ξεθωριασμένα κανάλια και τις τοποθεσίες των δεκτών.[5]

2.3.4 Single-RF multi-stream transmitter design

Αυτή η λειτουργία είναι παρόμοια με την προηγούμενη, με την διαφορά ότι ο πομπός είναι ένας απλός RF feeder τοποθετημένος σε κοντινή απόσταση από το RIS. Ο feeder εκπέμπει ένα μη μετρήσιμο φορέα προς το RIS, ο οποίος αντανakλά πολλαπλά data-modulated σήματα. Αυτή η προσέγγιση αρμόζει ώστε να συνειδητοποιήσουμε τους multi-stream πομπούς μέσω της πρόσληψης ενός περιορισμένου αριθμού RF chains.[5]

2.4 The advantages of RISs

2.4.1 Easy to deploy

Τα RIS είναι σχεδόν παθητικές συσκευές, κατασκευασμένες από ηλεκτρομαγνητικό υλικό. Τα RIS μπορούν να αναπτυχθούν σε διάφορες δομές, μεταξύ των οποίων σε προσόψεις κτιρίων, τοίχους εσωτερικών χώρων, εναέριες πλατφόρμες, διαφημιστικές πινακίδες στην άκρη του δρόμου, φωταγωγήσεις πησείς για αυτοκινητόδρομους, παράθυρα οχημάτων, καθώς και τα ρούχα των πεζών λόγω του χαμηλού κόστους.[2]

2.4.2 Spectral efficiency enhancement

Τα RIS είναι ικανά να επαναδιαμορφώσουν το περιβάλλον ασύρματης διάδοσης αντισταθμίζοντας την απώλεια ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις. Εικονικές συνδέσεις οπτικής επαφής (LoS) μεταξύ σταθμών βάσης (BS) και χρηστών κινητών μπορούν να σχηματιστούν μέσω παθητικής αντανάκλασης των προσκρούμενων ραδιοσημάτων. Η βελτιωμένη απόδοση αυξάνεται όταν η σύνδεση LoS μεταξύ των BS και των χρηστών εμποδίζεται από εμπόδια, π.χ. ουρανοξύστες. Λόγω της έξυπνης ανάπτυξης και σχεδιασμού των RIS, ένα ασύρματο περιβάλλον που ορίζεται από λογισμικό μπορεί να κατασκευαστεί, το οποίο με τη σειρά του παρέχει δυνατότητες βελτίωσης του ληφθέντος σήματος signal-to-interference-plus-noise ratio(SINR).[2]

2.4.3 Environment friendly

Σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα αναμετάδοσης σήματος, π.χ. ενίσχυση και προώθηση (AF) και αποκωδικοποίηση και προς τα εμπρός (DF), τα RIS είναι ικανά να διαμορφώσουν το εισερχόμενο σήμα ελέγχοντας τη μετατόπιση φάσης του καθενός

ανακλαστικού στοιχείου αντί να χρησιμοποιούν ενισχυτή ισχύος fier. Έτσι, η ανάπτυξη RIS είναι πιο ενεργειακά-αποτελεσματική και φιλική προς το περιβάλλον από τα συμβατικά AF και συστήματα DF.[2]

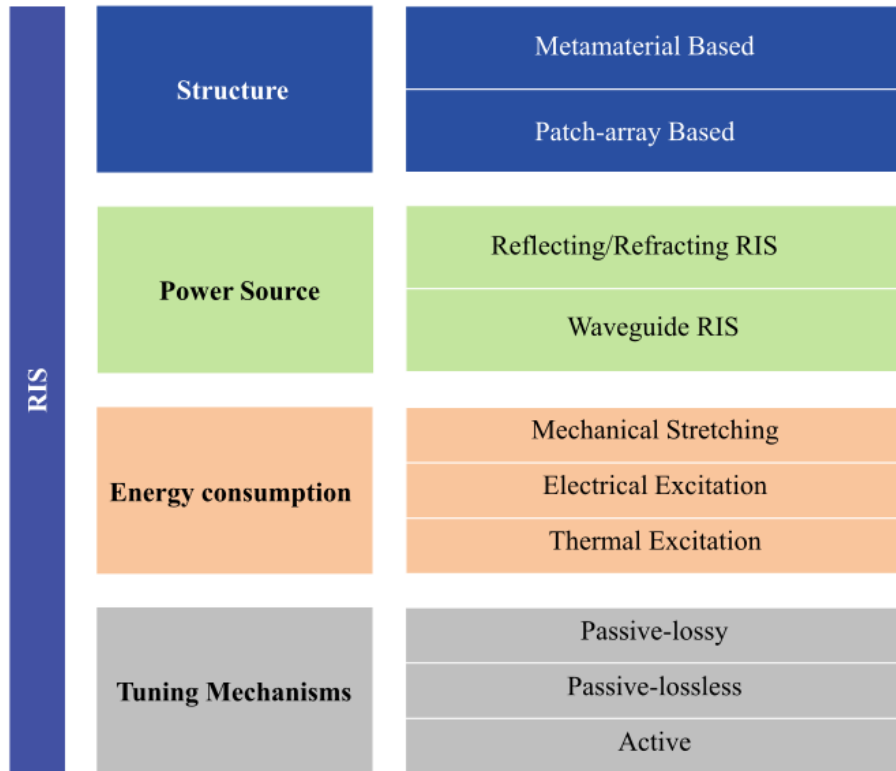
2.4.4 Compatibility

Τα RIS υποστηρίζουν full-duplex (FD) και full-band μετάδοση λόγω του γεγονότος ότι αντανακλούν μόνο τα EM κύματα. Επιπλέον, ενισχυμένα με RIS ασύρματα δίκτυα είναι συμβατά με τα πρότυπα και το υλικό των υφιστάμενων ασύρματων δικτύων.[2]

2.5 Διαφορετικές κατηγορίες RISs

2.5.1 Εισαγωγή

Λαμβάνοντας υπόψη τις δομές τους, τα RIS μπορούν να υλοποιηθούν χρησιμοποιώντας τεχνολογίες που βασίζονται σε μεταλλικά ή σε συστοιχίες κώδικα. Τα βασισμένα σε μεταλλικά RIS αποκαλούνται ως μεταεπιφάνειες. Ανεπτυγμένα σε διαφορετικές τοποθεσίες, τα RIS μπορούν να σχεδιαστούν για να λειτουργούν ως αντανακλαστικές επιφάνειες εισόδου/διάθλασης μεταξύ του BS και του χρήστη ή ως επιφάνειες-οδηγοί κυμάτων που λειτουργούν στο BS. Αναλογιζόμενοι το συντονισμό μηχανισμών, τα RIS μπορούν να διαμορφωθούν εκ νέου ηλεκτρικά, μηχανικά ή θερμικά. Ανάλογα με την ενεργειακή τους κατανάλωση, Τα RIS μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως παθητικά με απώλειες, παθητικά χωρίς απώλειες ή ενεργα. Η ενεργητική ή παθητική φύση των RIS καθορίζει τις απόλυτες δυνατότητες απόδοσης. Αξίζει να αναφερθεί ότι τα RIS δεν μπορούν να είναι εντελώς παθητικά εξαιτίας της εγγενούς τους ιδιότητας να έχουν δυνατότητα διαμόρφωσης. Παρακάτω αναφέρονται τρεις σημαντικές RIS λειτουργίες: waveguide, διάθλαση και ανάκλαση.[2]



Εικόνα 6 Different types of metasurfaces[2]

2.5.2 Waveguide RIS

Τα στοιχεία στις μεταεπιφάνειες μοντελοποιούνται ως μη συζευγμένα μαγνητικά δίπολα. Το μέγεθος κάθε διπολικού στοιχείου είναι ανάλογο με το προϊόν του κύματος αναφοράς και την πολωσιμότητα κάθε στοιχείου. Συντονίζοντας την πολωσιμότητα, η μεταεπιφανειακή κεραία μπορεί να εκπέμψει ακτινοβολία. Κάθε στοιχείο στη μετα-επιφάνεια χρησιμεύει ως μία μικρο-κεραία. Σε σύγκριση με τις συμβατικές συστοιχίες κεραιών, η συμπαγής μεταεπιφάνεια κυματοδηγού καταλαμβάνει λιγότερο χώρο και μπορεί να κάνει μετάδοση σε ευρύτερες γωνίες. [2]

2.5.3 Refracting RIS

Ένας θεωρητικός σχεδιασμός τέλεια διαθλώμενων και ανακλαστικών μεταεπιφανειών προταθηκε από μια ομάδα ερευνητών. Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν ένα ισοδύναμο μοντέλο μητρικής αντίστασης έτσι ώστε οι συνιστώσες του εφαπτόμενου πεδίου, στις δύο πλευρές της μεταεπιφάνειας, να είναι κατάλληλα βελτιστοποιημένες. Επίσης, συζητήθηκαν τρεις πιθανές υλοποιήσεις της συσκευής: αυτοταλαντευόμενες μεταεπιφάνειες τηλεμεταφοράς, μη τοπικές μεταεπιφάνειες και μεταεπιφάνειες που

δημιουργούνται από εξαρτήματα τα οποία δεν έχουν απώλειες. Επίσης συζητήθηκε ο ρόλος του omega-type bianisotropy στην υλοποίηση σχεδιασμού συστατικού, χωρίς απώλειες, τέλειων διαθλαστικών επιφανειών.[2]

2.5.4 Reflecting RIS

Τα στοιχεία στη μεταεπιφάνεια περιέχουν διόδους varactor με ρυθμιζόμενη τάση πόλωσης. Μέσω της πρόβλεψης διάφορων ψηφιοποιημένων επιπέδων τάσης πόλωσης, κάθε στοιχείο μπορεί να εφαρμόσει διακριτές μετατοπίσεις φάσης και να επιτύχει διαμόρφωση δέσμης για το ανακλώμενο κύμα.[2]

2.6 Smart Radio Enviroments

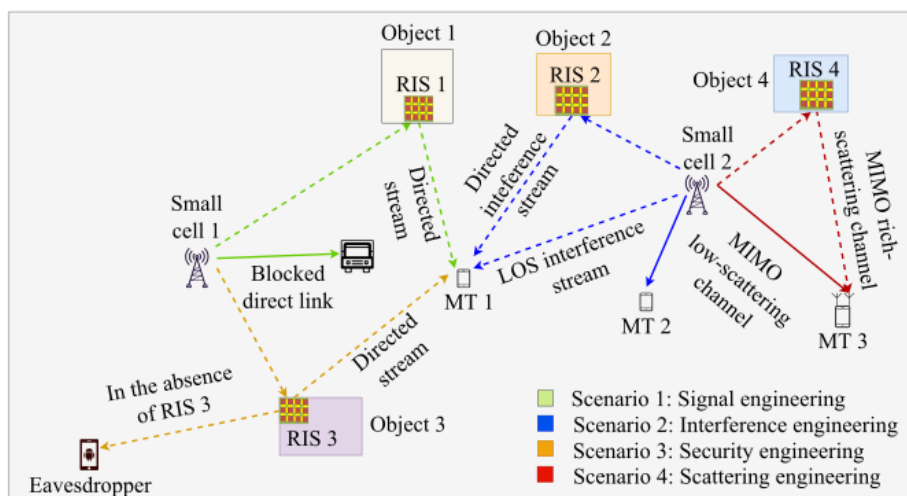
2.6.1 Από την προσαρμογή στον έλεγχο και στον προγραμματισμό

Από την άποψη ενός μηχανικού επικοινωνίας, το ασύρματο περιβάλλον μοντελοποιείται συμβατικά ως εξωγενής οντότητα που δεν μπορεί να ελεγχθεί, αλλά μόνο να προσαρμοστεί. Έτσι λοιπόν, οι μηχανικοί επικοινωνίας μπορούν να σχεδιάσουν μόνο τους πομπούς, τους δέκτες και τα πρωτόκολλα μετάδοσης με τη σειρά για την επίτευξη της επιθυμητής απόδοσης. Κοινές προσεγγίσεις για την αξιοποίηση των ιδιοτήτων του ασύρματου περιβάλλοντος και για τον μετριασμό των βλαβών του, περιλαμβάνουν τη χρήση πολλαπλών κεραίων, χρησιμοποιώντας πολύπλοκους αλγόριθμους κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης στα τελικά σημεία του συνδέσμου επικοινωνίας και προσθήκη πρόσθετων υποδομών δικτύου, π.χ. relays, σε μια προσπάθεια να γίνει η μετάδοση σημάτων πιο αξιόπιστη. Αυτές οι λύσεις, ωστόσο, μπορεί να αυξήσουν την πολυπλοκότητα του δικτύου, την κατανάλωση ενέργειας του δικτύου και το κόστος εγκατάστασης του δικτύου.[5]

Τα RIS παρέχουν στους ασύρματους ερευνητές και μηχανικούς μια διαφορετική άποψη του ασύρματου περιβάλλοντος. Δεδομένου ότι τα RIS είναι ικανά να διαμορφώνουν το μέτωπο κύματος των ραδιοκυμάτων σε όλο το δίκτυο, το ασύρματο περιβάλλον μπορεί κατ' αρχήν να προσαρμοστεί ώστε να ταιριάζει στις απαιτήσεις του συστήματος. Το ασύρματο περιβάλλον δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται ως τυχαία μη ελεγχόμενη οντότητα, αλλά μάλλον ως μέρος του σχεδιασμού των παραμέτρων του δικτύου που υπόκεινται σε βελτιστοποίηση προκειμένου να υποστηριχθούν διάφορες μετρήσεις απόδοσης, όπως ο ρυθμός, η καθυστέρηση, η αξιοπιστία, η ενεργειακή απόδοση, η ιδιωτικότητα και η μαζική συνδεσιμότητα. Το γενικό όραμα επικεντρώνεται κυρίως στην επικάλυψη περιβαλλοντικών αντικειμένων και σε συσκευές με ψηφιακά ελεγχόμενα RIS, και προγραμματίζοντάς τα μέσω της περιβαλλοντικής ανίχνευσης και του SDN που βασίζεται σε protocols, για τη διαμόρφωση της περιβαλλοντικής διάδοσης ραδιοφώνου και πληρώντας τις επιθυμητές απαιτήσεις του συστήματος.[5]

2.6.2 Χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός Smart Radio Enviroment

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ένα χαρακτηριστικό παραδειγμα ενώ περιγράφονται και 4 χαρακτηριστικά σενάρια.[5]



Εικόνα 7 Example of smart radio enviroment.[5]

2.6.3 Signal engineering

Ας υποθέσουμε ότι το μικρό κελί 1 επιθυμεί να επικοινωνήσει με το κινητό τεματικό (MT) 1, αλλά ο LOS σύνδεσμος μπλοκάρεται από ένα αντικείμενο. Σε αυτήν την περίπτωση, το μικρό κελί 1 ανακατευθύνει τη μεταδιδόμενη δέσμη προς το RIS 1 που επικαλύπτει το αντικείμενο 1 και βοηθά την επικοινωνία διαμορφώνοντας το περιστατικό κύματος προς το MT 1 έτσι ώστε η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος να μεγιστοποιείται.[5]

2.6.4 Interference engineering

Ενώ το μικρό κελί 1 επικοινωνεί με το MT 1, το μικρό κελί 2 επικοινωνεί με το MT 2. Επομένως, ένα σήμα παρεμβολής φτάνει στο MT 1 από το μικρό κελί 2. Για να το καταστείλει στο MT 1, το RIS 2 είναι προγραμματισμένο να διαμορφώνει το προσπίπτον ραδιοκύμα από το μικρό κελί 2 προς το MT 1 με τρόπο που τα δύο σήματα συνδυάζονται καταστροφικά στο MT 1.[5]

2.6.5 Security engineering

Ελλείπει RIS 3, το σήμα που εκπέμπεται από το μικρό κελί 1 και προορίζεται για το MT 1 αντανάκλαται από το αντικείμενο 3 προς έναν κακόβουλο χρήστη που το κρυφακούει. Για να αποφευχθεί αυτό, το RIS 3 είναι προγραμματισμένο να διαμορφώνει την αντανάκλαση προς το MT 1, έτσι ώστε να απομακρυνθεί από τον κακόβουλο χρήστη, ενώ και να αποκωδικοποιείται πιο αξιόπιστα μέσω της ποικιλίας συνδυασμών, στο MT 1.[5]

2.6.6 Scattering engineering

Η μικρή κυψέλη πολλαπλών κεραιών 2 επιθυμεί να μεταφέρει πληροφορίες στην πολλαπλή κεραία MT 3 με τη βοήθεια πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων μετάδοσης. Το κανάλι μεταξύ της μικρής κυψέλης 2 και της MT 3 έχει, ωστόσο, μια χαμηλή κατάταξη (περιβάλλον χαμηλής σκέδασης), η οποία επηρεάζει αρνητικά τον εφικτό ρυθμό δεδομένων. Για να αποφευχθεί αυτό το ζήτημα, το μικρό κελί 2 κατευθύνει το σήμα που προορίζεται στο MT 3 προς το RIS 4, το οποίο το διαμορφώνει κατάλληλα έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα πλούσιο περιβάλλον σκέδασης (κανάλι υψηλής κατάταξης) για υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.[5]

2.7 Reconfigurable Intelligent Surfaces vs Relays

Σε αυτή την ενότητα, αναλύονται διαφορές και ομοιότητες μεταξύ RIS που χρησιμοποιούνται ως ανώμαλοι ανακλαστήρες και ρελέ.[5]

2.7.1 Hardware Complexity

Τα ρελέ συνήθως θεωρούνται ως ενεργές συσκευές που χρειάζονται μια αποκλειστική πηγή ενέργειας για λειτουργία. Είναι εξοπλισμένα με ενεργά ηλεκτρονικά εξαρτήματα, όπως ψηφιακό σε αναλογικό μετατροπείς (DAC) και μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακό (ADC), μίκτες, ενισχυτές ισχύος για μετάδοση και ενισχυτές χαμηλού θορύβου για λήψη. Πολλά ηλεκτρονικά εξαρτήματα συνήθως απαιτούνται για την εφαρμογή αποκωδικοποίησης και προώθησης (DF) και αναμετάδοσης ενίσχυσης και προώθησης (AF). Η ανάπτυξη των ρελέ μπορεί, επομένως, να είναι δαπανηρή και ιδιαίτερα ενεργοβόρα για την υλοποίηση σχεδίων πολλαπλών κεραιών σε ζώνες συχνοτήτων χιλιοστών και υποχιλιοστών κυμάτων. Εάν, επιπλέον, τα FD relays χρησιμοποιούνται, η πολυπλοκότητα αυξάνεται περαιτέρω λόγω της ανάγκης εξάλειψης της αυτο-παρεμβολής από τον βρόχο χρησιμοποιώντας προσαρμοσμένες κεραιές και μεθόδους αναλογικής/ψηφιακής επεξεργασίας σήματος.[5]

Αντίθετα, τα RIS είναι στρώματα σύνθετου υλικού που είναι κατασκευασμένα από μεταλλικά ή διηλεκτρικά μπαλώματα τυπωμένα σε γειωμένο διηλεκτρικό υπόστρωμα. Η παραμετροποίησή τους διασφαλίζεται μέσω ηλεκτρονικών κυκλωμάτων χαμηλής ισχύος και χαμηλής πολυπλοκότητας (διακόπτες varactors). Τα RIS αναμένεται να είναι

χαμηλότερης πολυπλοκότητας από τα ρελέ, ειδικά στη μαζική παραγωγή και αν πραγματοποιούνται με τη χρήση φθηνών ηλεκτρονικών, καθώς συνήθως δεν απαιτούνται αποκλειστικοί ενισχυτές ισχύος, μίκτες και DAC/ADC. Ένα πρωτότυπο RIS μεγάλου μεγέθους κατασκευασμένο από 3.720 φθηνές κεραίες, υλοποιήθηκε πρόσφατα.[5]

2.7.2 Noise

Τα ενεργά ηλεκτρονικά εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται στα ρελέ ανταποκρίνονται στην παρουσία πρόσθετου θορύβου που επηρεάζει αρνητικά την απόδοση των συμβατικών πρωτοκόλλων αναμετάδοσης. Στην AF αναμετάδοση, για παράδειγμα, ο θόρυβος ενισχύεται στα ρελέ. Ο αντίκτυπος του πρόσθετου θορύβου μπορεί να μετριαστεί με τη χρήση DF αναμετάδοσης, σε βάρος της αποκωδικοποίησης και της επανακωδικοποίησης (αναγέννησης) του σήματος στους αναμεταδότες και αυξάνοντας την πολυπλοκότητα επεξεργασίας σήματος και την κατανάλωση ενέργειας. Στην FD αναμετάδοση, ο αντίκτυπος της υπολειπόμενης αυτο-παρεμβολής βρόχου επιδεινώνει περαιτέρω την απόδοση του συστήματος.[5]

Από την άλλη πλευρά, τα RIS που συμπεριφέρονται ως ανώμαλοι ανακλαστήρες δεν επηρεάζονται από τον πρόσθετο θόρυβο. Ωστόσο, μπορεί να επηρεάζονται από τους θορύβους φάσης. Εάν είναι σχεδόν παθητικά, επιπλέον, δεν μπορούν να ενισχύσουν ή να αναγεννήσουν τα σήματα.[5]

2.7.3 Spectral Efficiency

Η φασματική απόδοση των συστημάτων που υποβοηθούνται από αναμετάδοση εξαρτάται από το υιοθετημένο πρωτόκολλο διπλής όψης. Υπό αναμετάδοση HD, ο επιτεύξιμος ρυθμός γενικά μειώνεται κατά συντελεστή δύο, δεδομένου ότι χρησιμοποιούνται διαφορετικοί φυσικοί πόροι για τα δεδομένα που εκπέμπονται από τον πομπό και από το ρελέ. Ο από άκρο σε άκρο λόγος σήματος προς θόρυβο, από την άλλη πλευρά, μπορεί να αυξηθεί αξιοποιώντας ευνοϊκότερες συνθήκες διάδοσης για το αναμεταδοθέν σήμα, και με τον βέλτιστο συνδυασμό του άμεσου και αναμεταδιδόμενου σήματος. Στην αναμετάδοση FD, ο επιτεύξιμος ρυθμός δεν έχει μειωθεί κατά δύο φορές, αλλά το ρελέ επηρεάζεται από την υπολειπόμενη αυτο-παρεμβολή βρόχου, και τον δέκτη ο οποίος επηρεάζεται από τις παρεμβολές που δημιουργούνται από την ταυτόχρονη μετάδοση του πομπού και του ρελέ.[5]

Τα RIS που έχουν ρυθμιστεί να λειτουργούν ως ανώμαλοι ανακλαστήρες δεν υπόκεινται στον περιορισμό ημι-αμφίδρομης λειτουργίας και αυτο-παρεμβολής βρόχου. Επιπλέον, ο συντελεστής ανάκλασης επιφάνειας της μετα-επιφάνειας μπορεί να σχεδιαστεί με βέλτιστο τρόπο συνδυάζοντας τα σήματα που λαμβάνονται από τον πομπό και το RIS.[5]

2.7.4 Power Budget

Τα ρελέ απαιτούν μια ανεξάρτητη πηγή ισχύος, για να λειτουργήσουν, η οποία χρησιμοποιείται για τη μετάδοση των σημάτων (ισχύς RF) αλλά και για την παροχή ρεύματος στα ηλεκτρονικά τους στοιχεία. Αντίθετα, τα RIS είναι κατάλληλα για σχεδόν παθητικές υλοποιήσεις, αφού οι μη επαναδιαμορφώσιμες μετα επιφάνειες μπορούν να υλοποιηθούν με πλήρως παθητικά εξαρτήματα. Τα χαμηλής ισχύος ενεργητικά εξαρτήματα (διακόπτες ή varactors) χρειάζονται μόνο για να διασφαλίσουν την επαναδιαμόρφωσή τους. Επίσης, η χαμηλής ισχύος φύση των διακοπών και των varactors κάνει την χρήση συγκομιδής ενέργειας έναν κατάλληλο υποψήφιο για την πραγματοποίηση σχεδόν παθητικών υλοποιήσεων.[5]

Σε συστήματα με υποβοήθηση ρελέ, συνήθως θεωρείται ότι το σύνολο της ισχύς RF κατανέμεται μεταξύ του πομπού και του ρελέ, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί συνολικός περιορισμός ισχύος. Στα RISs, ο αναμεταδότης χρησιμοποιεί τη συνολική ισχύ RF. Επίσης, η ισχύς που ανακλάται και διασπείρεται από το RIS εξαρτάται από τη μετάδοσή του, η οποία μπορεί να βελτιστοποιηθεί μέσω ενός κατάλληλου σχεδιασμού της μεταεπιφάνειας. Στην ιδανική περίπτωση, η συνολική ισχύς που ανακλάται από ένα RIS είναι η ίδια με τη συνολική ισχύ του προσκρούμενου ραδιοκύματος.[5]

2.7.5 Average Signal-To-Noise Ratio VS. Number of Elements

Ας εξετάσουμε ένα ρελέ πολλαπλών κεραιών που χρησιμοποιεί μέγιστη βαρύτητα λόγου για λήψη και μετάδοση. Αν N κεραιές χρησιμοποιούνται στο ρελέ, ο μέσος όρος από άκρο σε άκρο σήματος προς θόρυβο αυξάνεται γραμμικά με το N . Από την άλλη πλευρά, ο μέσος όρος από άκρο σε άκρο σήματος προς θόρυβο ενός RIS κατασκευασμένου από N μεμονωμένες συντονιζόμενες κεραιές (ή N επαναδιαμορφώσιμες μεταεπιφάνειες που λειτουργούν ως ανώμαλοι ανακλαστήρες, καθέ μια από αυτές αποτελείται από έναν κατάλληλο αριθμό μετα-ατόμων για την πραγματοποίηση των επιθυμητών κυματομορφών) αυξάνει, στο μακρινό πεδίο του RIS, τετραγωνικά με το N , ενώ εξακολουθεί να υπόκειται στην αρχή της εξοικονόμησης ενέργειας. Στο κοντινό πεδίο του RIS, από την άλλη πλευρά, ο νόμος της κλιμάκωσης είναι διαφορετικός. Βασισμένο σε υπάρχοντα πρωτότυπα για εφαρμογές ασύρματης σύνδεσης, το N μπορεί να είναι της τάξης των μερικών χιλιάδων αν το RIS πραγματοποιείται με τη χρήση μεμονωμένων συντονισμένων φθηνών κεραιών και της τάξης των δεκάδων χιλιάδων αν βασίζεται σε μεταεπιφάνειες.[5]

Ο διαφορετικός νόμος κλιμάκωσης ως συνάρτηση του N μπορεί να γίνει κατανοητός ως εξής. Στα ρελέ, η διαθέσιμη ισχύς κατανέμεται μεταξύ των N κεραιών έτσι ώστε η συνολική ισχύς να διατηρείται σταθερή. Στο RIS, αντίθετα, κάθε συστατικό στοιχείο αντανακλά, μετά την κλιμάκωση του λαμβανόμενου σήματος από τη μετάδοση και χωρίς προσθήκη θορύβου, την ίδια ποσότητα ισχύος που λαμβάνεται από τον πομπό.[5]

Αξίζει να αναφερθεί ότι, η περισσότερη ευνοϊκή κλιμάκωση του νόμου ως συνάρτηση στο N δεν σημαίνει απαραίτητα ότι τα RIS υπερτερούν των ρελέ. Για έναν σταθερό περιορισμό συνολικής ισχύος, στην πραγματικότητα, η απώλεια διαδρομής ως συνάρτηση της απόστασης μετάδοσης δεν μπορεί να παραβλεφθεί.[5]

2.7.6 Average Signal-To-Noise Ratio VS. Transmission Distance

Για απλότητα και συνέπεια με τα αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία αναφέρονται στην επόμενη ενότητα, θεωρούμε ένα διδιάστατο χώρο όπου μια πηγή εκπέμπει κυλινδρικά ραδιοκύματα. Ένα ρελέ θεωρείται ότι βρίσκεται στην αρχική τοποθεσία. Ομοίως, διδιάστατο RIS μήκους $2L$ είναι κεντραρισμένο στην αρχή. Η απόσταση από τον πομπό στο ρελέ και στο κέντρο του RIS συμβολίζεται με d_{SR} και η απόσταση από το ρελέ και από το κέντρο του RIS προς τον δέκτη συμβολίζεται με d_{RD} . Χρησιμοποιώντας τη σημείωση στον Πίνακα 1, η λαμβανόμενη ισχύς σε συνάρτηση με την απόσταση μετάδοσης d μπορεί να γραφτεί ως $|E(d)|^2 \propto (kd)^{-1}$. [5]

TABLE 1. Rate (R) for relays and RISs.

Transmission frequency	f_c
Wavelength	λ
Wave number	$k = 2\pi/\lambda$
Electric field (distance d)	$ E(d) = E_0/\sqrt{kd}$ [17, Eq. (1)]
Transmit power (RIS)	P
Transmit power (relay)	$P_R = P/2$
Noise power (receiver)	N_0
Self-interference	$I_S = 10N_0P_R$
HD DF relay	$R = (1/2) \log_2 \left(1 + (P_R/N_0) E(d) ^2 \right)$
FD DF relay	$R = \log_2 \left(1 + (P_R/(N_0 + I_S)) E(d) ^2 \right)$
Ideal FD DF relay	$R = \log_2 \left(1 + (P_R/N_0) E(d) ^2 \right)$
RIS - General formula	$R = \log_2 \left(1 + (P/N_0) E_{\text{ris}}(d) ^2 \right)$
RIS - Mirror (exact)	$E_{\text{ris}}(d)$ in [17, Eq. (3)]
RIS - Mirror (short d)	$E_{\text{ris}}(d)$ in [17, Eq. (10)]
RIS - Mirror (long d)	$E_{\text{ris}}(d)$ in [17, Eq. (11)]
RIS - Lens (exact)	$E_{\text{ris}}(d)$ in [17, Eq. (3)] with $\mathcal{P}(x) = 0$

Εικόνα 8 Rate for Relays and RIS[5]

Σύμφωνα με αυτές τις παραδοχές, η ισχύς που λαμβάνεται από άκρο σε άκρο από τον ρελέ AF κλιμακώνεται με το αντίστροφο του γινομένου της απόστασης πομπού προς ρελέ και της απόστασης ρελέ προς δέκτη, δηλ. ως $(k_2 d_{SR} d_{RD})^{-1}$. Εξετάζοντας το αποτέλεσμα του θορύβου, η αναλογία σήματος προς θόρυβο από άκρο σε άκρο, τόσο του DF όσο και της αναμετάδοσης AF, κλιμακώνεται με το αντίστροφο της απόστασης του πιο αδύναμου από τα δύο μονοπάτια, δηλ. ως $\min\{(k d_{SR})^{-1}, (k d_{RD})^{-1}\}$. [5]

Η συνολική ισχύς που αντανακλάται από ένα RIS, και, ως εκ τούτου, ο νόμος κλιμάκωσης της λαμβανόμενης ισχύος ως συνάρτηση της απόστασης, εξαρτάται από τη σχέση μεταξύ του γεωμετρικού μεγέθους του RIS, του μήκους κύματος των ραδιοκυμάτων και της σχέσης απόστασης του πομπού-RIS και του RIS-δέκτη. [5]

2.7.7 Electrically large RISs

Αν το γεωμετρικό μέγεθος του RIS είναι αρκετά μεγάλο σε σύγκριση με το μήκος κύματος και με τις αποστάσεις μετάδοσης (d_{SR} και d_{RD}), το RIS συμπεριφέρεται, ασυμπτωτικά, ως ανώμαλος καθρέφτης. Σε αυτό το καθεστώς, η εξουσία που έλαβε από το RIS και η μέση αναλογία σήματος προς θόρυβο από άκρο σε άκρο στον δέκτη κλιμακώνεται, ως συνάρτηση της απόστασης, ως $(\alpha k d_{SR} + \beta k d_{RD})^{-1}$, όπου τα α και β εξαρτώνται από τις καθορισμένες γωνίες πρόσπτωσης και ανάκλασης των ραδιοκυμάτων. Συγκεκριμένα, ο μέσος όρος από άκρο σε άκρο λόγος σήματος προς θόρυβο στον δέκτη είναι, ασυμπτωτικά, ανεξάρτητος από το μήκος, $2L$, του RIS. [5]

2.7.8 Electrically small RISs

Εάν το μέγεθος του RIS δεν είναι αρκετά μεγάλο σε σύγκριση με το μήκος κύματος και με τις αποστάσεις μετάδοσης (d_{SR} και d_{RD}), το RIS συμπεριφέρεται, ασυμπτωτικά, ως διαχύτης. Στο καθεστώς αυτό, η λαμβανόμενη ισχύς και η μέση αναλογία σήματος προς θόρυβο από άκρο σε άκρο στον δέκτη κλιμακώνεται, σε συνάρτηση με την απόσταση, ως $4L^2 (d_{SR} d_{RD})^{-1}$. Αυτός είναι ο ίδιος νόμος κλιμάκωσης ως προς τη λαμβανόμενη ισχύ της αναμετάδοσης AF. Ιδιαίτερα, η μέση αναλογία σήματος προς θόρυβο από άκρο σε άκρο εξαρτάται από το μήκος, $2L$, του RIS. [5]

Η ανάλυση των μεγάλων ηλεκτρικά RIS είναι μια σχετική μελέτη περίπτωσης λόγω του μεγάλου γεωμετρικά μεγέθους που ορισμένες υλοποιήσεις των RIS μπορεί να έχουν. Ένα πρόσφατο πρωτότυπο RIS αναφέρθηκε, του οποίου το μέγεθος είναι 1 m^2 και του οποίου η συχνότητα λειτουργίας είναι $10,5 \text{ GHz}$, και εμφανίζεται να λειτουργεί σε μακρινό πεδίο σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 70 μέτρα με βάση αναλυτικούς τύπους και σε αποστάσεις της τάξης των 28 m με βάση πειραματικές μετρήσεις. Σε ένα τυπικό εσωτερικό περιβάλλον, η λαμβανόμενη ισχύς κλιμακώνεται με το άθροισμα των αποστάσεων, επιβεβαιώνοντας έτσι τη λειτουργία των RIS ως ανώμαλους καθρέφτες σε πρακτικά σενάρια λειτουργίας. [5]

2.7.9 Κυριότερα μηνύματα από τη σύγκριση

Με βάση τις εκτιμήσεις και τις περιπτώσιολογικές μελέτες που αναλύθηκαν στην προηγούμενη υποενότητα, είναι ενδιαφέρον να συγκρίνουμε τους νόμους κλιμάκωσης των RIS και των relays ως συνάρτηση της απόστασης μετάδοσης. Ας υποθέσουμε, για απλότητα, $d_{SR} = d_{RD} = d_0$, δηλ. το RIS/ρελέ βρίσκονται σε ίση απόσταση από τον πομπό και τον δέκτη. Επίσης, έστω το M_{ma} υποδηλώνει τον αριθμό των μετα-ατόμων του RIS και έστω λ/D με $D > 1$ την μεταξύ τους απόσταση. Έτσι, $2L = M_{ma} \lambda/D$ και ο μέσος όρος από άκρο σε άκρο σήματος προς θόρυβο κλίμακας αναλογίας, σε συνάρτηση με την απόσταση, έχουν ως εξής:[5]

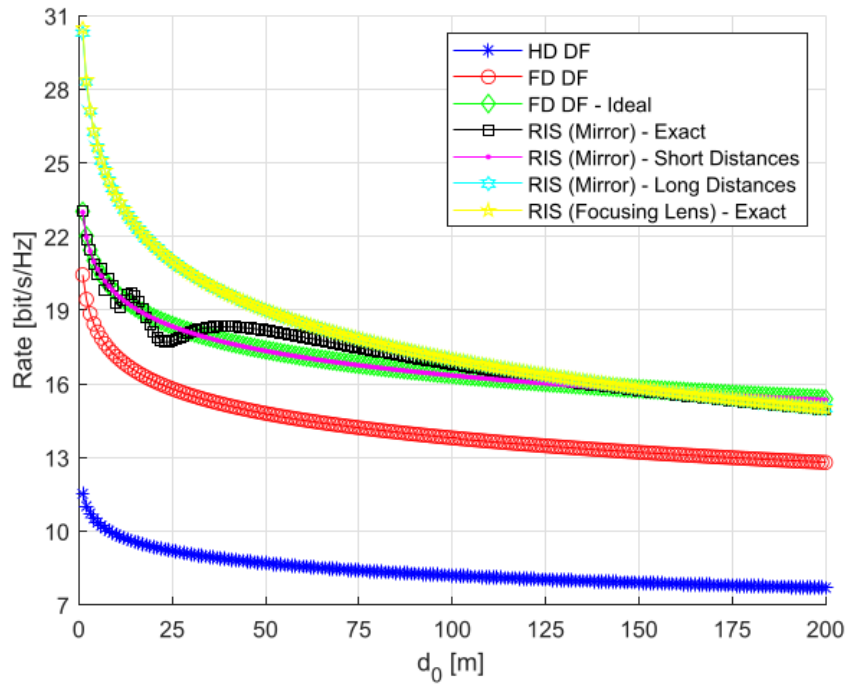
Μετάδοση με βοήθεια ρελέ: $\propto 1/d_0$

Ηλεκτρικά μεγάλο RIS: $\propto 1/(\alpha d_0 + \beta d_0)$

Ηλεκτρικά μικρό RIS: $\propto 4L^2 / d_0^2 \propto M_{ma} / d^2$

Κατά συνέπεια, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Μετάδοση με ρελέ και ηλεκτρικά μεγάλα RIS(δηλαδή, με μια μικρή κατάχρηση ορολογίας, για σύντομες αποστάσεις d_0) που προσφέρουν έναν παρόμοιο νόμο κλιμάκωσης ως συνάρτηση της απόστασης. Δεδομένου ότι τα RIS δεν υπόκεινται στον περιορισμό half-duplex και στην αυτο-παρέμβαση βρόχου, έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν καλύτερο ποσοστό από relays εάν, για ένα σταθερό μέγεθος του RIS, οι αποστάσεις δεν είναι τόσο μακριά.[5]



Εικόνα 9 Data rate of RISs and relays versus the transmission distance[5]

Σε σύγκριση με τα ρελέ, τα ηλεκτρικά μικρά RIS (δηλ. με μια μικρή κατάχρηση ορολογίας, για μεγάλες αποστάσεις d_0) προσφέρουν έναν λιγότερο ευνοϊκό νόμο κλιμάκωσης ως συνάρτηση της απόστασης. Ωστόσο, ο μέσος από άκρο σε άκρο λόγος σήματος προς θορύβο των ηλεκτρικά μικρών RIS κλιμακώνεται τετραγωνικά με το μέγεθός τους, δηλ. τετραγωνικά με το M αν διατηρηθεί το Δ σταθερό. Έτσι, ένα αρκετά μεγάλο RIS (αλλά και πάλι ηλεκτρικά μικρό) έχει τη δυνατότητα να αποδίδει καλύτερα με τη βοήθεια μετάδοσης ρελέ.[5]

2.8 Numerical results

Σε αυτήν την ενότητα, αναφέρουμε ορισμένες αριθμητικές απεικονίσεις προκειμένου να συγκριθούν ποσοτικά τα RIS και τα ρελέ. Για απλότητα, θεωρούμε $N = 1$, και υποθέτουμε ότι το RIS και το ρελέ βρίσκονται σε ίση απόσταση από τον πομπό και τον δέκτη. Όσον αφορά το ρελέ, τα αποτελέσματα λαμβάνονται χρησιμοποιώντας τους τύπους του πίνακα 1. Εστιάζουμε την προσοχή μας στην ανάλυση του ρυθμού δεδομένων, αλλά παρόμοιες μελέτες μπορούν να διεξαχθούν και για άλλες μετρήσεις απόδοσης, π.χ. για την πιθανότητα σφάλματος, την πιθανότητα διακοπής και την ποσότητα εξασθένισης. Για απλότητα, μόνο η αναμετάδοση DF λαμβάνεται υπόψη, καθώς παρέχει καλύτερο ρυθμό από την

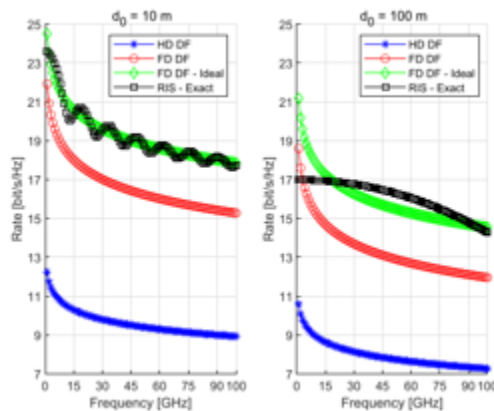
αναμετάδοση AF, και οι τάσεις απόδοσης είναι παρόμοιες. Γενικά, πιο προηγμένα πρωτόκολλα με βοήθεια αναμετάδοσης μπορεί να χρησιμοποιούνται με το κόστος της πολυπλοκότητας και η αναμετάδοση DF θεωρείται μόνο ένα ενδεικτικό παράδειγμα. Για σκοπούς σύγκρισης, ο Πίνακας 1 αναφέρει επίσης τον ρυθμό ενός ιδανικού ρελέ FD, στον οποίο θεωρείται ότι η υπολειπόμενη αυτο-παρεμβολή βρόχου είναι στο μηδέν. Υποτίθεται ότι υπάρχει συνολικός περιορισμός ισχύος. Από τη στιγμή που το ρελέ βρίσκεται σε ίση απόσταση από τον πομπό και τον δέκτη, η συνολική ισχύς κατανέμεται εξίσου μεταξύ του πομπού και του ρελέ. Γενικά, η ισχύς που εκχωρείται στον πομπό και το ρελέ πρέπει να βελτιστοποιηθεί σε συνάρτηση με τις θέσεις του πομπού, του ρελέ και του δέκτη. Όσο για το RIS, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου προκύπτει όπως αναφέρεται στον Πίνακα 1. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, θεωρείται ένα μοντέλο διδιάστατου συστήματος. Ως εκ τούτου, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου διασπάται με την τετραγωνική ρίζα της απόστασης. Η απόσταση μεταξύ του πομπού και του ρελέ και το κέντρο του RIS, και τα ρελέ και το κέντρο του RIS και του δέκτη συμβολίζεται με d_0 . Το RIS έχει μοντελοποιηθεί ως ευθεία γραμμή με κέντρο την αρχή, η οποία βλέπει τον πομπό και το δέκτη υπό γωνία 45 και 60 μοιρών σε σχέση με το κανονικό στην προέλευση, αντίστοιχα. Το συνολικό μήκος του RIS είναι $2L$. Ο λόγος σήματος προς θόρυβο σε απόσταση 1 m είναι $P/N_0 = 114$ dB.[5]

2.8.1 RISs vs Relays as a function of the transmission distance

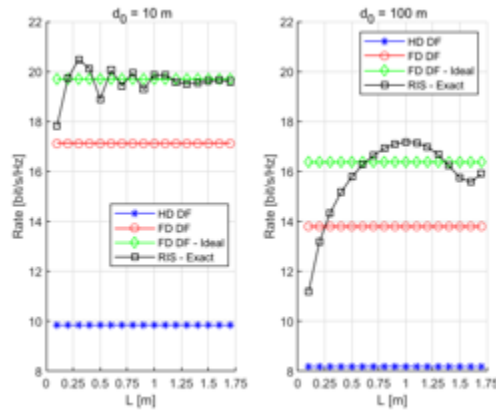
Στο Σχ. 3, συγκρίνουμε τον ρυθμό δεδομένων ενός RIS και ενός ρελέ ως συνάρτηση της απόστασης d_0 , υποθέτοντας ότι η συχνότητα μετάδοσης είναι ίση με $f_c = 28$ GHz. Για σύγκριση, το RIS έχει ρυθμιστεί να λειτουργεί ως ανώμαλος ανακλαστήρας και ως φακός εστίασης. Αυτή η τελευταία μελέτη περίπτωσης συζητείται στη συνέχεια. Το RIS έχει μήκος $2L = 1,5$ m, που αντιστοιχεί σε 140λ. Το σχήμα δείχνει ότι ένα RIS παρέχει ένα ποσοστό παρόμοιο με ένα ιδανικό ρελέ FD χωρίς την ανάγκη χρήσης ενισχυτή ισχύος. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στο μέγεθος (αποτελεσματικό μήκος) του RIS. Υποθέτοντας, για παράδειγμα, ότι η ενδιάμεση απόσταση μεταξύ των μετα-ατόμων του RIS είναι στην περιοχή $\lambda/5$ και $\lambda/2$, τα αποτελέσματα στο Σχ. 3 μπορούν να ληφθούν εάν το πλήθος των μετα-ατόμων του RIS είναι στην περιοχή $M_{ma} = 700$ και $M_{ma} = 280$, αντίστοιχα. Η συγκεκριμένη υλοποίηση εξαρτάται από την τεχνολογία που χρησιμοποιείται και από το εύρος που απαιτείται, για τις κατευθύνσεις για τις οποίες καθορίζονται ανώμαλες δυνατότητες ανάκλασης. Αξίζει να σημειωθεί ότι, με βάση το Σχ. 3, το υπό ανάλυση RIS συμπεριφέρεται ως ανώμαλο κάτοπτρο (δηλ. θεωρείται ηλεκτρικά μεγάλο) για αποστάσεις d_0 έως 25-50m και ως διάχυτος σκεδαστής (δηλαδή, θεωρείται ηλεκτρικά μικρό) για αποστάσεις d_0 μεγαλύτερες από 75-100 m. Η εικόνα 3 δείχνει, επιπλέον, ότι ένα ιδανικό ρελέ FD υπερτερεί του RIS για μεγάλες αποστάσεις μετάδοσης (μεγαλύτερες από 150 m στην εξεταζόμενη ρύθμιση). Για μεγάλες αποστάσεις μετάδοσης, ως εκ τούτου, μπορεί να χρειαστεί ένα μεγαλύτερο RIS για να έχει καλύτερη απόδοση από ένα ιδανικό ρελέ FD.[5]

2.8.2 RISs: Anomalous reflectors vs. Focusing lenses

Για πληρότητα, το Σχήμα 3 αναφέρει το ποσοστό ενός RIS που είναι έχει ρυθμιστεί να λειτουργεί ως φακός εστίασης. Στην τελευταία αυτή περίπτωση, η ένταση της λαμβανόμενης κλίμακας ισχύος ως συνάρτηση του γινομένου της απόστασης μεταξύ του πομπού και του RIS, και της απόστασης μεταξύ του RIS και του δέκτη. Όπως αναμενόταν, το Σχ. 3 δείχνει ότι ένα RIS, το οποίο έχει ρυθμιστεί να λειτουργεί ως φακός εστίασης, υπερτερεί, γενικά, από ένα RIS που έχει ρυθμιστεί να λειτουργεί ως ανώμαλος ανακλαστήρας. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι, στη ρύθμιση του Σχήματος 3, ένα RIS που λειτουργεί ως φακός εστίασης αποδίδει παρόμοια ποσοστά με την προσέγγιση μεγάλων αποστάσεων ενός RIS το οποίο λειτουργεί ως ανώμαλος ανακλαστήρας. Το τίμημα που πρέπει να πληρώσουμε για αυτό το κέρδος απόδοσης έγκειται στην ανάγκη εκτίμησης των ακριβών θέσεων του πομπού και του δέκτη, καθώς και στην ανάγκη προσαρμογής των φάσεων του RIS στα ασύρματα κανάλια. Ένας ανώμαλος ανακλαστήρας που βασίζεται σε μετα-επιφάνεια κλίσης φάσης απαιτεί από την άλλη τη γνώση μόνο των επιθυμητών κατευθύνσεων πρόσπτωσης και ανάκλασης των ραδιοκυμάτων. Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε, ωστόσο, ότι ένα αρκετά μεγάλο RIS που έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί ως απλή κλίση φάσης μεταεπιφάνειας είναι ικανό να έχει καλύτερη απόδοση από ένα ιδανικό ρελέ FD.[5]



Εικόνα 10 Data rate of RISs and relays versus the transmission frequency.[5]



Εικόνα 11 Data rate of RISs and relays versus the size of the RIS.[5]

2.8.3 RISs vs. Relays as a function of the carrier frequency

Στο Σχ. 4, συγκρίνουμε τον ρυθμό δεδομένων του RIS και του ρελέ ως μια λειτουργία της συχνότητας μετάδοσης f_c . Δύο αποστάσεις μετάδοσης λαμβάνονται υπόψη, οι οποίες μπορεί να είναι αντιπροσωπευτικά σενάρια εσωτερικού χώρου ($d_0 = 10$ m) και εξωτερικού χώρου ($d_0 = 100$ m). Το συνολικό μήκος του RIS είναι $2L = 1,5$ m. Αν $d_0 = 10$ m, λαμβάνουμε ευρήματα παρόμοια με το Σχ. 3. Αν $d_0 = 100$ m, Αντίθετα, η τάση απόδοσης είναι διαφορετική: Αν το f_c δεν είναι αρκετά μεγάλο (περίπου πάνω από 20 GHz στο εξεταζόμενο παράδειγμα), το μήκος του RIS είναι ανεπαρκές για να αποδώσει καλύτερα από ένα ιδανικό ρελέ FD. Σε αυτή την περίπτωση, λοιπόν, ένα ιδανικό ρελέ FD υπερτερεί ενός RIS στο κόστος της υψηλότερης πολυπλοκότητας και της κατανάλωσης ενέργειας. Σε υψηλότερες συχνότητες, από την άλλη πλευρά, ένα RIS παρέχει παρόμοια ποσοστά με ένα ιδανικό Ρελέ FD.[5]

2.8.4 RISs vs. Relays as a function of the size of the RIS

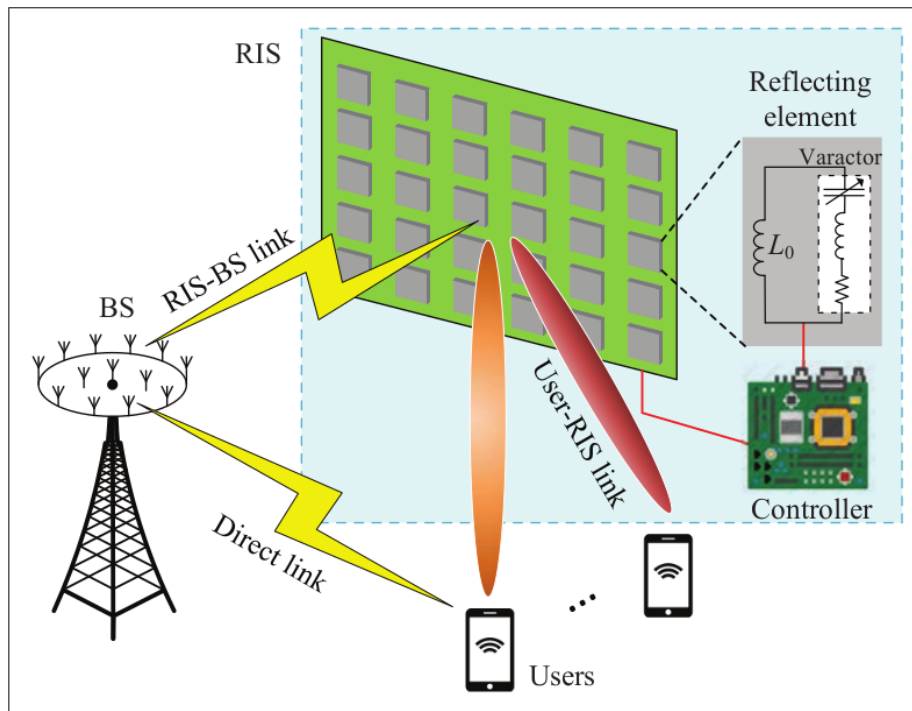
Στο Σχ. 5, συγκρίνουμε τον ρυθμό δεδομένων του RIS και του ρελέ ως συνάρτηση του μεγέθους του RIS L , υποθέτοντας $f_c = 28$ GHz. Παρόμοια με το Σχ. 4, αναλύονται δύο αποστάσεις μετάδοσης. Για άλλη μια φορά, παρατηρούμε ότι ένα RIS παρέχει παρόμοια ποσοστά όπως ένα ιδανικό ρελέ FD με την προϋπόθεση ότι είναι επαρκώς (ηλεκτρικά)μεγάλο σε σύγκριση με το μήκος κύματος λ . Αν $d_0 = 100$ m, για παράδειγμα, αυτό ισχύει εάν το μήκος του RIS είναι της τάξης του $L = 0,5-0,75$ m.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα Σχήματα 3-5 δείχνουν, για σύντομες αποστάσεις μεταδόσεων, ότι η τυπική και αναμενόμενη συμπεριφορά ταλάντωσης, που προκαλείται από το άθροισμα πολλών ταχέως ταλαντούμενων δευτερευόντων κυμάτων, όπου το καθένα έχει διαφορετική φάση, αντανακλάται από το RIS.[5]

3 Challenges

3.1 Channel Modelling and Channel Acquisition

Η μοντελοποίηση καναλιών συστημάτων MIMO με τη βοήθεια RIS δεν έχει γίνει ακόμη καλά κατανοητή. Ένα συμβατικό κανάλι MIMO συνήθως θεωρείται ότι είναι ένα μακρινό πεδίο, όπου τα EM κύματα προσκρούουν στην διάταξη κεραιών του σχεδόν παράλληλα, με την υπόθεση ότι η ραδιοφωνική πηγή, τα scatterers και ο δέκτης βρίσκονται αρκετά μακριά μεταξύ τους. Ωστόσο, μια πρόσοψη ενός κτιρίου ή η οροφή ενός δωματίου, επικαλυμμένη από μια παθητική συστοιχία κεραιών ενός RIS, μπορεί να έχει μέγεθος συγκρίσιμο με αυτό της απόστασής της από τους σταθμούς βάσης ή από τις κινητές συσκευές. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι ιδιότητες διάδοσης κοντά στο πεδίο της μοντελοποίησης του BS-RIS-user καναλιού. Άλλες ιδιότητες μετάδοσης, όπως οπτική επαφή (LoS)/non-LoS/narrow-band/broadband, και ούτω καθεξής, μπορούν επίσης να είναι ριζικά διαφορετικές για συστήματα MIMO που υποστηρίζονται από RIS σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα MIMO. Συμπεραίνουμε ότι χρειάζονται νέα μοντέλα για τον χαρακτηρισμό του περιβάλλοντος διάδοσης ενός MIMO που υποστηρίζεται από RIS σύστημα μεγαλύτερης ακρίβειας. Τα νέα μοντέλα ενθαρρύνουν επίσης τη χρήση νέων μαθηματικών εργαλείων για την απόκτηση καναλιών. Για παράδειγμα, παραγοντοποίηση πίνακα και συμπλήρωση πίνακα εμπλέκονται στον αλγόριθμο εκτίμησης διαδοχικών καναλιών.[4]



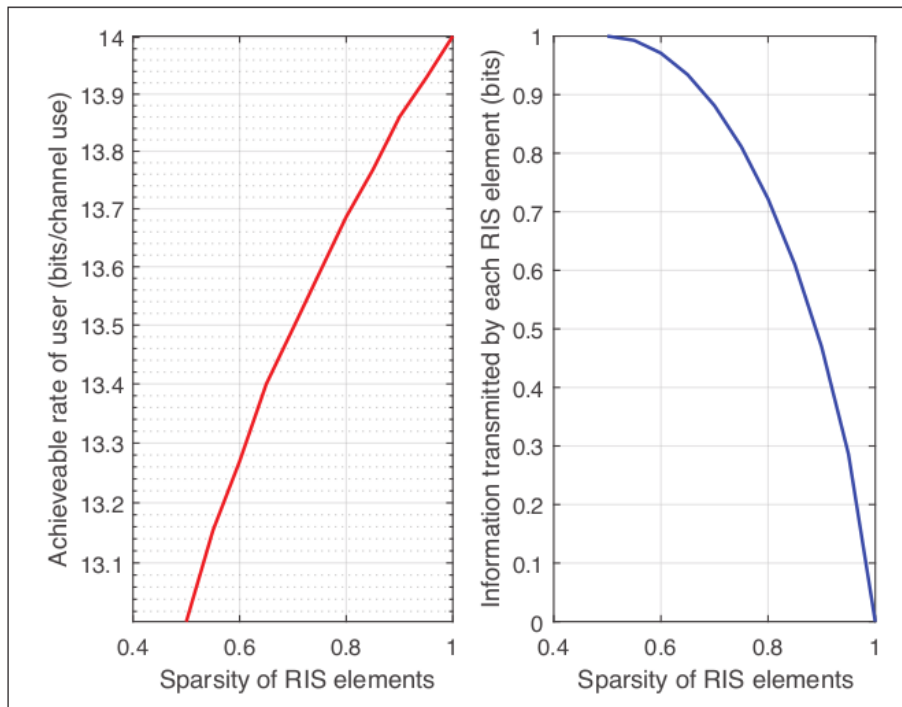
Εικόνα 12 A RIS-assisted massive MIMO system[4]

3.2 Σχεδιασμός συστήματος υπό αβεβαιότητα CSI

Οι υφιστάμενες μελέτες για το σχεδιασμό RIS-aided συστημάτων βασίζονται κυρίως στην υπόθεση του τέλει CSI, ώστε οι φάσεις των ανακλαστικών στοιχείων του RIS να μπορούν να προσαρμοστούν ομαλά με σκοπό να επιτύχουν την πιο ενισχυμένη απόδοση. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στην πράξη, η απόκτηση των διαδοχικών συνδέσεων καναλιών CSI είναι ένα δύσκολο πρόβλημα λόγω της περιορισμένων δυνατοτήτων επεξεργασίας σήματος του RIS. Ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός των συστημάτων που υποστηρίζονται από RIS, συμπεριλαμβανομένου του σχεδιασμού του πομποδέκτη και της βελτιστοποίησης της παθητικής διαμόρφωσης δέσμης στις ανάγκες του RIS, θα πραγματοποιηθούν υπό αβεβαιότητα CSI. Αξίζει να αναφερθεί ότι το παρωχημένο πρόβλημα CSI, ως ένα μοντέλο αβεβαιότητας CSI λόγω καθυστέρησης απόκτησης CSI, είναι πιο πιθανό να συμβεί σε συστήματα που υποστηρίζονται από RIS. Ο λόγος είναι ότι, εκτός από το CSI της άμεσης σύνδεσης, ένα μεγάλο ποσό των συντελεστών καναλιού από συνδέσμους χρηστών RIS και RIS-BS οι οποίοι πρέπει να παραδοθούν μεταξύ του πομποδέκτη και του RIS, προκαλεί πρόσθετη καθυστέρηση.[4]

3.3 RIS Design

Στο σχήμα PBIT, το RIS απαιτείται να ενισχύσει την κύρια επικοινωνία και ταυτόχρονα να παραδώσει τις ιδιωτικές του πληροφορίες. Στη συνέχεια, το πώς να εξισορροπήσει αυτές τις δύο λειτουργίες, γίνεται σημαντικό πρόβλημα για το σχεδιασμό του RIS. Μια απλή προσέγγιση είναι να χωρίσουμε όλα τα στοιχεία RIS σε δύο ομάδες, η μία για εκτέλεση παθητικής διαμόρφωση δέσμης και η άλλη για μεταφορά πληροφοριών. Ένα μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι τα στοιχεία RIS που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά πληροφοριών δεν συμβάλλουν στην ενίσχυση της κύριας επικοινωνίας. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος προτάθηκε να ενεργοποιηθεί η ταυτόχρονη παθητική διαμόρφωση δέσμης και μεταφορά πληροφοριών σε κάθε RIS στοιχείο, όπου η χωρική διαμόρφωση εφαρμόζεται για την παράδοση πληροφοριών. Η μέθοδος χωρικής διαμόρφωσης απενεργοποιεί τυχαία ένα τμήμα των στοιχείων RIS για την παράδοση πληροφοριών, η οποία γενικά θέτει σε κίνδυνο τις δυνατότητες ενίσχυσης της κύριας επικοινωνίας του RIS. [4]



Εικόνα 13 An illustration of the tradeoff between the achievable rate[4]

Μια απλή απεικόνιση της αντιστάθμισης μεταξύ του επιτεύξιμου ποσοστού του πρωτογενούς συστήματος και το ποσό των πληροφοριών που μεταφέρονται από κάθε στοιχείο RIS σε ένα υποβοηθούμενο από RIS σύστημα μονής εισόδου πολλαπλών εξόδων (SIMO) κάτω από το σχήμα PBIT δίνεται στην Εικ. 2. Βλέπουμε ότι, η αραιότητα των στοιχείων του RIS (δηλαδή, η πιθανότητα δυνατότητας ενεργοποίησης κάθε στοιχείου RIS) αυξάνεται από 0,5 έως 1. Ο επιτεύξιμος ρυθμός του πρωτοβάθμιου συστήματος αυξάνεται από περίπου 13 bit σε 14 bit, ενώ η πληροφορία που μεταφέρεται από κάθε στοιχείο RIS μειώνεται από το 1 bit στο 0. Μια βαθύτερη κατανόηση του συμβιβασμού μεταξύ της ικανότητας μεταφοράς παθητικής πληροφορίας και παθητικής διαμόρφωσης δέσμης κερδίζει έδαφος για επείγουσα έρευνα.[4]

Ο σχεδιασμός παθητικής διαμόρφωσης δέσμης στο PBIT σχήμα περιλαμβάνει γενικά στοχαστική βελτιστοποίηση δεδομένου ότι οι μεταφερόμενες πληροφορίες εισάγουν τυχαίους αντανακλούμενους συντελεστές του RIS. Η επίλυση στοχαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης είναι πολύ πιο δύσκολη παρά την επίλυση ντετερμινιστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης τα οποία εμπλέκονται στον παραδοσιακό σχεδιασμό διαμόρφωσης δέσμης. Επιπρόσθετα, διάφορα κριτήρια σχεδιασμού ως προς το φάσμα και την απόδοση ισχύος θα λαμβάνονται υπόψη στον ορισμό των προβλημάτων.[4]

3.4 Joint Transceiver and RIS Design

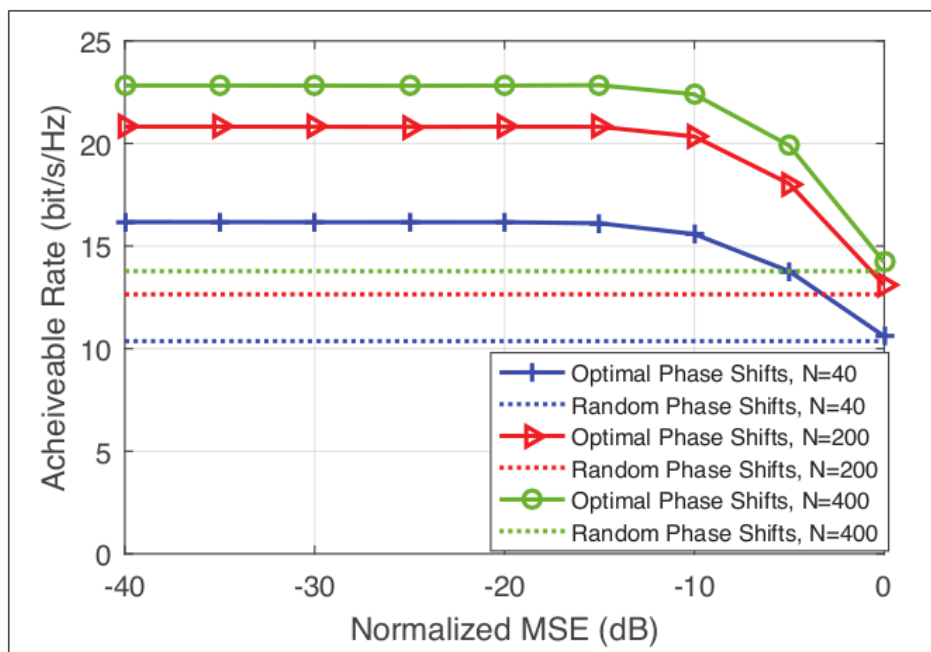
Αρχίζουμε με την πλευρά του πομπού. Σε μαζικά υποβοηθούμενο από RIS σύστημα MIMO, η ενεργή σχεδίαση διαμόρφωσης δέσμης στον πομπό πρέπει να βελτιστοποιηθεί μαζί με την παθητική διαμόρφωση δέσμης στο RIS για να επιτευχθεί γενικά βέλτιστη απόδοση του συστήματος. Στο PBIT σχήμα, ο σχεδιασμός κοινής ενεργητικής και παθητικής διαμόρφωσης δέσμης είναι ιδιαίτερα δύσκολος λόγω της ανάγκης για στοχαστική βελτιστοποίηση που προκαλείται από τυχαίες πληροφορίες του RIS.[4]

Ο παραλήπτης του σχήματος PBIT απαιτείται να ανακτήσει τις πληροφορίες τόσο από το RIS όσο και από τους πομπούς. Τα σήματα από τους πομπούς του RIS πολλαπλασιάζονται μαζί, καταλήγοντας σε διγραμμικά προβλήματα ανίχνευσης σήματος. Αυτό οδηγεί τους σχεδιαστές σε νέες τεχνικές στατιστικές για διγραμμικά μοντέλα.[4]

Από την άποψη της θεωρίας της πληροφορίας, το σύστημα PBIT μπορεί να μοντελοποιηθεί με πολλαπλασιαστικό κανάλι πολλαπλής πρόσβασης. Η χωρητικότητα ενός τέτοιου καναλιού δεν είναι καλά κατανοητή μέχρι στιγμής. Ο κοινός σχεδιασμός κωδικοποίησης καναλιού και στρατηγικής διαμόρφωσης δέσμης στον πομπό και στο RIS, μαζί με τους αλγόριθμους ανίχνευσης και αποκωδικοποίησης στο δέκτη, θέτει ένα εξαιρετικά απαιτητικό έργο που αξίζει περαιτέρω έρευνας.[4]

3.5 Low-Complexity robust system design

Το άνευ προηγουμένου κέρδος χωρητικότητας που έφεραν τα RIS έχει υψηλό υπολογιστικό κόστος. Όπως συζητήθηκε νωρίτερα, για να μειωθεί σημαντικά η επιβάρυνση της εκπαίδευσης, απαιτούνται μέθοδοι συμπερασμάτων Bayesian για να γίνει παραγοντοποίηση απευθείας στους πίνακες διαδοχικών καναλιών, αποδίδοντας πολύ μεγαλύτερη υπολογιστική πολυπλοκότητα από τις παραδοσιακές μεθόδους εκτίμησης καναλιών. Ομοίως, η κοινή βελτιστοποίηση της RIS φάσης μετατοπίζεται και ο σχεδιασμός του πομποδέκτη οδηγεί σε μεγάλη κλιμάκωση μη κυρτών προβλημάτων βελτιστοποίησης, τα οποία είναι δύσκολο να λυθούν ειδικά όταν το μέγεθος του RIS μεγαλώνει. Αυτή η ενότητα συζητά τον συμβιβασμό μεταξύ της απόδοσης του συστήματος και του υπολογιστικού κόστους.[4]

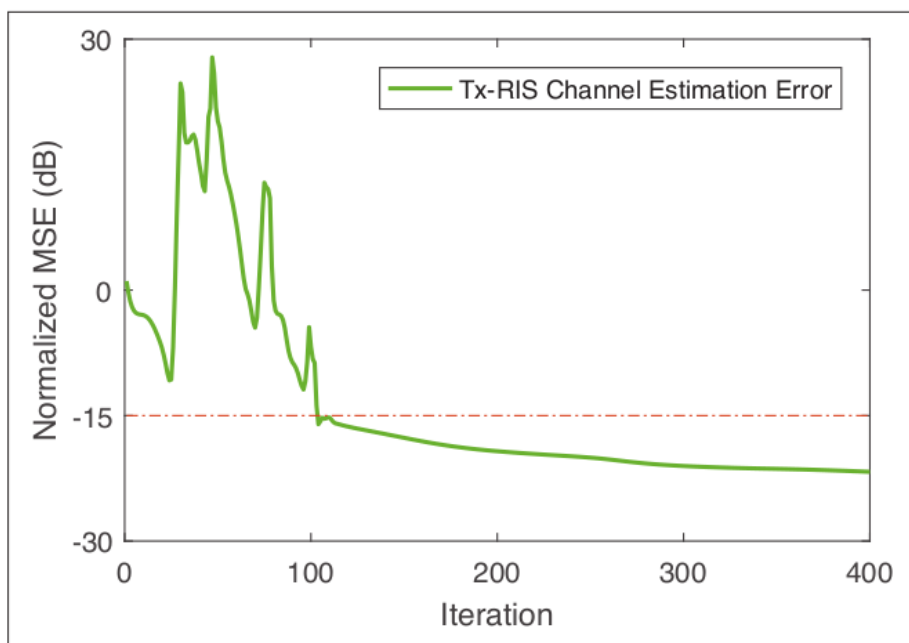


Εικόνα 14 Achievable rate versus channel estimation error in a RIS assisted[4]

3.6 Robustness against channel estimation errors

Το σχήμα 3 απεικονίζει την ευρωστία του επιτεύξιμου ρυθμού δεδομένων σε σχέση με την εκτίμηση του καναλιού σφάλματος 2. Αυτό το σχήμα δείχνει ότι η απώλεια του ρυθμού δεδομένων είναι αμελητέα όταν το κανονικοποιημένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) είναι τόσο μεγάλο όσο -10 dB. Αυτό συμβαίνει επειδή ένας μεγάλος αριθμός στοιχείων RIS αντισταθμίζει την ανάγκη για ακριβή βαθμονόμηση φάσης. Η σχετικά μεγάλη ανοχή

σφαλμάτων θα μας επέτρεπε να βάλουμε τον αλγόριθμο εκτίμησης καναλιών από νωρίς να σταματά όταν το MSE πέσει σε αποδεκτό επίπεδο. Για να το δούμε αυτό, το σχήμα 4 απεικονίζει τη σύγκλιση του αλγόριθμου μετάδοσης μηνυμάτων για Bayesian παραγοντοποίηση. Το σχήμα δείχνει ότι ο αλγόριθμος επιτυγχάνει -15dB κανονικοποιημένο MSE πολύ γρήγορα μέσα στις πρώτες 100 επαναλήψεις. Ωστόσο, για να αυξήσουμε περαιτέρω την ακρίβεια στα -20 dB, χρειάζονται περισσότερες από 400 επαναλήψεις. Λαμβάνοντας υπόψη τη σιβαρότητα απόδοσης στο Σχ. 3, μπορούμε με ασφάλεια να σταματήσουμε τον αλγόριθμο στην 100η επανάληψη χωρίς να περιμένουμε να συγκλίνει πλήρως ο αλγόριθμος.[4]



Εικόνα 15 MSE vs. message passing iterations in the matrix calibration based.[4]

Η παραπάνω παρατήρηση οδηγεί φυσικά στην ερώτηση: Πόσο υπολογιστικό κόστος θα έχουμε ξοδέψει σε διαδοχική εκτίμηση καναλιών; Για να απαντήσουμε στην ερώτηση αυτή, είναι κρίσιμο να αναζητήσουμε τις ακόλουθες θεμελιώδεις κατανοήσεις:[4]

Πώς να χαρακτηρίσουμε τη σχέση μεταξύ των μετρήσεων απόδοσης (όπως ο εφικτός ρυθμός δεδομένων και η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας) και της ακρίβειας CSI.[4]

Πώς να παρακολουθούμε αναλυτικά την εξέλιξη του MSE στους επαναληπτικούς αλγόριθμους συμπερασμάτων Bayes.[4]

Επιπλέον, η ευρωστία των συστημάτων που υποστηρίζονται από RIS έναντι σφαλμάτων CSI παρακινεί νέους σχεδιασμούς καναλιών που κυριαρχούν στο LoS. Ως κανάλι LoS-dominant συνήθως περιέχει ένα κυρίαρχο στοιχείο LoS και πολλαπλά ασήμαντα στοιχεία που δεν είναι LoS, εμείς μόνο πρέπει να εκτιμήσουμε τη διαδρομή LoS χρησιμοποιώντας τους αντίστοιχους αλγόριθμους εκτίμησης χαμηλής πολυπλοκότητας (π.χ. αξιοποιώντας δομικές πληροφορίες καναλιού όπως π.χ χαμηλή κατάταξη του στοιχείου LoS ή/και της πληροφορίας της τοποθεσίας του χρήστη) για να προσεγγίσουμε την απόδοση με ακρίβεια CSI. Στην περίπτωση αυτή, το ποσοστό δεδομένων που προκύπτει είναι ισχυρό έναντι της απώλειας πληροφοριών από τα στοιχεία του καναλιού που δεν είναι LoS.[4]

3.7 Robustness against low-resolution phase shifts

Στην πράξη, οι μετατοπίσεις φάσης RIS μπορούν να λάβουν μόνο διακριτές τιμές λόγω των πεπερασμένων επιπέδων κβαντισμού του υλικού, ανάγοντας τη βελτιστοποίηση του RIS προβλήματος σε ένα δυσεπίλυτο μικτό-ακέραιο μη κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Για μείωση των γενικών εξόδων υλικού και κόστους σηματοδότησης ελέγχου, πρόσφατες μελέτες έχουν διερευνήσει την ευρωστία της απόδοσης του συστήματος σε σχέση με την κβαντοποίηση χαμηλής ανάλυσης. Έχει αποδειχθεί ότι η υποβάθμιση της χωρητικότητας είναι κάτω από 1 bit/s/Hz όταν ο αριθμός των bit κβαντοποίησης μειώνεται από το άπειρο σε 2. Πράγματι, ο χαρακτηρισμός του αντικτύπου της κβαντοποίησης χαμηλής ανάλυσης της συνολικής απόδοσης του συστήματος θα είναι ένα προκλητικό αλλά σημαντικό ερευνητικό θέμα. [4]

Η κβαντοποίηση χαμηλής ανάλυσης επιτρέπει το σχεδιασμό του αλγορίθμου βελτιστοποίησης χαμηλής πολυπλοκότητας λόγω του περιορισμένου αριθμού υποψήφιων λύσεων. Επιπλέον σε συμβατικούς αλγόριθμους προγραμματισμού ακεραίων, η κβαντοποίηση χαμηλής ανάλυσης δίνει τη δυνατότητα του σχεδιασμού αλγορίθμων που βασίζονται στην ενίσχυση της μάθησης με πολύ μειωμένο χώρο δράσης.[4]

3.8 Ris-Aided edge intelligence

Ευφυΐα άκρων, συμπεριλαμβανομένης της προσωρινής αποθήκευσης άκρων, η πληροφορική αιχμής και η εκμάθηση αιχμής είναι προηγμένες τεχνολογίες για την ανακούφιση της κίνησης των δεδομένων των δικτύων με τη χρήση των μονάδων αποθήκευσης σε διακομιστές άκρων, για την επίλυση του προβλήματος του υπολογιστικού λανθάνοντος χρόνου υψηλής ταχύτητας απαιτητικών συσκευών μέσω υπολογιστικής εκφόρτωσης, και για την εγγύηση της ιδιωτικότητας και της ασφάλειας των μεγάλων σε ανάλυση δεδομένων προσθέτοντας υπολογιστικές και μαθησιακές λειτουργίες σε δίκτυα ραδιοπρόσβασης. Ωστόσο, η χρήση της ευφυΐας αιχμής βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην τοπολογία του κατοικημένου δικτύου και τον περιορισμένο ενεργειακό προϋπολογισμό των ακραίων συσκευών. Για να σχεδιάσουμε στρατηγικές παράδοσης περιεχομένου

αποτελεσματικής επικοινωνίας για ένα δίκτυο προσωρινής αποθήκευσης αιχμής και στρατηγικές ανακάτευσης δεδομένων για συστήματα υπολογιστών αιχμής, το RIS παρέχει μια πολλά υποσχόμενη λύση για βελτίωση του επιτεύξιμου βαθμού ελευθερίας αντιμετωπίζοντας καναλία με έλλειψη κατάταξης και μετριάζοντας την παρεμβολή του συν-καναλιού. Αυτό επιτυγχάνεται βελτιώνοντας τη σκοπιμότητα της παρέμβασης των συνθηκών ευθυγράμμισης μέσω ενεργού ελέγχου του περιβάλλοντος δικτύου. Το RIS μπορεί επίσης να ενισχύσει την ισχύ του ληφθέντος σήματος για υπολογισμό over-the-air στη διαδικασία προγραμματισμού χρήστη, ως εκ τούτου επιτρέποντας τη συγκέντρωση καθολικών μοντέλων χαμηλής καθυστέρησης στην εκμάθηση αιχμής. Αυτό επιτυγχάνεται με έξυπνο τρόπο συντονισμού των φάσεων των προσπίπτοντων EM κυμάτων και αξιοποιώντας την ιδιότητα υπέρθεσης κυματομορφής ενός ασύρματου καναλιού πολλαπλής πρόσβασης για προσαρμογή στο τοπικό μοντέλο ενημερώσεων, βελτιώνοντας έτσι την πολιτική προγραμματισμού για γρήγορη εκμάθηση αιχμής.[4]

Οι τυπικές αναπτύξεις του ομοσπονδιακού άκρου μάθησης περιλαμβάνουν σύστημα διακομιστή, ιεραρχικό σύστημα, και αποκεντρωμένο σύστημα, για το οποίο το RIS παρέχει έναν πολλά υποσχόμενο τρόπο για την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης εκπαίδευσης λαμβάνοντας υπόψη την ετερογένεια σε όρους κατανομών δεδομένων, μεγέθη μοντέλων, επικοινωνίας και υπολογιστικών πόρων. Αυτό επιτυγχάνεται με τον κοινό σχεδιασμό κατανεμημένης μάθησης και υποβοηθούμενης από IRS τεχνικές ασύρματης δικτύωσης.[4]

3.9 RIS-Aided Physical-Layer Security

Η ασφάλεια των ασύρματων δικτύων είναι ζωτικής σημασίας δεδομένου ότι τα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο για μια ευρεία γκάμα εφαρμογών ευαίσθητων στην ασφάλεια, συμπεριλαμβανομένων ενδεικτικά στον τραπεζικό τομέα, την κοινωνική δικτύωση και την περιβαλλοντική επιτήρηση. Πρόσφατα, σημειώθηκε αύξηση ενδιαφέροντος για την ανάπτυξη ασφαλούς μετάδοσης δεδομένων με βάση τις φυσικές ιδιότητες του ασύρματου καναλιού (εξ ου και η ονομασία ασφάλεια φυσικού επιπέδου). Η χρήση των RISs παρέχει έναν ριζικά νέο μηχανισμό ο οποίος χειρίζεται το περιβάλλον διάδοσης γύρω από τους μη ασφαλείς κόμβους για να αποτραπεί πιθανή διαρροή πληροφοριών και να διασφαλιστεί η ασφάλεια του δικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται με έξυπνους μετασχηματισμούς ή ανακύκλωση των υπαρχόντων σημάτων μέσω προγραμματισμού της μετάδοσης ασύρματων καναλιών για ενίσχυση των σημάτων για τους νόμιμους χρήστες και ακύρωση των σημάτων προς τους παράνομους. Ειδικότερα, σε αναδυόμενες αρχιτεκτονικές δικτύων όπως ad hoc δίκτυα και δίκτυα αισθητήρων, η χρήση συμβατικής κρυπτογράφησης δεδομένων για την ασφάλεια του δικτύου είναι δύσκολο να εφαρμοστεί. Σαν αποτέλεσμα, έχει δημιουργηθεί αυξημένο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη ασφαλούς μετάδοσης δεδομένων με βάση τις φυσικές ιδιότητες του ασύρματου καναλιού. Η χρήση των RISs παρέχει νέους μηχανισμούς χειρισμού των σημάτων σε μη ασφαλείς

κόμβους, έτσι ώστε να αποτρέπεται πιθανή διαρροή πληροφοριών και να διασφαλίζεται η ασφάλεια του δικτύου.[4]

Μαθηματικά, η ενοποίηση των RISs με την ασφάλεια του φυσικού επιπέδου φέρνει νέα μοντέλα επικοινωνίας και ως εκ τούτου νέα προβλήματα βελτιστοποίησης. Αυτά τα προβλήματα είναι γενικά μη κυρτά και δύσκολο να επιλυθούν. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη νέων τεχνικών βελτιστοποίησης για την επίλυση αυτών των προβλημάτων, αποτελεί πολύ μεγάλη πρόκληση. Επιπλέον, δεδομένου ότι η καθυστέρηση και η παρεμβολή στο σύστημα μπορεί να αποφέρουν ξεπερασμένη απόκτηση διαδοχικών καναλιών, γίνεται κρίσιμο να χαρακτηρίσουμε την απόδοση της ασφάλειας φυσικού επιπέδου υποβοηθούμενης από RIS κάτω από ξεπερασμένη πληροφορία κατάστασης καναλιού.[4]

4 Περιγραφή του Project - Αλγόριθμος και διαγράμματα ροής – Συγκρίσεις και Σχόλια

4.1 Project - Αλγόριθμος

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος πραγματοποιείται με τη σύγκριση των reconfigurable intelligent surfaces, decode-and-forward relays και single inputs single outputs και το ποιά λύση είναι πιο ενεργειακά αποδοτική αναλόγως των παραμέτρων που θα εισαχθούν στον αλγόριθμο σε κάθε περίπτωση. Επίσης εξετάζεται το transmit power που απαιτείται αναλόγως της απόστασης. Ο αλγόριθμος έχει 7 διαφορετικά σενάρια. Το σενάριο που υλοποιεί ένα ris/relay μεταξύ πηγής και δέκτη. Το σενάριο που υλοποιεί 2 ris/relay σε σειρά μεταξύ πηγής και προορισμού. Το σενάριο που υλοποιεί 2 ris/relay παράλληλα μεταξύ πηγής και προορισμού. Το σενάριο που υλοποιεί 3 ris/relay σε σειρά. Το σενάριο που υλοποιεί 3 ris/relay παράλληλα. Το σενάριο που υλοποιεί 4 ris/relay σε τετραγωνικό σχηματισμό. Το τελευταίο που υλοποιεί 8 ris/relays σε σειρά. Τα 3 πρώτα σενάρια καθώς και το τελευταίο δοκιμάζονται σε 3 διαφορετικές αποστάσεις 80m, 120m κι 150 μ. μεταξύ πηγής και τελικού ris/relay. Οι άλλες 3 περιπτώσεις εξετάζονται στην απόσταση 150 m μεταξύ πηγής και τελικού element. Στο τέλος εκτυπώνονται τα αποτελέσματα energy efficiency και transmit power, μέσω γραφικών παραστάσεων, του κάθε μοντέλου RIS, DF και SISO.

4.2 Βήματα Αλγορίθμου

Αρχικά ορίζουμε τις παραμέτρους της εξομοίωσης. Ορίζουμε τη συχνότητα φορέα (σε GHz). Ορίζουμε το Bandwidth. Υπολογίζουμε το noise power σε dBm. Καθορίζουμε τις λειτουργίες απολαβής καναλιού με βάση το 3GPP Urban Micro. Καθορίζουμε τα κέρδη της κεραίας στην πηγή, το Relay/IRS και τον προορισμό. Ορίζουμε τον συντελεστή ανάκλασης πλάτους. Ορίζουμε το εύρος τιμών ρυθμού. Ρυθμίζουμε τις παραμέτρους που σχετίζονται με την κατανάλωση ισχύος του κυκλώματος (διαρροή ισχύος στο υλικό του πομποδέκτη της πηγής, διαρροή ισχύος στο υλικό του πομποδέκτη του προορισμού, διαρροή ισχύος ανά στοιχείο στο IRS (mW), διαρροή ισχύος στο υλικό του πομποδέκτη του ρελέ, απόδοση του ενισχυτή ισχύος στην πηγή). Καθορίζουμε τις αποστάσεις στη ρύθμιση προσομοίωσης (απόσταση μεταξύ πηγής και IRS/Relay, ελάχιστη απόσταση μεταξύ προορισμού και IRS/ρελέ, καθορίζουμε το εύρος των τιμών d_1 στη ρύθμιση της προσομοίωσης). Υπολογίζουμε την απόσταση μεταξύ της πηγής και του προορισμού. Υπολογίζουμε την απόσταση μεταξύ του IRS/Relay και του προορισμού. Υπολογίζουμε τα κέρδη καναλιού χρησιμοποιώντας τα μοντέλα 3GPP και τα κέρδη της κεραίας. Προετοιμαζόμαστε να αποθηκεύσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Μέσω ενός for loop μεταβαίνουμε σε όλο το εύρος τιμών ρυθμού.

```
for ind = 1:length(Rbar)
```

Υπολογίζουμε τις απαιτούμενες τιμές SINR.

$$\text{SINR} = 2^{(\text{Rbar}(\text{ind})-1)}; \% \text{SISO and IRS}$$

$$\text{SINR_DF} = 2^{(2*\text{Rbar}(\text{ind})-1)}; \% \text{DF relaying}$$

Υπολογίζουμε την ισχύ εκπομπής στην περίπτωση SISO.

$$P_SISO = \text{SINR} * \sigma^2 / \beta_{SD};$$

$$\text{TR_SISO}(\text{ind}) = P_SISO;$$

Υπολογίζουμε την ενεργειακή απόδοση στην περίπτωση SISO.

(the factor 1000 is used to convert mW to W)

$$EE_SISO(\text{ind}) = 1000 * B * \text{Rbar}(\text{ind}) / (P_SISO / \nu + P_s + P_d);$$

Υπολογίζουμε την ισχύ εκπομπής στην περίπτωση αναμετάδοσης DF.

$$P_DF = \text{SINR_DF} * \sigma^2 * (\beta_{SR} + \beta_{RD} - \beta_{SD}) / (2 * \beta_{RD} * \beta_{SR});$$

Υπολογίζουμε την ενεργειακή απόδοση στην περίπτωση αναμετάδοσης DF.

(the factor 1000 is used to convert mW to W)

$$EE_DF(\text{ind}) = 1000 * B * \text{Rbar}(\text{ind}) / (P_DF / \nu + P_s / 2 + P_d + P_r);$$

Υπολογίζουμε τον αριθμό ελαχιστοποίησης ισχύος (NOPT) των στοιχείων ανάκλασης (Ο οποίος έχει άμεση σχέση από το πόσα elements αποτελείται η επιφάνεια του RIS και το καθορίζουμε από το εύρος τιμών ρυθμού που θα δώσουμε στο rbar λίγο πιο κάτω).

$$\text{Nopt}(\text{ind}) = (2 * \text{SINR} * \sigma^2 / (\alpha^2 * \beta_{SR} * \beta_{RD} * P_e))^{1/3} - \sqrt{\beta_{SD} / (\beta_{SR} * \beta_{RD})} / \alpha;$$

if Nopt(ind) < 0

$$\text{Nopt}(\text{ind}) = 0;$$

end

Υπολογίζουμε την ισχύ εκπομπής στην περίπτωση IRS. Υπολογίζουμε την ενεργειακή απόδοση στην περίπτωση IRS. Εκτυπώνουμε τις γραφικές παραστάσεις αποτελεσμάτων προσομοίωσης.

$$P_IRS = \text{SINR} * \sigma^2 / (\sqrt{\beta_{SD}} + \text{Nopt}(\text{ind}) * \alpha * \sqrt{\beta_{SR} * \beta_{RD}});$$

Τέλος αλγορίθμου.[6]

Ορίζουμε τις παραμέτρους που απαιτεί ο αλγόριθμος. Οι τιμές είναι οι εξής.

Ορίζουμε τη συχνότητα φορέα (in GHz).

$f_c = 3;$

Ορίζουμε το Bandwidth.

$B = 10e6;$

Ορίζουμε το Noise figure (in dB).

$\text{noiseFigure}_{dB} = 10;$

Καθορίζουμε τις λειτουργίες απολαβής καναλιού με βάση το 3GPP Urban Micro.

$\text{pathloss}_{3GPP_LOS} = @(x) \text{db2pow}(-28-20*\log_{10}(f_c)-22*\log_{10}(x));$

$\text{pathloss}_{3GPP_NLOS} = @(x) \text{db2pow}(-22.7-26*\log_{10}(f_c)-36.7*\log_{10}(x));$

Καθορίζουμε τα κέρδη της κεραίας στην πηγή, το Relay/IRS και τον προορισμό.

$\text{antennaGain}_S = \text{db2pow}(5);$

$\text{antennaGain}_R = \text{db2pow}(5);$

$\text{antennaGain}_D = \text{db2pow}(0);$

Ορίζουμε τον συντελεστή ανάκλασης πλάτους.

$\alpha = 1;$

Ορίζουμε το εύρος τιμών ρυθμού.

$R_{bar} = [0.01 \ 0.1:0.1:10];$

Ρυθμίζουμε τις παραμέτρους που σχετίζονται με την κατανάλωση ισχύος του κυκλώματος.

$P_s = 100;$ διαρροή ισχύος στο υλικό του πομποδέκτη της πηγής.

$P_d = 100;$ διαρροή ισχύος στο υλικό του πομποδέκτη του προορισμού.

$P_e = 5;$ διαρροή ισχύος ανά στοιχείο στο IRS (mW).

$P_r = 100;$ διαρροή ισχύος στο υλικό του πομποδέκτη του ρελέ.

$\eta_u = 0.5;$ απόδοση του ενισχυτή ισχύος στην πηγή.

Καθορίζουμε τις αποστάσεις στη ρύθμιση προσομοίωσης.

RIS elements 10

$d_{SR} = 80 \text{ m};$ απόσταση μεταξύ πηγής και IRS/Relay.

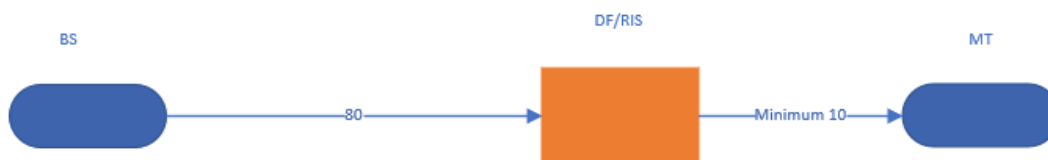
$d_n = 10$ m; ελάχιστη απόσταση μεταξύ προορισμού και IRS/ρελέ.

Καθορίζουμε το εύρος των τιμών d_1 στη ρύθμιση της προσομοίωσης.

$d_1 = 70$ m;

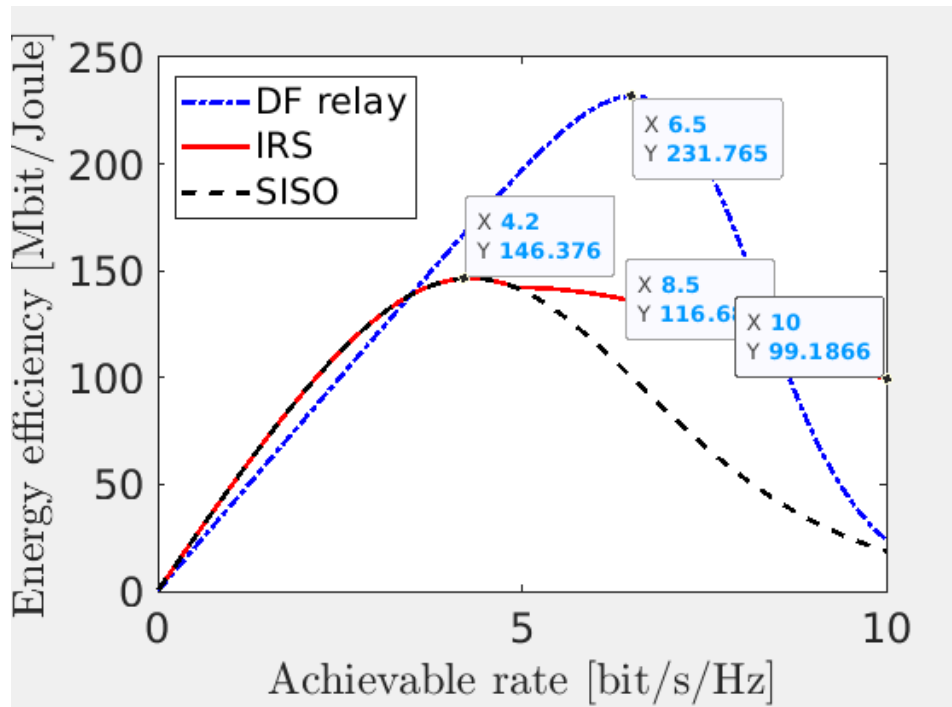
4.3 Περιπτώσεις με 1 RIS/Relays

4.3.1 Περίπτωση 1

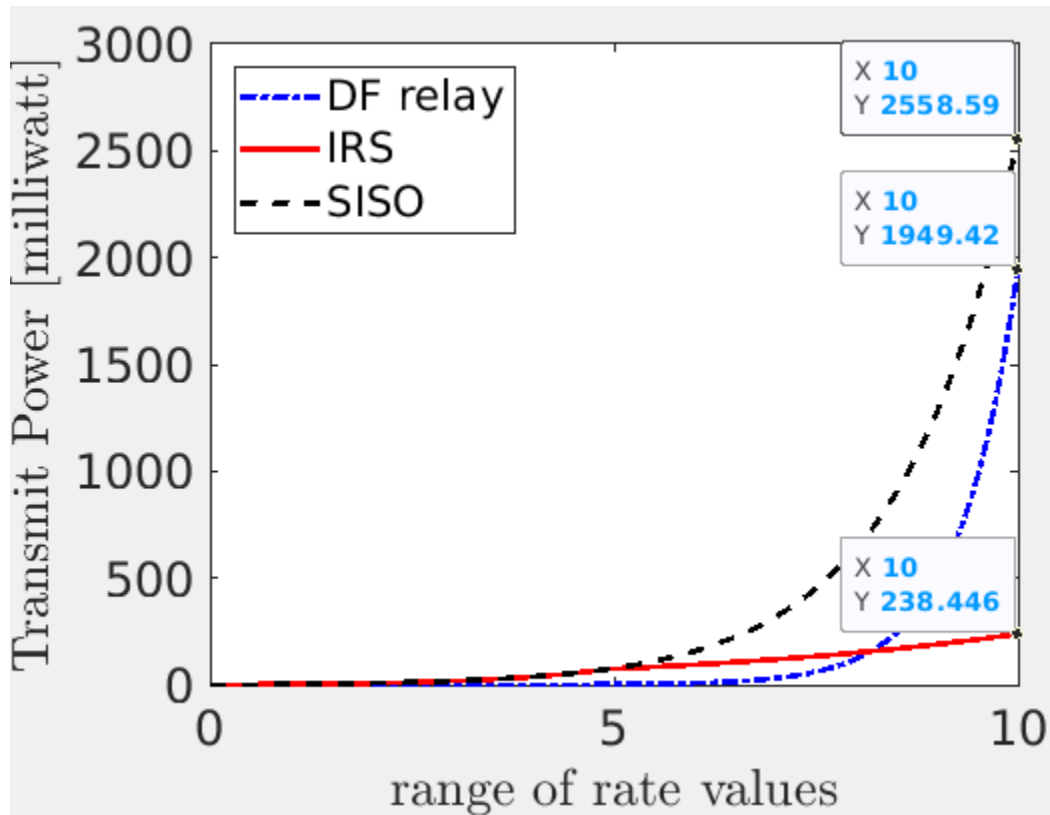


Εικόνα 16 Περίπτωση με 1 RIS/Relay σε απόσταση 80 m

Εκτελούμε τον κώδικα στο Matlab με τις αρχικές τιμές και παίρνουμε τις εξής γραφικές παραστάσεις.



Εικόνα 17 Energy Efficiency περίπτωση 1

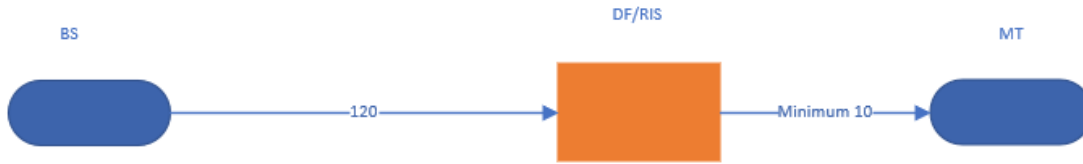


Εικόνα 18 Transmit Power περίπτωση 1

4.3.2 Σύγκριση DF Relay-RIS περίπτωση 1

Όπως παρατηρήθηκε και στις 2 προηγούμενες συγκρίσεις το DF relay φτάνει ένα υψηλότερο επίπεδο ενεργειακής απόδοσης από το RIS αλλά δεν το διατηρεί σε βάθος χρόνου και όσο ο αλγοριθμος κάνει πιο πολλές επαναλήψεις η απαίτηση του για transmit power αυξάνεται περισσότερο συγκριτικά με του RIS το οποίο φαίνεται να είναι πολύ πιο σταθερό σε βάθος χρόνου και να μη φθίνει τόσο απότομα. Στην πρώτη περίπτωση που έχουμε μόνο ένα RIS-Relay να μεσολαβεί, στο γράφημα του transmit power παρατηρούμε ότι στο σημείο 10 του άξονα x το RIS κάνει μια αύξηση μέχρι το 238 mw ενώ το DF μια αύξηση μέχρι το 1949 mw. Αν δίνουμε το δικαίωμα στον αλγόριθμο να κάνει κι άλλες επαναλήψεις πέραν του 10 τότε θα βλέπαμε πολύ μεγαλύτερα νούμερα από το DF. Δεν μπορεί όμως κανείς να αμφισβητήσει ότι το υψηλότερο νούμερο ενεργειακής απόδοσης το πετυχαίνει το DF Relay με 231 mbit/joule στο 6.5 του άξονα x, όμως όσο μεγαλώνει η ακτίνα το RIS αποδεικνύεται καλύτερη λύση.

4.3.3 Περίπτωση 2



Εικόνα 19 Περίπτωση με 1 RIS/Relay σε απόσταση 120 m

Στην περίπτωση 2 όλες οι παράμετροι είναι ίδιες εκτός του ότι θα αρχίσουμε να πειραματιζόμαστε με τις αποστάσεις. Οι αρχικές αποστάσεις ήταν οι εξής.

Καθορίζουμε τις αποστάσεις στη ρύθμιση προσομοίωσης.

$d_{SR} = 80$ m; απόσταση μεταξύ πηγής και IRS/Relay.

$d_n = 10$ m; ελάχιστη απόσταση μεταξύ προορισμού και IRS/ρελέ.

Καθορίζουμε το εύρος των τιμών $d1$ στη ρύθμιση της προσομοίωσης.

$d1 = 70$ m;

Οι καινούριες είναι:

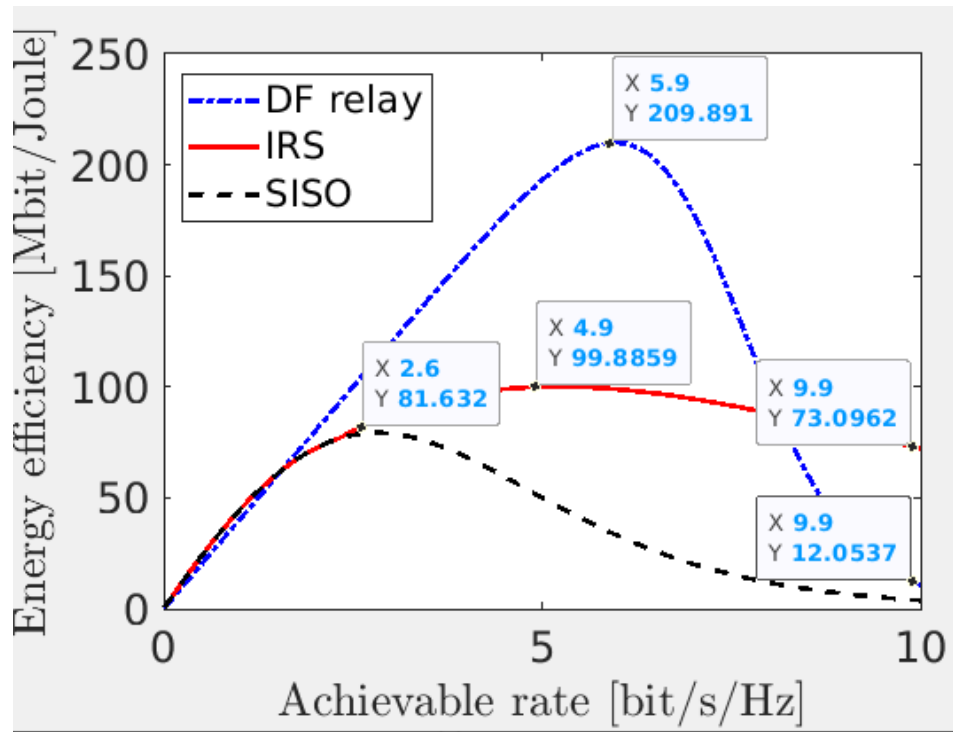
RIS Elements 10

$d_{SR} = 120$ m; απόσταση μεταξύ πηγής και IRS/Relay.

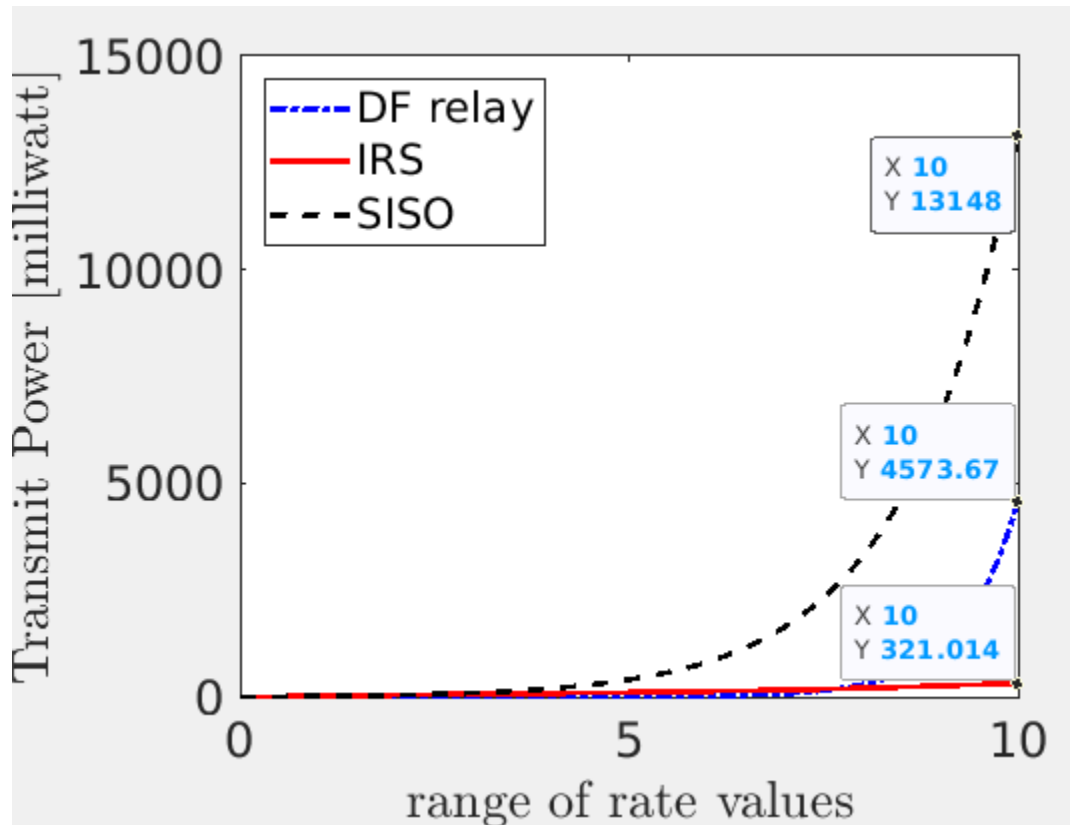
$d_n = 10$ m; ελάχιστη απόσταση μεταξύ προορισμού και IRS/ρελέ.

Καθορίζουμε το εύρος των τιμών $d1$ στη ρύθμιση της προσομοίωσης.

$d1 = 110$ m;



Εικόνα 20 Energy Efficiency περίπτωση 2



Εικόνα 21 Transmit Power περίπτωση 2

4.3.4 Σύγκριση DF Relay-Ris περίπτωσης 2

Στην περίπτωση 2 όπου η απόσταση μεταξύ πηγής και ris/relay είναι 120 m και επίσης έχουμε σχηματισμό με ένα μόνο ris/relay κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις. Στο συγκεκριμένο Simulation το DF έχει λίγο παραπάνω από διπλάσια ανώτερη ενεργειακή απόδοση (209 mbit/joule έναντι 100 mbit/joule) αλλά το RIS, όταν ο αλγόριθμος φτάνει στην επανάληψη 10, απαιτεί πολύ λιγότερη ενέργεια συγκριτικά με το DF (321 mw έναντι 4573 mw). Συμπεραίνουμε ότι σε λιγότερες επαναλήψεις είναι καλύτερο το σύστημα DF ενώ σε περισσότερες επαναλήψεις του αλγορίθμου το πιο ενεργειακά αποδοτικό είναι το σύστημα με το RIS.

4.3.5 Σύγκριση RIS περιπτώσεων 2vs1

Στην περίπτωση 2 (όπου η απόσταση έχει αυξηθεί το RIS έχει χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση (μεγιστη 100 mbit/joule συγκριτικά με 146 mbit/joule της περίπτωσης 1) ενώ και αντίστοιχα ξοδεύει περισσότερη ενέργεια (321 mw περίπου στο 10) ενώ η περίπτωση ένα που βρίσκεται σε κοντινότερη απόσταση ξοδεύει λιγότερη transmit power (238 mw στο 10).

Συμπεραίνουμε ότι όσο απομακρύνουμε το element από την πηγή μειώνεται το energy efficiency και αυξάνεται η απαίτηση για transmit power.

4.3.6 Περίπτωση 3



Εικόνα 22 Περίπτωση με 1 RIS/Relay σε απόσταση 150 m

Στην περίπτωση τρία αλλάζουμε πάλι τις αποστάσεις στις εξής τιμές.

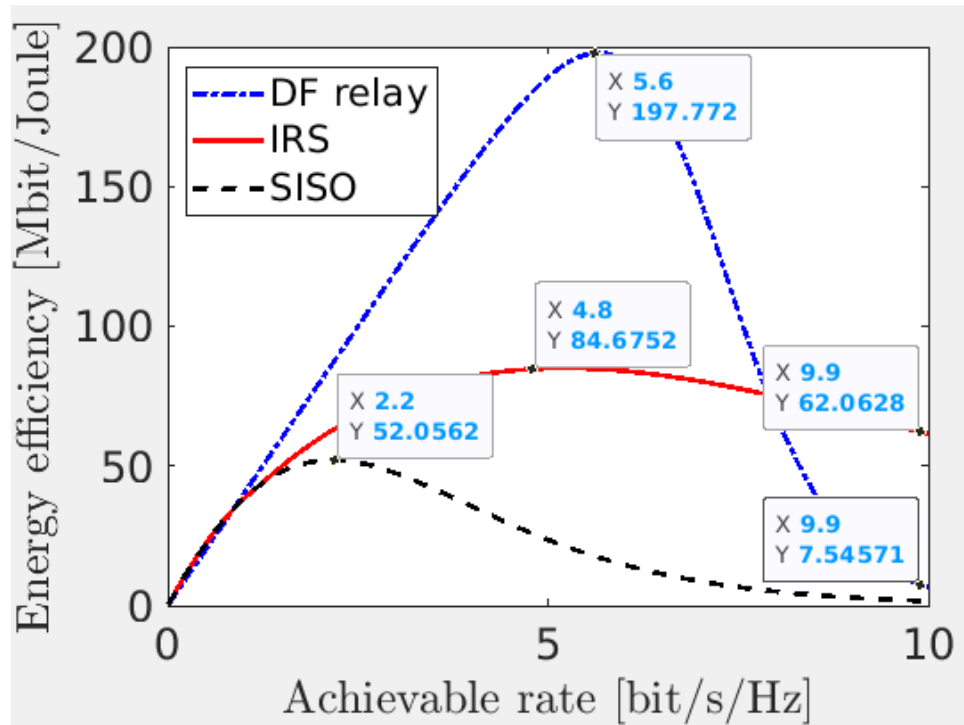
RIS Elements 10

$d_{SR} = 150$ m; απόσταση μεταξύ πηγής και IRS/Relay.

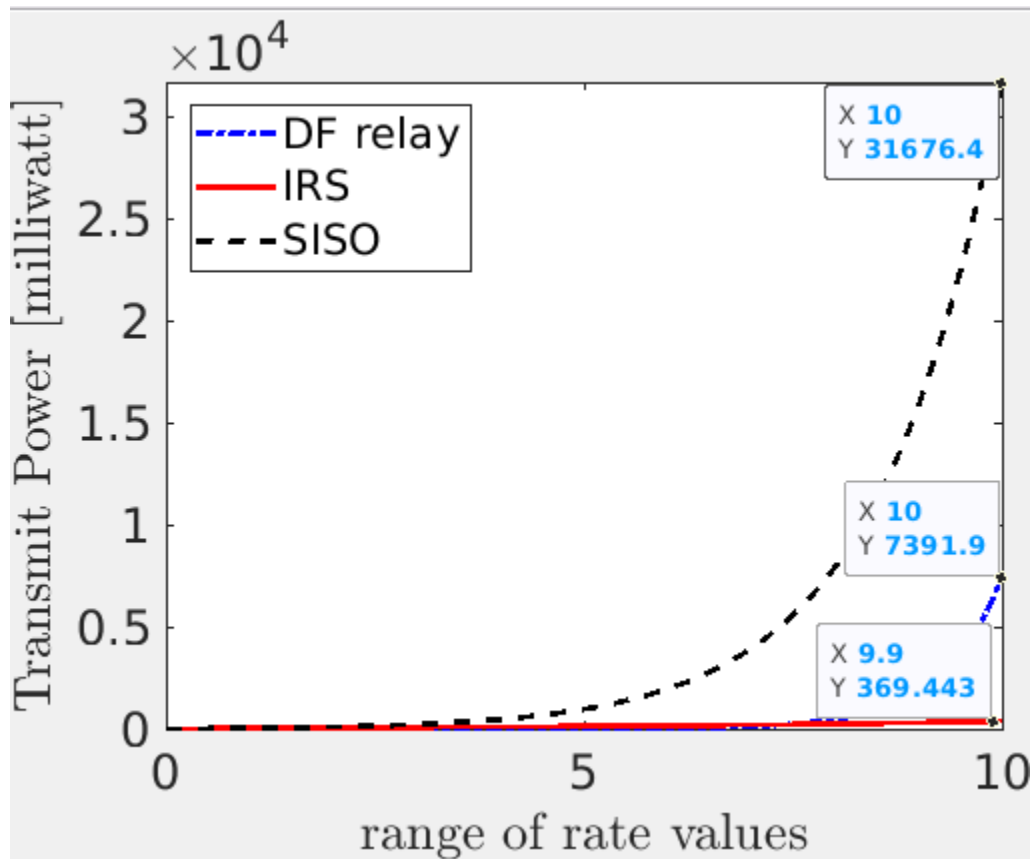
$d_n = 10$ m; ελάχιστη απόσταση μεταξύ προορισμού και IRS/ρελέ.

Καθορίζουμε το εύρος των τιμών $d1$ στη ρύθμιση της προσομοίωσης.

$d1 = 140$ m;



Εικόνα 23 Energy Efficiency περίπτωση 3



Εικόνα 24 Transmit Power περίπτωση 3

4.3.7 Σύγκριση DF Relay-Ris περίπτωσης 3

Αναλύοντας την περίπτωση 3, όπου η απόσταση μεταξύ πηγής και Relays/Ris είναι στα 150 m και μεταξύ πομπού και δέκτη μεσολαβεί ένα μοναδικό Relay/Ris, διαπιστώνουμε τα ακόλουθα. Το DF σύστημα έχει μια πολύ μεγάλη ενεργειακή απόδοση 197 mbit/joule, συγκριτικά με το RIS σύστημα 84 mbit/joule, αλλά την διατηρεί ελάχιστα καθώς ξεκινάει κατακόρυφη πτώση αμέσως μετά την κορύφωση και το DF σύστημα απαιτεί άμεσα μεγάλο αριθμό transmit power (7391 mw στην 10η επανάληψη του αλγορίθμου έναντι 369 mw του RIS συστήματος). Διαπιστώνουμε ότι για μικρότερες επαναλήψεις είναι πιο αποδοτικό το DF σύστημα ενώ όσο οι επαναλήψεις αυξάνονται το RIS Simulation αποδίδει πολύ καλύτερα.

4.3.8 Σύγκριση RIS περιπτώσεων 3vs2

Στην περίπτωση 2 η μέγιστη ενεργειακή απόδοση φτάνει στο 100 mbit/joule περίπου ενώ στην περίπτωση 3 που μεσολαβεί μεγαλύτερη απόσταση η μέγιστη ενεργειακή απόδοση είναι λίγο χαμηλότερη (84 mbit/joule περίπου). Αντίστοιχα η ενέργεια εκπομπής στην

περίπτωση 2 είναι χαμηλότερη (321 mw περίπου transmit power) από την περίπτωση 3 (369 mw περίπου transmit power). Συμπεραίνουμε και σ' αυτή τη σύγκριση ότι όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ πηγής και RIS μειώνεται η απόδοση του συστήματος.

4.3.9 Σύγκριση RIS περιπτώσεων 3vs1

Η περίπτωση 3 με την περίπτωση ένα έχουν το κοινό στοιχείο ότι μεταξύ πηγής και προορισμού μεσολαβεί ένα μόνο ris/relay αλλά διαφέρουν στο ότι στην περίπτωση 1 η απόσταση μεταξύ πηγής και RIS είναι 80 m ενώ στην περίπτωση 3 η συγκεκριμένη απόσταση έχει αυξηθεί στα 150 m. Η μέγιστη ενεργειακή απόδοση του συστήματος της περίπτωσης 1 είναι 146 mbit/joule ενώ στην περίπτωση 3 είναι 84 mbit/joule. Η μέγιστη transmit power της περίπτωσης 1 είναι 232 mw ενώ στην περίπτωση 3 είναι 378 mw. Συμπεραίνουμε ότι στο ίδιο σύστημα, όπου η απόσταση μεταξύ πηγής και RIS σχεδόν διπλασιάστηκε, η απόδοση έπεσε στο 50% περίπου και η απαίτηση για transmit power αυξήθηκε κατά 140 μονάδες.

4.4 Περιπτώσεις με 2 RIS/Relays σε σειρά

4.4.1 Περίπτωση 4



Εικόνα 25 Περίπτωση με 2 RIS/Relays σε σειρά σε συνολική απόσταση 80 m

Στην περίπτωση 4 έχουμε 2 irs/relays που μεσολαβούν ανάμεσα σε πηγή και προορισμό. Οπότε έχουμε τις εξής αλλαγές.

Καθορίζουμε τις αποστάσεις στη ρύθμιση προσομοίωσης ώστε να μας θυμίζουν την περίπτωση 1.

RIS Elements 10

$d_{SR} = 40$; απόσταση μεταξύ πηγής και IRS/Relay1.

$D_{RR} = 40$; απόσταση μεταξύ του irs/relay1 και του irs/relay2.

$d_n = 10$; ελάχιστη απόσταση μεταξύ προορισμού και IRS/relay2.

Καθορίζουμε το εύρος των τιμών $d1$ στη ρύθμιση της προσομοίωσης.

$d1 = 70$ m;

Διαμορφώνουμε και τους τύπους υπολογισμού αναλόγως.

Υπολογίζουμε την απόσταση μεταξύ πηγής και προορισμού

$$d_SD = \text{sqrt}(d1^2+dv^2);$$

Υπολογίζουμε την απόσταση μεταξύ irs/relay2 και προορισμού

Η αλλαγή που κάνουμε στον τύπο είναι ότι προσθέτουμε το d_SR και το d_RR (Πηγη-irs/relay1,irs/relay1-irs/relay2) καθώς τώρα μεσολαβούν 2 irs/relays στο simulation μεταξύ πηγής και προορισμού.

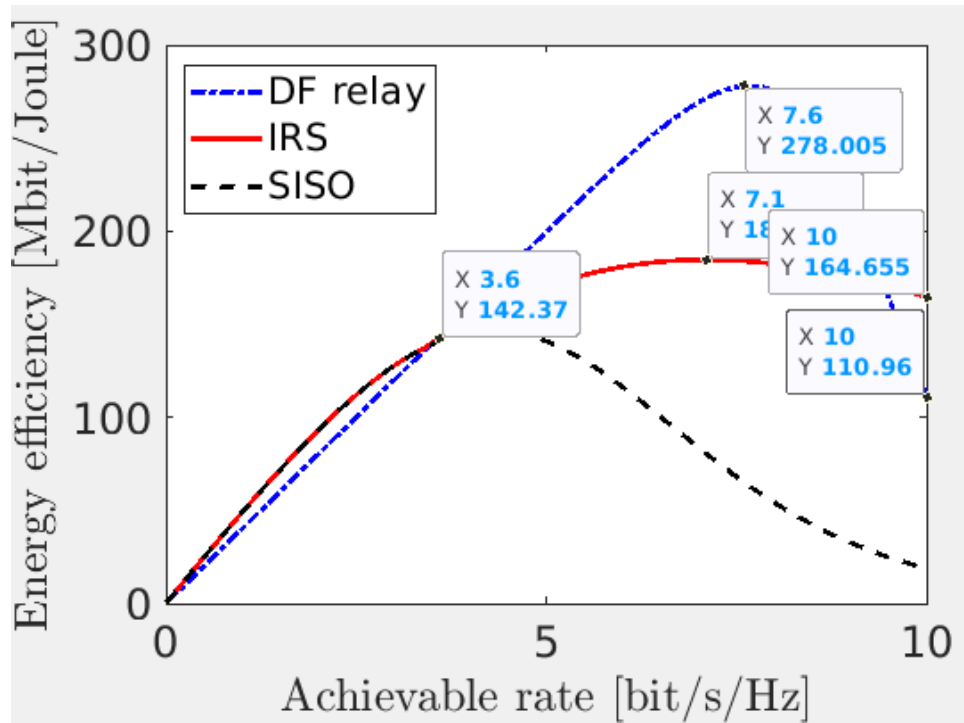
$$d_RD = \text{sqrt}((d1-(d_SR+d_RR))^2+dv^2);$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε το betaSR και το betaRR, τα προσθέτουμε και αποθηκεύουμε το αποτέλεσμά τους στην μεταβλητή betaSumRelays.

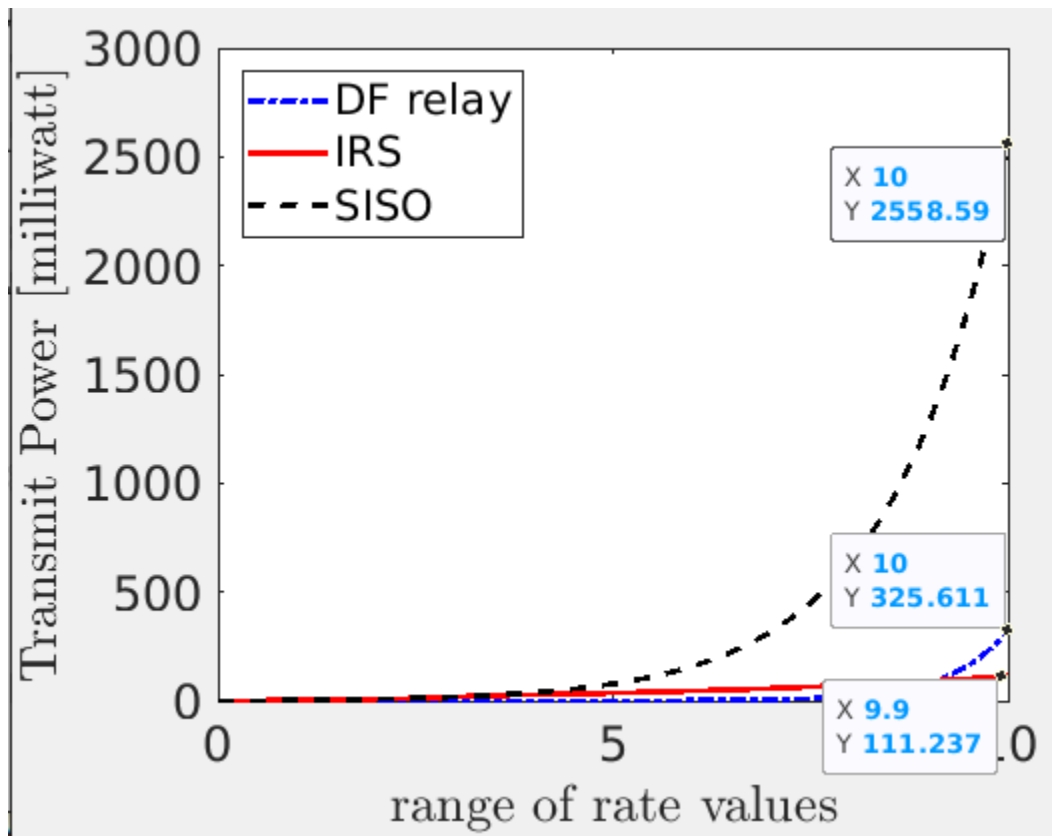
$$\text{betaSumRelays}=\text{betaSR}+\text{betaRR};$$

Στο τέλος του κώδικα όπου γίνονται οι υπολογισμοί της ενεργειακής αποδοτικότητας του transmit power κάνουμε αντικατάσταση της μεταβλητής betaSR με τη μεταβλητή betaSumRelays.

Εκτελούμε τον κώδικα και παίρνουμε τις εξής δύο γραφικές παραστάσεις.



Εικόνα 26 Energy Efficiency περίπτωση 4



Εικόνα 27 Transmit Power περίπτωση 4

4.4.2 Σύγκριση DF Relay-RIS περίπτωση 4

Στην περίπτωση 4 το DF έχει πιο σταδιακή αύξηση και αντίστοιχα όχι τόσο απότομη υποχώρηση, σύμφωνα με αυτά που παρουσιάζονται στο γράφημα της ενεργειακής απόδοσης. Και σ' αυτήν την περίπτωση το RIS είναι πολύ σταθερό από άποψης ενεργειακής απόδοσης. Κάτι που σημαίνει ότι διατηρεί χαμηλά επίπεδα κατανάλωσης transmit power. Στην συγκεκριμένη περίπτωση όμως το DF αποδίδει σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα (278 energy efficiency) και σε μεγάλη ακτίνα, συγκριτικά με το RIS (180 mbit/joule energy efficiency), καθώς η απαίτηση του για ενέργεια (όπως παρατηρούμε και στο σχήμα του transmit power) είναι περίπου στο σημείο 325 mw, όταν φτάνει στην ακτίνα 10 δηλαδή όχι πολύ χειρότερα από το RIS που βρίσκεται στο ανώτερο 111 mw όταν φτάσει στο 10 του άξονα των x. Αν ανατρέξουμε στην αμέσως παραπάνω παράγραφο θα θυμηθούμε ότι όταν είχαμε μόνο ένα RIS/DF να μεσολαβεί, στην ακτίνα 10 το transmit power του DF Relay ήτανε 1949 mw, πολύ υψηλότερο δηλαδή από την περίπτωση που έχουμε 2 DF Relays σε σειρά. Επίσης είναι πολύ σημαντικό να αναφέρουμε και την διαφορά που κάνουν στη μείωση του transmit power στο RIS simulation, τα 2 ris σε σειρά. Στην περίπτωση 1 να υπενθυμίσουμε έχουμε μόνο ένα ris/relay. Ακόμη σημαντικό είναι να συγκρίνουμε τα νούμερα της ενεργειακής απόδοσης df/ris στην ακτίνα 10 του αλγορίθμου. Και τα 2 Simulation σημειώνουν ιδιαίτερα υψηλά νούμερα (RIS 164 DF 110 energy efficiency). Το RIS φυσικά φθίνει λιγότερο από το DF αλλά και το DF της περίπτωσης 4 φθίνει λιγότερο συγκριτικά με την περίπτωση 1.

4.4.3 Περίπτωση 5



Εικόνα 28 Περίπτωση με 2 RIS/Relays σε σειρά σε συνολική απόσταση 120 m

Η περίπτωση 5 είναι ίδια με την 4(δηλαδή μεσολαβούν 2 ris/relays) αλλά κάνουμε τις εξής αλλαγές στις αποστάσεις να είναι ίδιες με την περίπτωση 2.

RIS Elements 10

$d_{SR} = 60$ m; απόσταση μεταξύ πηγής και IRS/Relay1.

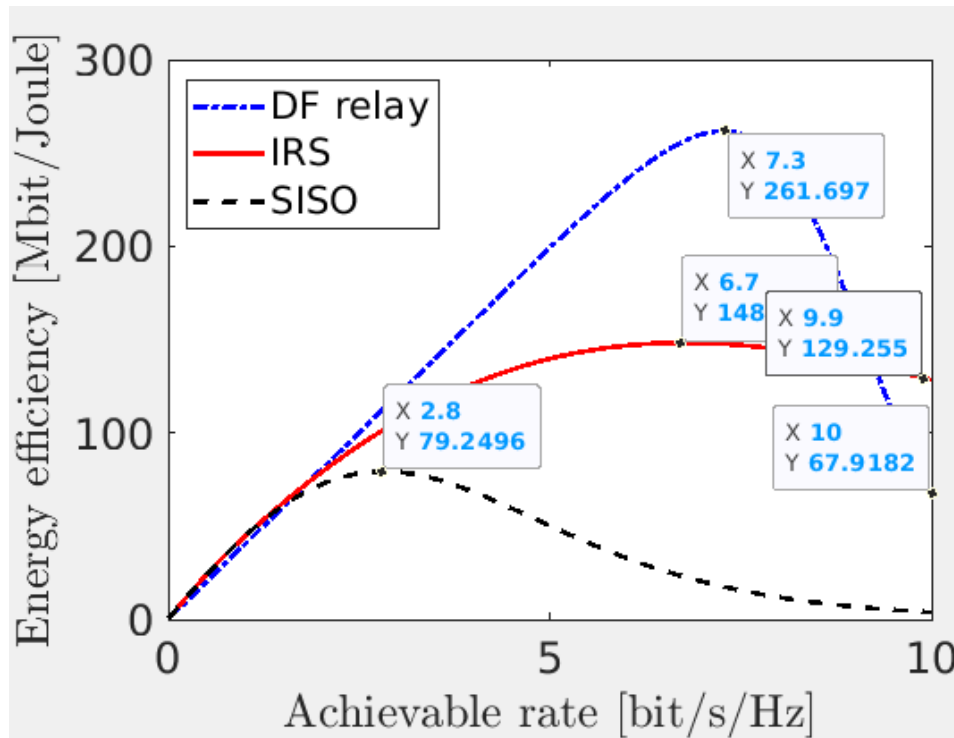
$D_{RR} = 60$ m; απόσταση μεταξύ του irs/relay1 και του irs/relay2.

$d_n = 10$; ελάχιστη απόσταση μεταξύ προορισμού και IRS/relay2.

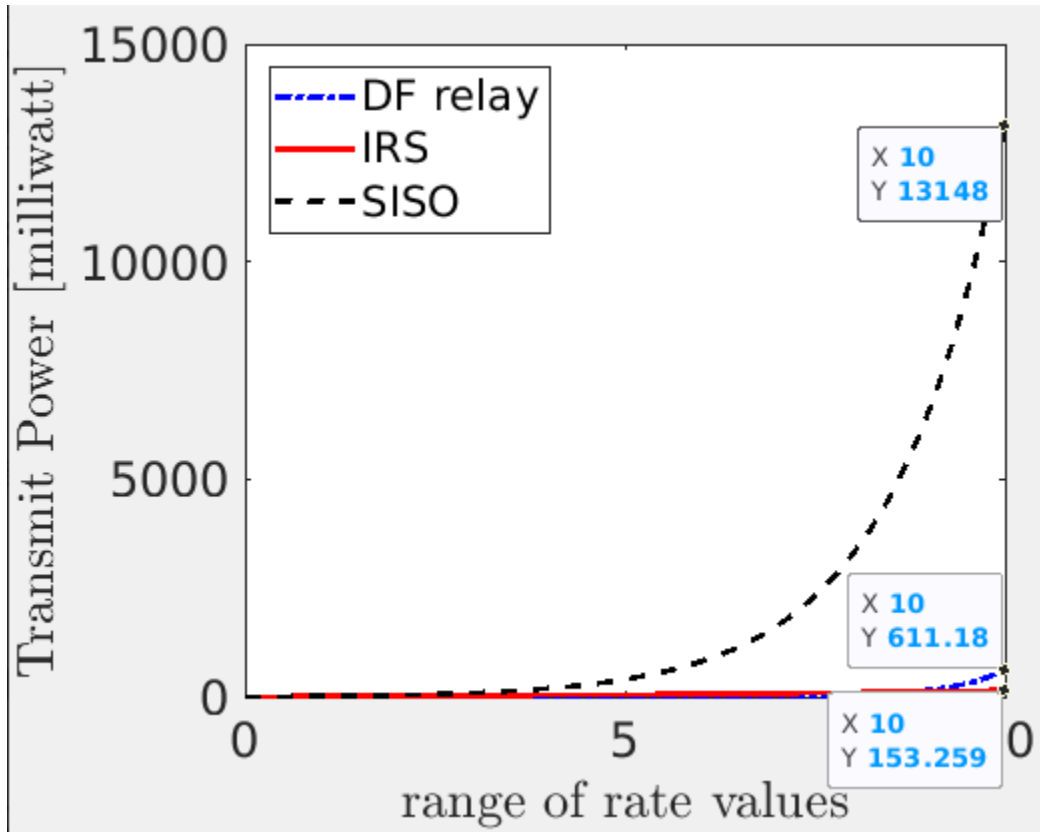
Καθορίζουμε το εύρος των τιμών d_1 στη ρύθμιση της προσομοίωσης.

$d_1 = 110$ m;

Εκτελούμε τον κώδικα στο matlab και παίρνουμε τα παρακάτω γραφήματα.



Εικόνα 29 Energy Efficiency περίπτωση 5



Εικόνα 30 Transmit Power περίπτωση 5

4.4.4 Σύγκριση DF Relay-Ris περίπτωσης 5

Στην περίπτωση 5 όπου έχουμε σχηματισμό με 2 ris/relays σε σειρά σε απόσταση 120 m από την πηγή στο τελικό ris/relay κάνουμε τις παρατηρήσεις που ακολουθούν. Στο σύστημα που εξετάζουμε το DF σημειώνει μέγιστη ανώτερη τιμή energy efficiency διπλάσια από το RIS (261 mbit/joule έναντι 135 mbit/joule) αλλά η πορεία του στο γράφημα είναι τελειώς ασταθής καθώς μόλις κορυφώνεται στη μέγιστη τιμή ξεκινάει καθοδική πορεία. Η μέγιστη transmit power που το RIS σύστημα καταναλώνει όταν ο αλγόριθμος φθάσει στη 10η επανάληψη είναι 153 mw περίπου αντιθέτως με το DF σύστημα που όπως σημειώσαμε κάνει απότομη πτώση στην ενεργειακή απόδοση και ξεκινάει να απαιτεί ολο και περισσότερη transmit power (611 mw) όταν ο αλγόριθμος φθάσει στη 10η επανάληψη. Συμπεραίνουμε ότι το RIS σημειώνει μικρότερο υψηλό νούμερο αλλά το διατηρεί για πολύ περισσότερο χρονικό διάστημα συγκριτικά με το DF, γεγονός που προσθετικά αποδεικνύεται πιο αποδοτικό ειδικά για μεγαλύτερες αποστάσεις.

4.4.5 Σύγκριση RIS περιπτώσεων 5vs4

Στην περίπτωση 5 (που να υπενθυμίσουμε έχουμε 2 RIS σε σειρά) έχουμε κι εδώ αυξήσει την απόσταση σε 120 m μεταξύ πηγής και τελικού RIS συγκριτικά με την περίπτωση 4 όπου η απόσταση που μεσολαβεί μεταξύ πηγής και τελικού RIS είναι 80 m. Αν παρατηρήσουμε από τα νούμερα στα γραφήματα το συγκεκριμένο RIS Simulation αποδίδει καλύτερα σε μικρότερη απόσταση, δηλαδή στην περίπτωση 4 (ενεργειακή απόδοση 180 mbit/joule transmit power 111 mw) συγκριτικά με την περίπτωση 5 όπου έχουμε αυξήσει την απόσταση μεταξύ πηγής και RIS και ως συνέπεια έχει η ενεργειακή απόδοση να μειωθεί (energy efficiency 148 περίπου) και η κατανάλωση ενέργειας μεταδοσης να αυξηθεί (transmit power 153 mw περίπου). Και εδώ συμπεραίνουμε ότι όσο η απόσταση μεταξύ πομπού και RIS ris/relay αυξάνεται παράλληλα μειώνεται η ενεργειακή απόδοση του RIS και απαιτείται περισσότερη ενέργεια μετάδοσης.

4.4.6 Περίπτωση 6



Εικόνα 31 Περίπτωση με 2 RIS/Relays σε σειρά σε συνολική απόσταση 150 m

Η περίπτωση 6 είναι ίδια με την 4 και την 5(δηλαδή μεσολαβούν 2 irs/relays) αλλά κάνουμε τις εξής αλλαγές στις αποστάσεις να είναι ίδια με την περίπτωση 3.

RIS Elements 10

$d_{SR} = 75$ m; απόσταση μεταξύ πηγής και IRS/Relay1.

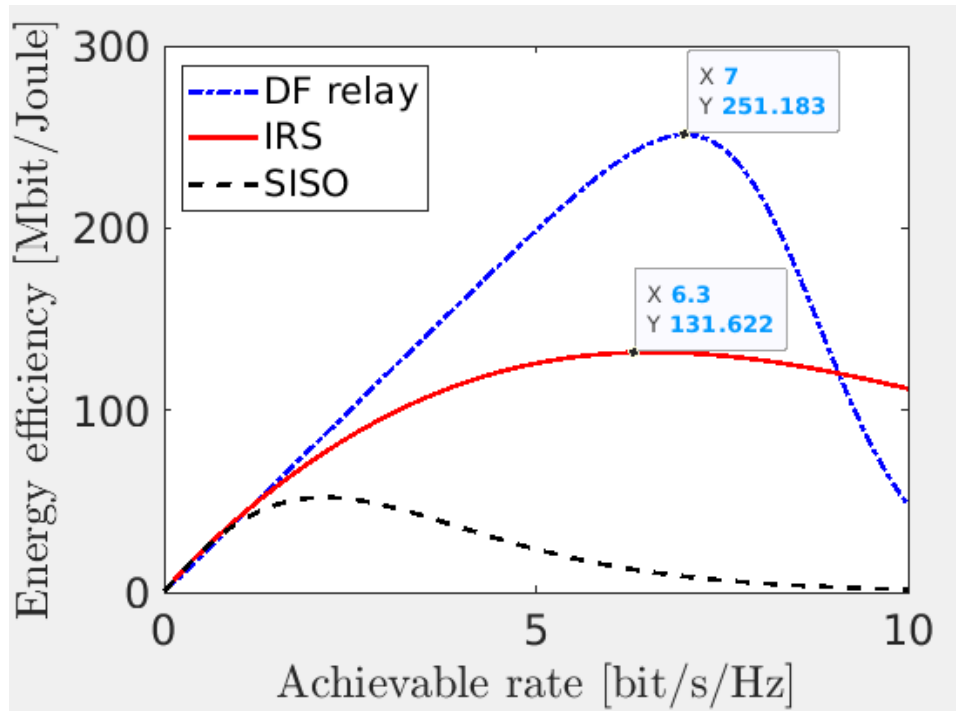
$D_{RR} = 75$ m; απόσταση μεταξύ του irs/relay1 και του irs/relay2.

$d_n = 10$ m; ελάχιστη απόσταση μεταξύ προορισμού και IRS/relay2.

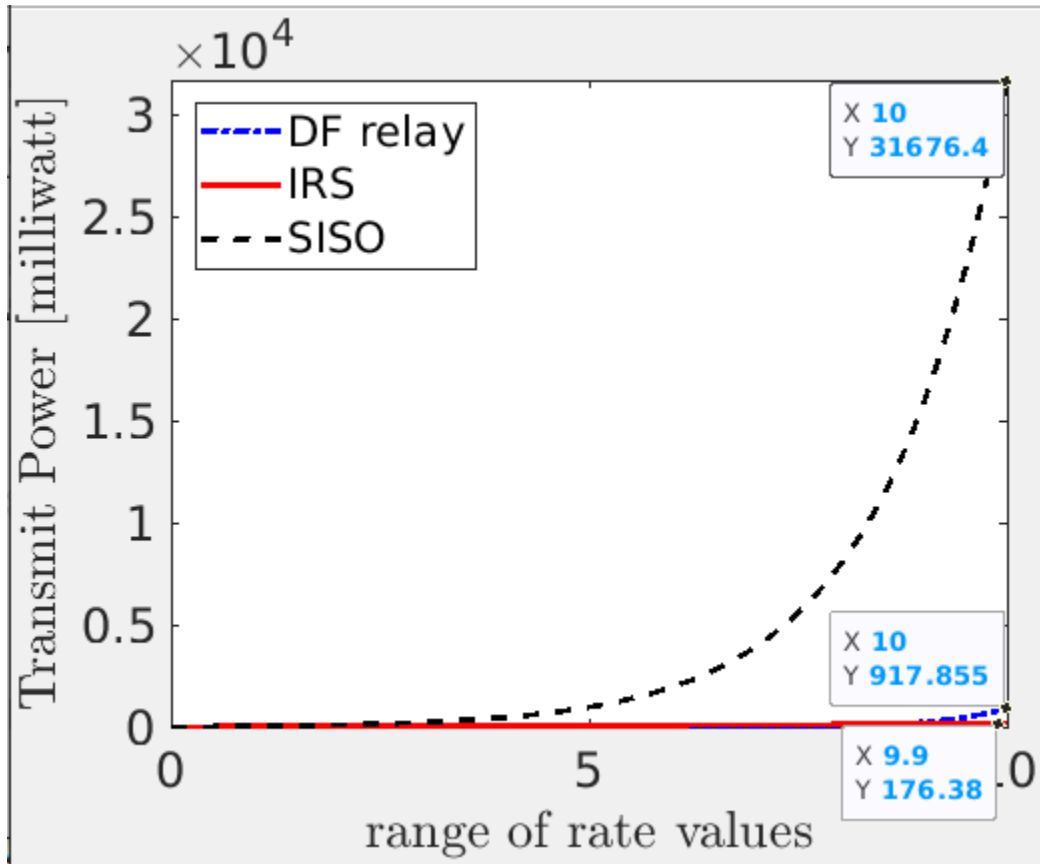
Καθορίζουμε το εύρος των τιμών $d1$ στη ρύθμιση της προσομοίωσης.

$d1 = 140$ m;

Εκτελούμε τον κώδικα στο matlab και παίρνουμε τα παρακάτω γραφήματα.



Εικόνα 32 Energy Efficiency περίπτωση 6



Εικόνα 33 Transmit Power περίπτωση 6

4.4.7 Σύγκριση DF Relay-Ris περίπτωσης 6

Εξετάζοντας την περίπτωση 6, όπου η απόσταση μεταξύ πηγής και τελικού Relay/Ris είναι στα 150 m και μεταξύ πηγής και προορισμού μεσολαβούν 2 Relay/Ris σε σειρά, κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις. Η ενεργειακή απόδοση και στα 2 συστήματα είναι βελτιωμένη (DF 251 mbit/joule RIS 131 mbit/joule). Το Ris simulation αποδεικνύεται άλλη μια φορά πιο σταθερό και η δυναμική του διατηρείται για περισσότερες επαναλήψεις του αλγορίθμου. Το DF σύστημα σημειώνει πτώση αλλά αυτή τη φορά δεν είναι με την ίδια ορμή προς τα κάτω αλλά είναι λίγο πιο ομαλή, γεγονός που οφείλεται στην ενίσχυση του συστήματος με 2 ris/relay στη σειρά. Η απαίτηση για transmit power στη 10η επανάληψη είναι 176 mw για το Ris σύστημα ενώ για το DF σύστημα είναι 917 mw. Και τα 2 συστήματα είναι πολύ ενισχυμένα σ' αυτήν την περίπτωση και αποδίδουν πολύ καλύτερα.

4.4.8 Σύγκριση RIS περιπτώσεων 6vs5

Σ' αυτά τα 2 παραδείγματα παρατηρούμε μικρή απόκλιση τιμών. Η περίπτωση 5 όπου η συνολική απόσταση είναι 120 m συγκριτικά με την περίπτωση 6, όπου η απόσταση έχει αυξηθεί στο 150 m, είναι με μικρή διαφορά καλύτερη. Η μέγιστη ενεργειακή απόδοση στην

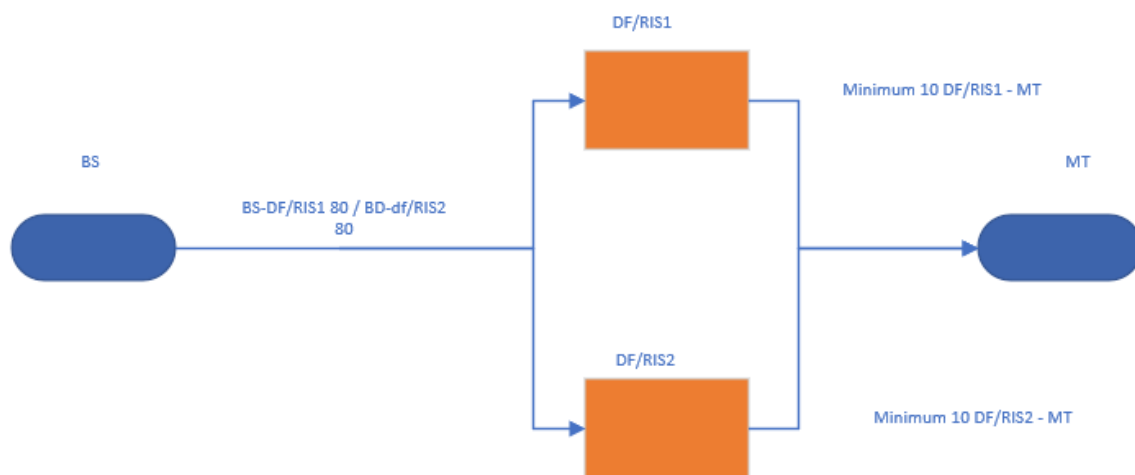
περίπτωση 5 είναι περίπου 148 mbit/joule και στην περίπτωση 6 είναι 131 mbit/joule. Παρατηρείται μικρή πτώση της απόδοσης του συγκεκριμένου συστήματος λόγω αύξησης της απόστασης καθώς είναι ενισχυμένο με 2 RIS σε σειρά και το σήμα εξασθενεί πιο δύσκολα. Επίσης και η μέγιστη κατανάλωση ενέργειας δεν παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση όταν αυξήσουμε την απόσταση από 120 m σε 150 m. Από 153 mw φτάνει στο 176 mw, όχι πολύ σημαντική αύξηση επομένως.

4.4.9 Σύγκριση RIS περιπτώσεων 6vs4

Οι περιπτώσεις 6 και 4 έχουν το κοινό σημείο αναφοράς ότι μεταξύ πομπού και δέκτη μεσολαβούν 2 RIS σε σειρά αλλά έχουν τη διαφορά ότι η απόσταση μεταξύ πηγής και τελικού RIS στην περίπτωση 4 είναι 80 m ενώ στην περίπτωση 6 βρίσκεται στο 150 m. Στην περίπτωση 4 η μέγιστη ενεργειακή απόδοση είναι περίπου 180 mbit/joule και η μέγιστη transmit power είναι 111 mw. Στην περίπτωση 6 η μέγιστη ενεργειακή απόδοση είναι 131 και η μέγιστη transmit power 176 mw. Παρατηρούμε και σ' αυτή τη σύγκριση ότι η αύξηση της απόστασης παίζει καταλυτικό ρόλο στη μείωση της απόδοσης του συστήματος (Μείωση energy efficiency - Αύξηση transmit power) και ότι απαιτείται περαιτέρω ενίσχυση.

4.5 Περιπτώσεις με 2 RIS/Relays παράλληλα

4.5.1 Περίπτωση 7



Εικόνα 34 Περίπτωση με 2 RIS/Relays παράλληλα σε απόσταση 80 m το καθένα

Στην συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε 2 ris/relays αλλά όχι σε σειρά αλλά παράλληλα. Οπότε οι αλλαγές που κάνουμε στον κώδικα είναι οι παρακάτω.

Υπολογίζουμε τα channel gains και στη συνέχεια σε μια ξεχωριστή μεταβλητή αποθηκεύουμε το σύνολο για όλα τα ris/relay.

$\beta_{\text{SumSR}} = \beta_{\text{SR}} + \beta_{\text{SR}}$;

$\beta_{\text{SumRD}} = \beta_{\text{RD}} + \beta_{\text{RD}}$;

Στο σημείο των υπολογισμών του κώδικα αντικαθιστούμε τις μεταβλητές β_{SR} και β_{RD} με τις αντίστοιχες β_{Sum} .

Οι αποστάσεις που έχουμε δώσει είναι όπως στο παραδειγμα ένα.

RIS elements 10

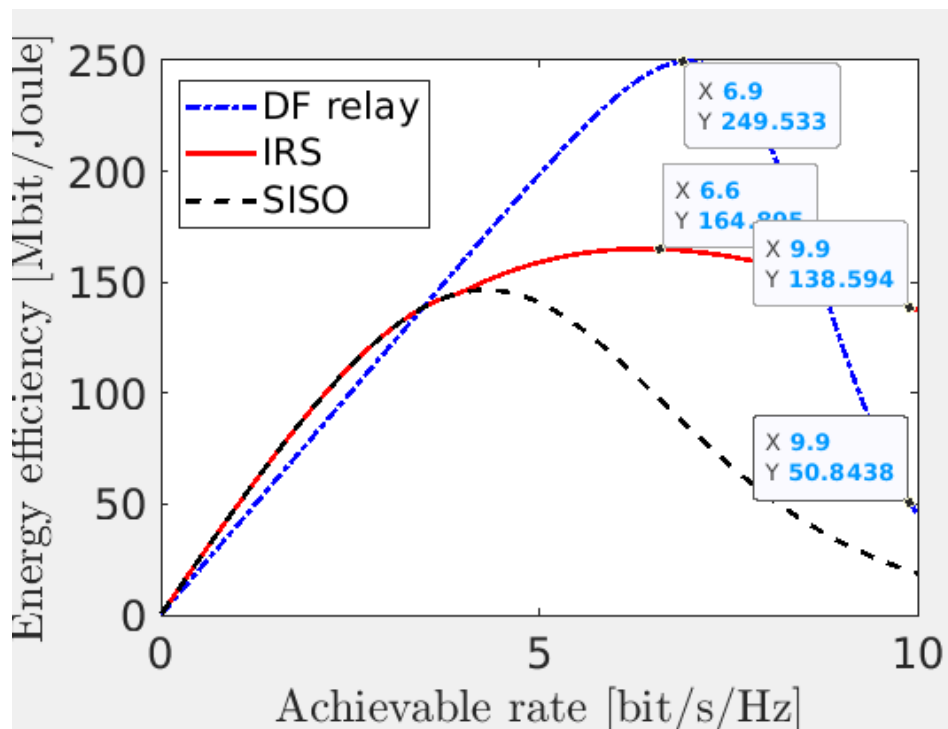
$d_{\text{SR}} = 80 \text{ m}$; απόσταση μεταξύ πηγής και IRS/Relay.

$d_{\text{v}} = 10 \text{ m}$; ελάχιστη απόσταση μεταξύ προορισμού και IRS/ρελέ.

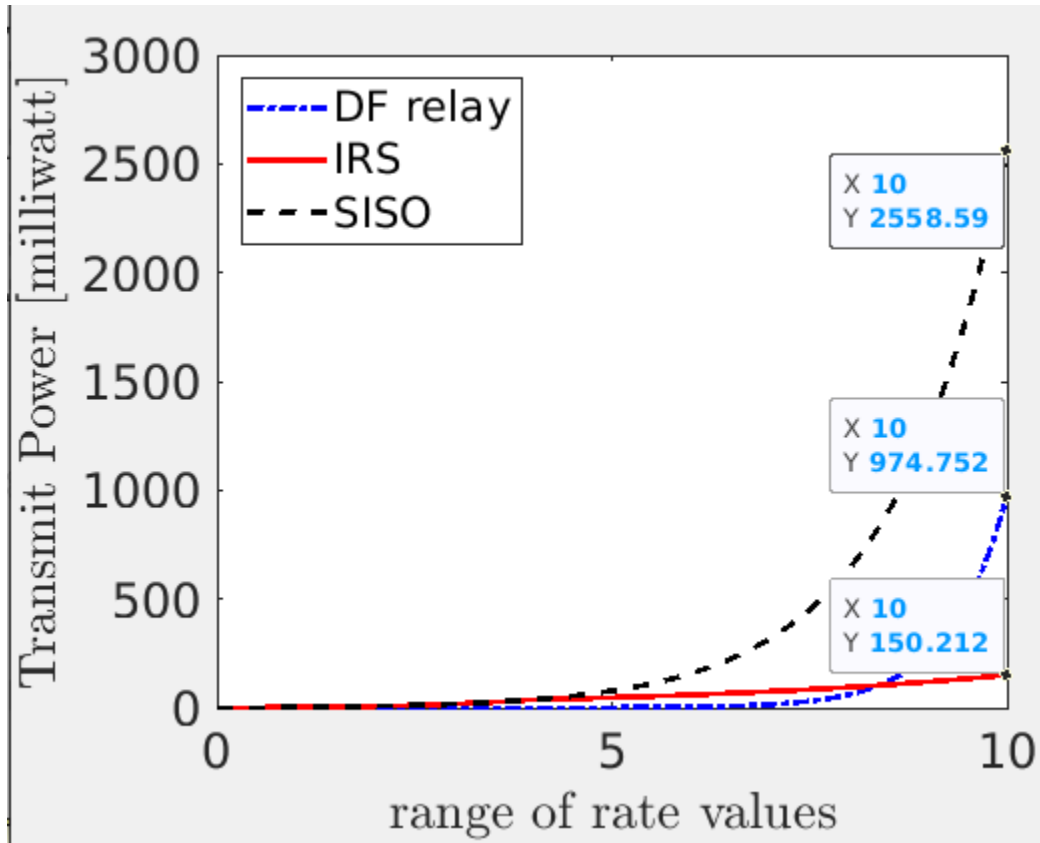
Καθορίζουμε το εύρος των τιμών d_1 στη ρύθμιση της προσομοίωσης.

$d_1 = 70 \text{ m}$;

Εκτελούμε τον κώδικα στο matlab και παίρνουμε τα παρακάτω γραφήματα.



Εικόνα 35 Energy Efficiency περίπτωση 7



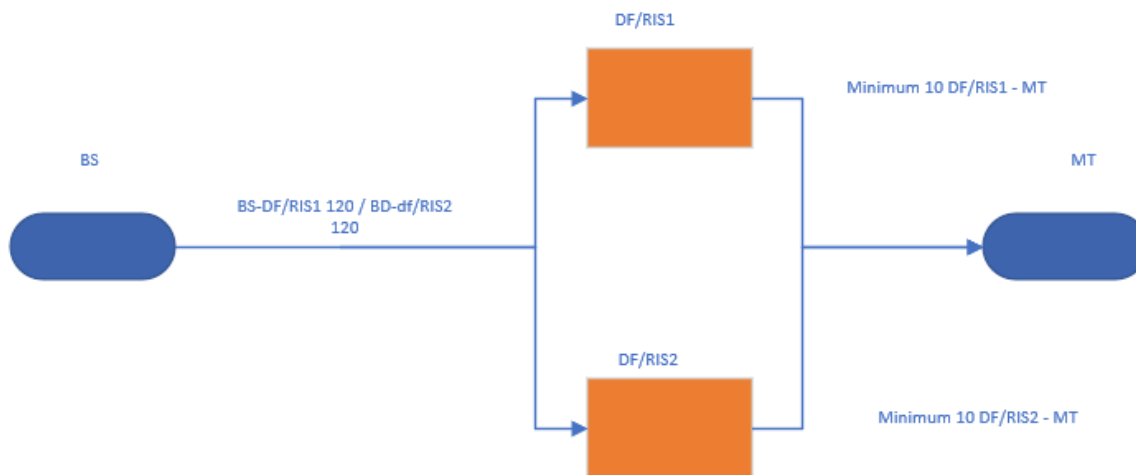
Εικόνα 36 Transmit Power περίπτωση 7

4.5.2 Σύγκριση DF Relay-RIS περίπτωση 7

Στην περίπτωση 7 όπου τα relays/ris είναι παράλληλα συμπεραίνουμε από τα σχήματα ότι το ris στη μέγιστη τιμή του (164 mbit/joule energy efficiency) έχει μικρότερη διαφορά από το DF (250 mbit/joule energy efficiency) συγκριτικά με την περίπτωση 4, δηλαδή όταν τα τοποθετήσουμε σε σειρά όπου εκεί φαίνεται ότι το DF αποδίδει βέλτιστα από τις περιπτώσεις που έχουμε εξετάσει μέχρι τώρα. Επίσης όταν εξετάσουμε την ακτίνα 10 του αλγορίθμου το RIS αποδίδει σε πολύ καλά επίπεδα (144 mbit/joule περίπου energy efficiency) ενώ το DF μειώνεται σημαντικά (56 mbit/joule περίπου energy efficiency). Επίσης διαπιστώνουμε (μέσω του σχήματος του transmit power) ότι η ενέργεια μετάδοσης που ξοδεύει το Simulation του Ris της περίπτωσης 7 στην τιμή 10 του άξονα x είναι λίγο στα 150 mw εν αντιθέσει με την ενεργεια που ξοδεύει το DF Simulation της περίπτωσης 7 στην τιμή 10 του άξονα x όπου είναι ιδιαίτερα υψηλή, ακόμη και συγκριτικά με το DF Simulation της

περίπτωσης 4 (κάτω από 500), όπου φτάνει τα 974 mw. Στη συγκεκριμένη σύγκριση διαπιστώνουμε ότι το Ris είναι πολύ πιο αξιόπιστο και σταθερό από το DF το οποίο σημειώνει απότομη αύξηση και ξαφνική μείωση στην αποδοσή του και στην κατανάλωση ενέργειας.

4.5.3 Περίπτωση 8



Εικόνα 37 Περίπτωση με 2 RIS/Relays παράλληλα σε απόσταση 120 m το καθένα

Η περίπτωση 8 έχει το ίδιο simulation με την περίπτωση 7. Δηλαδή, έχουμε 2 ris/relays παράλληλα.

Υπολογίζουμε τα channel gains και στη συνέχεια σε μια ξεχωριστή μεταβλητή αποθηκεύουμε το σύνολο για όλα τα ris/relay.

$\text{betaSumSR} = \text{betaSR} + \text{betaSR};$

$\text{betaSumRD} = \text{betaRD} + \text{betaRD};$

Στο σημείο των υπολογισμών του κώδικα αντικαθιστούμε τις μεταβλητές betaSR και betaRD με τις αντίστοιχες betaSum.

Οι αποστάσεις που έχουμε δώσει είναι όπως στην περίπτωση 2.

RIS Elements 10

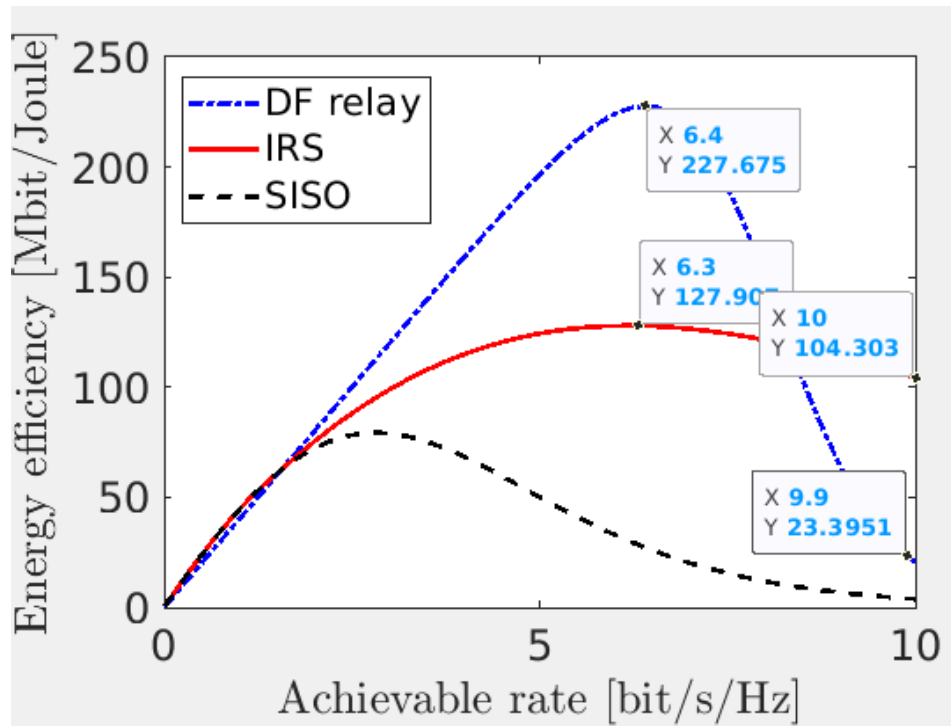
$d_{SR} = 120 \text{ m};$ απόσταση μεταξύ πηγής και IRS/Relay.

$d_n = 10 \text{ m};$ ελάχιστη απόσταση μεταξύ προορισμού και IRS/ρελέ.

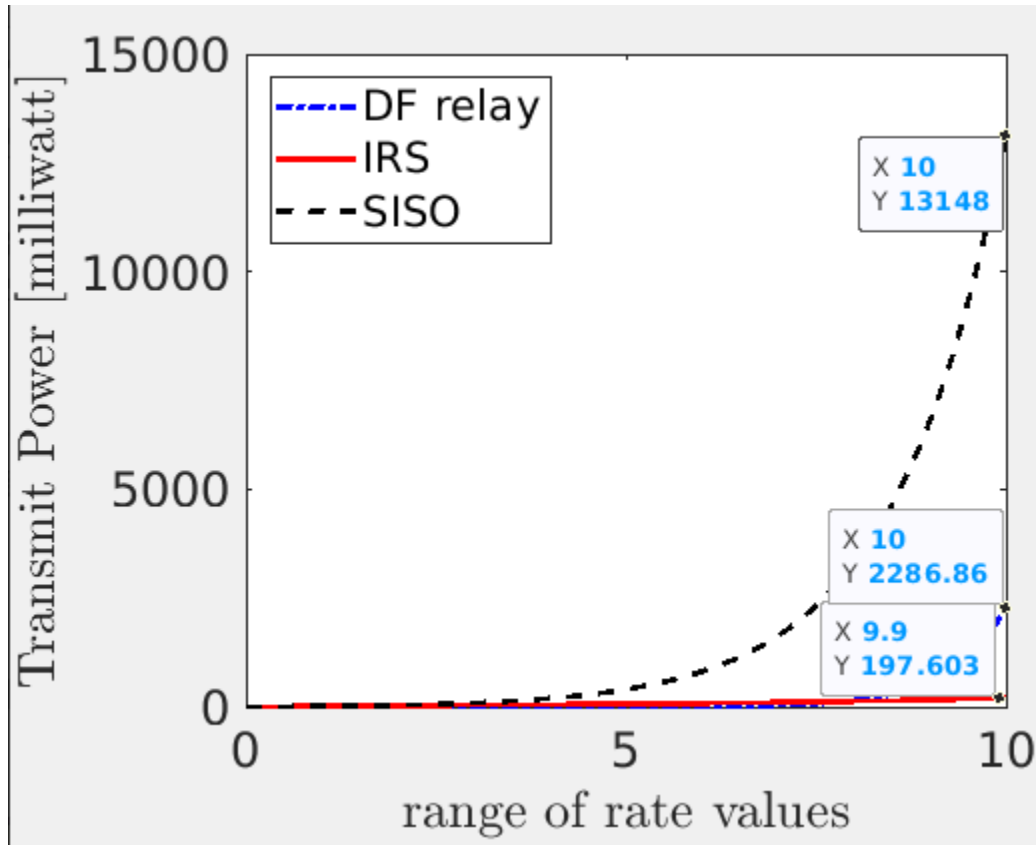
Καθορίζουμε το εύρος των τιμών d1 στη ρύθμιση της προσομοίωσης.

$d1 = 110 \text{ m};$

Εκτελούμε τον κώδικα στο matlab και παίρνουμε τα παρακάτω γραφήματα.



Εικόνα 38 Energy Efficiency περίπτωση 8



Εικόνα 39 Transmit Power περίπτωση 8

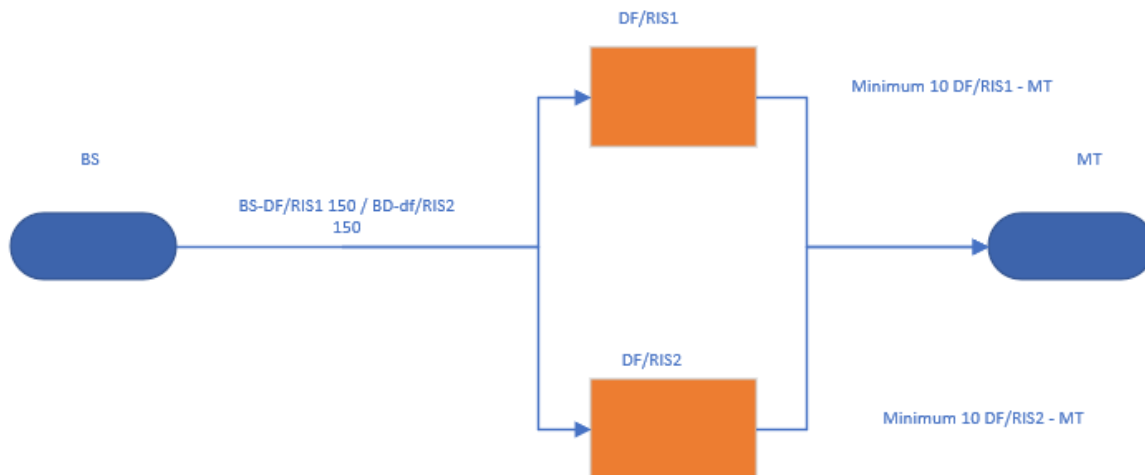
4.5.4 Σύγκριση DF Relay-Ris περίπτωσης 8

Εξετάζοντας την περίπτωση 8, όπου έχουμε ένα Simulation με 2 ris/relays παράλληλα και απόσταση μεταξύ πηγής και ris/relays αυξημένη στα 120 m διαπιστώνουμε τα ακόλουθα. Η διαφορά στο μέγιστο επίπεδο ενεργειακής απόδοσης αυτή τη φορά δεν είναι διπλάσια αλλά λιγότερο από διπλάσια. Η μέγιστη ενεργειακή απόδοση του DF Simulation φθάνει το νούμερο 227 mbit/joule ενώ η μέγιστη ενεργειακή απόδοση του RIS συστήματος φθάνει το 127 mbit/joule. Επίσης όταν ο αλγόριθμος φθάσει στη 10η επαναληψη το DF σύστημα απαιτεί 2286 mw transmit power ενώ το RIS σύστημα μόνο 197 mw. Εύκολα μπορούμε να οδηγηθούμε στο συμπέρασμα ότι, από αυτή και τις 2 προηγούμενες συγκρίσεις, το RIS έναντι του DF αποδίδει καλύτερα στην περίπτωση 8 όπου έχουμε 2 Ris/relays παράλληλα. Αυτό συμβαίνει καθώς το DF σύστημα έχει αρκετά χειρότερη απόδοση στην περίπτωση 8 με παράλληλα ris/relay απ'ότι στην περίπτωση 5 με ris/relay στη σειρά. Αντιθέτως το σύστημα RIS δεν φαίνεται να έχει μεγάλες αποκλίσεις τιμών στις 2 υλοποιήσεις (δηλαδή σε σειρά - περ.5 και παράλληλα - περ.8).

4.5.5 Σύγκριση RIS περιπτώσεων 8vs7

Στην περίπτωση 8 (που να υπενθυμίσουμε έχουμε 2 RIS αλλά αυτή τη φορά παράλληλα) η απόσταση μεταξύ πηγής RIS έχει αυξηθεί στα 120 m συγκριτικά με την περίπτωση 7 που η απόσταση είναι στο 80 m. Αυξάνοντας και στο συγκεκριμένο Simulation την απόσταση μεταξύ πηγής και RIS από 80 m σε 120 m παρατηρούμε μείωση της ενεργειακής απόδοσης και αύξηση της απαίτησης για transmit power. Περίπτωση 7 (164 ενεργειακή απόδοση mbit/joule - transmit power 150 mw) Περίπτωση 8 (Ενεργειακή απόδοση 127 mbit/joule transmit power 197 mw). Επαναλαμβάνεται το συμπέρασμα ότι η αύξηση της απόστασης παίζει καταλυτικό ρόλο στην απόδοση του συστήματος.

4.5.6 Περίπτωση 9



Εικόνα 40 Περίπτωση με 2 RIS/Relays παράλληλα σε απόσταση 150 m το καθένα

Η περίπτωση 9 έχει το ίδιο simulation με την περίπτωση 7. Δηλαδή, έχουμε 2 ris/relays παράλληλα.

Υπολογίζουμε τα channel gains και στη συνέχεια σε μια ξεχωριστή μεταβλητή αποθηκεύουμε το σύνολο για όλα τα ris/relay.

$\beta_{\text{SumSR}} = \beta_{\text{SR}} + \beta_{\text{SR}}$;

$\beta_{\text{SumRD}} = \beta_{\text{RD}} + \beta_{\text{RD}}$;

Στο σημείο των υπολογισμών του κώδικα αντικαθιστούμε τις μεταβλητές betaSR και betaRD με τις αντίστοιχες betaSum.

Οι αποστάσεις που έχουμε δώσει είναι όπως στην περίπτωση 3.

RIS Elements 10

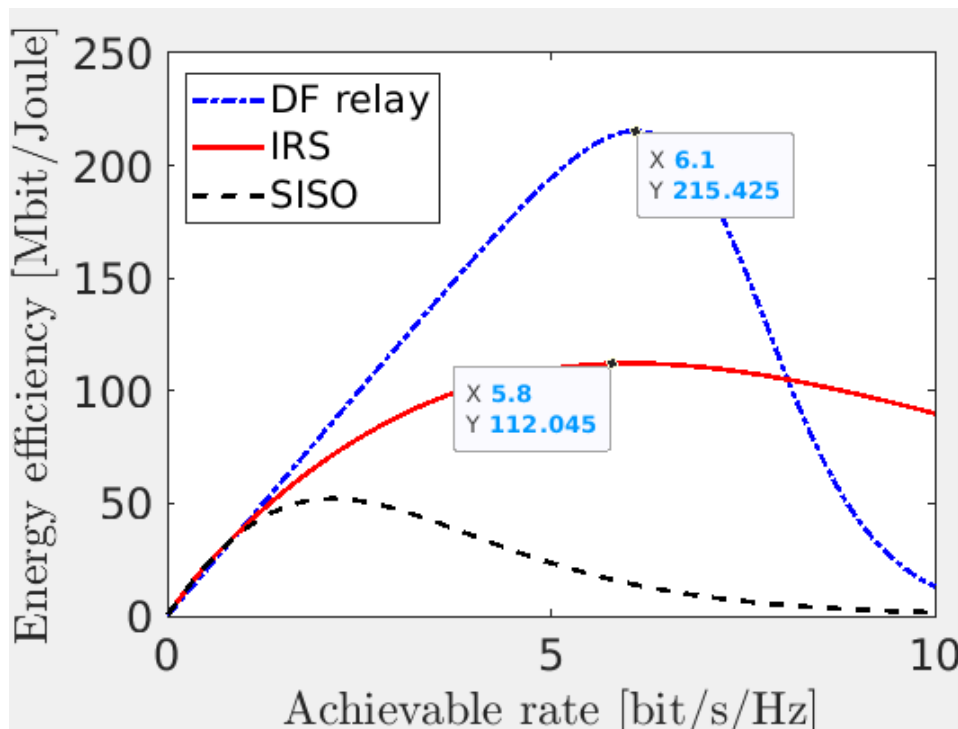
$d_{SR} = 150$ m; απόσταση μεταξύ πηγής και IRS/Relay.

$d_n = 10$ m; ελάχιστη απόσταση μεταξύ προορισμού και IRS/ρελέ.

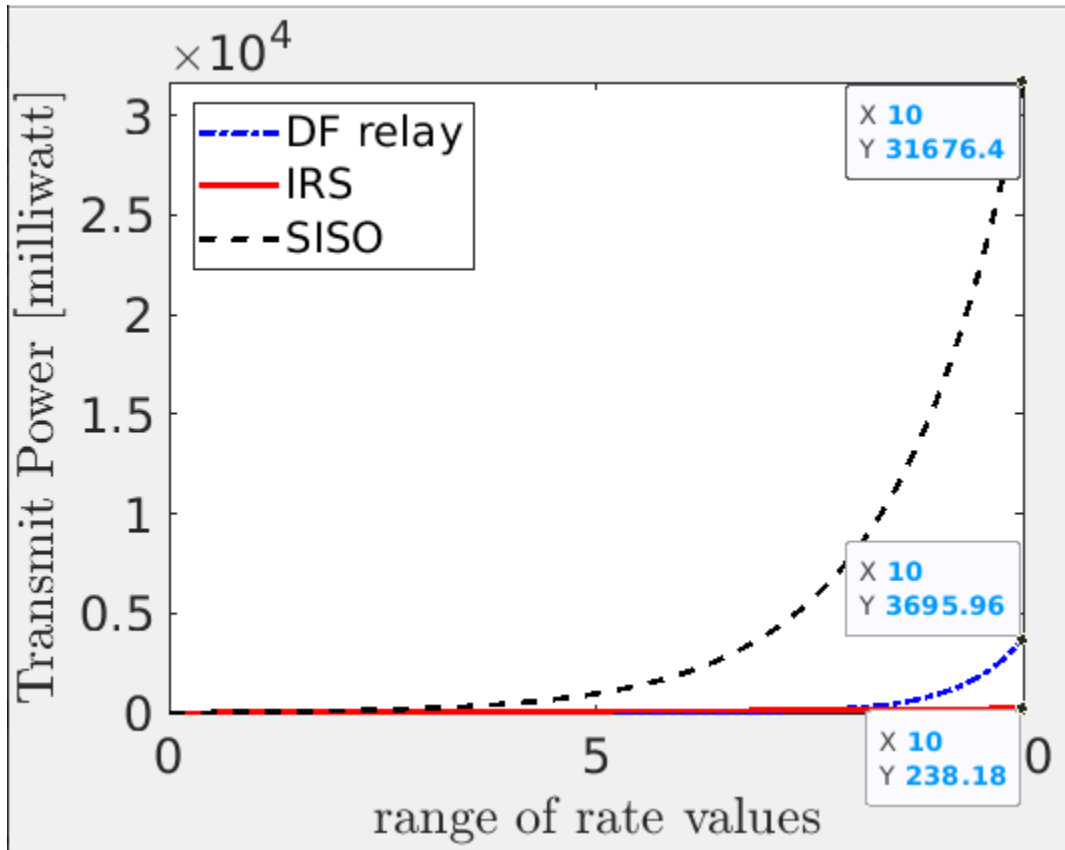
Καθορίζουμε το εύρος των τιμών d1 στη ρύθμιση της προσομοίωσης.

$d1 = 140$ m;

Εκτελούμε τον κώδικα στο matlab και παίρνουμε τα παρακάτω γραφήματα.



Εικόνα 41 Energy Efficiency περίπτωση 9



Εικόνα 42 Transmit Power περίπτωση 9

4.5.7 Σύγκριση DF Relay-Ris περίπτωσης 9

Αν μελετήσουμε την περίπτωση 9, όπου η απόσταση μεταξύ πηγής και Relay/Ris είναι στα 150 m και μεταξύ πηγής και δέκτη μεσολαβούν 2 Ris/Relays αλλά αυτή τη φορά παράλληλα, θα διαπιστώσουμε τα παρακάτω πράγματα. Τα 2 συστήματα έχουν ενισχυθεί αλλά δεν αποδίδουν το ίδιο καλά αντίστοιχα με την περίπτωση 6 που τα ris/relay είναι 2 αλλά σε σειρά. Αυτή τη φορά η μεγιστη ενεργειακή απόδοση του DF συστήματος είναι 215 mbit/joule και του RIS συστήματος 112 mbit/joule. Το DF simulation γνωρίζει ξαφνικά απότομη μείωση και ξεκινάει να καταναλώνει μεγάλα νούμερα transmit power (3695 mw στη 10η επαναληψη). Το RIS που μέσα από όλες τις μετρήσεις και τις μελετες έχει αποδειχθεί το πιο σταθερό για μεγάλες επαναλήψεις καταναλώνει 238 mw περίπου transmit power στη 10η επανάληψη. Η συγκεκριμένη περίπτωση όπου τα στοιχεία του συστήματος είναι 2 και παράλληλα αποδεικνύεται καλύτερη από το να είχαμε ένα μόνο στοιχείο αλλά χειρότερη από το να είχαμε 2 στοιχεία σε σειρά.

4.5.8 Σύγκριση RIS περιπτώσεων 9vs8

Όταν έχουμε 2 παράλληλα RIS στο simulation φαίνεται να αποδίδει ελαφρώς χειρότερα σε σειρά αν αυξήσουμε την απόσταση πηγής RIS από 120 m σε 150 m. Στην απόσταση 120 δηλαδή στην περίπτωση 8 η μέγιστη ενεργειακή απόδοση είναι 127 mbit/joule περίπου ενώ όταν η απόσταση αυξηθεί στο 150 η μέγιστη ενεργειακή απόδοση του συστήματος αγγίζει το 112 mbit/joule περίπου. Επίσης η μέγιστη transmit power στην απόσταση 120 m είναι 197 mw περίπου ενώ στην απόσταση 150 m είναι 238 mw περίπου. Το σύστημα και σ' αυτές τις 2 περιπτώσεις είναι ενισχυμένο με 2 RIS, αλλά παράλληλα αυτή τη φορά, και γιαυτό παρά την αύξηση της απόστασης μεταξύ πηγής και RIS δεν σημειώνει σημαντική μείωση της ενεργειακής απόδοσης και ιδιαίτερη αύξηση του transmit power.

4.5.9 Σύγκριση RIS περιπτώσεων 9vs7

Στις περιπτώσεις 9 και 7 συναντάμε το κοινό χαρακτηριστικό ότι μεταξύ πηγής και δέκτη μεσολαβούν 2 RIS παράλληλα αλλά αυτές οι 2 περιπτώσεις έχουν τη διαφορά ότι η απόσταση μεταξύ πηγής και RIS διαφέρει σε κάθε μία από τις 2. Στην περίπτωση 7 είναι 80 m και στην περίπτωση 9 είναι 150 m. Εξετάζοντας το γράφημα τη περίπτωσης 7 παρατηρούμε ότι η μέγιστη energy efficiency είναι 164 mbit/joule περίπου και η μέγιστη transmit power είναι 150. Εξετάζοντας το γράφημα της περίπτωσης 9 διαπιστώνουμε ότι η μέγιστη ενεργειακή απόδοση είναι 112 mbit/joule και η μέγιστη transmit power 238. Άλλη μια φορά επαναλαμβάνεται η εξαγωγή του συμπεράσματος ότι με την αύξηση της απόστασης η απόδοση μειώνεται (από 164 mbit/joule σε 112 mbit/joule) και η transmit power αυξάνεται (από 147 mw σε 238 mw). Το σύστημα απαιτεί ενίσχυση για να παραμείνει εξίσου αποδοτικό.

4.6 Σχόλια και Συγκρίσεις με κριτήριο τον σχηματισμό

4.6.1 Σχολιασμός Περιπτώσεων 1,4,7

Οι 3 αυτές περιπτώσεις έχουν το κοινό στοιχείο ότι η πηγή και ο προορισμός βρίσκονται στην ίδια απόσταση. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε τον πιο απλό σχηματισμό, δηλαδή πηγή ένα ris/relay και προορισμός. Στην περίπτωση 4 μεσολαβούν 2 ris/relay σε σειρά ώστε το σήμα να φτάσει στον προορισμό. Στην περίπτωση 7 υπάρχουν 2 ris/relay παράλληλα σε ίδια απόσταση από πηγή και προορισμό για ενίσχυση του σήματος.

Και στις 3 περιπτώσεις το μεγαλύτερο energy efficiency ξεχωριστά σε κάθε μία πετυχαίνει το decode and forward relay αλλά σε βάθος χρόνου είναι καλύτερο το ris, καθώς αν παρατηρήσουμε στα σχήματα του transmit power από ένα σημείο κι έπειτα το DF relay

απαιτεί ολόενα και περισσότερη ενέργεια. Γεγονός που οδηγεί την αποδοτικότητα του να πέφτει σε πολύ χαμηλά επίπεδα ενώ το ris κι αυτό απαιτεί μια ποσότητα ενεργειας, αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό κι αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι όσο μεγαλώνει η ακτινα του αλγορίθμου η αποδοτικότητα του DF relay φθίνει πολύ πιο γρήγορα απ'του ris και η απαίτηση για transmit power του DF relay είναι πολύ μεγαλύτερη από του ris.

Στην περίπτωση 1 η ανώτερη ενεργειακή απόδοση του DF είναι 231 mbit/joule ενώ του Ris η μέγιστη είναι 146 mbit/joule. Στην περίπτωση 4 αντίστοιχα έχουμε DF 278 mbit/joule και Ris 180 mbit/joule. Στην περίπτωση 7 αντίστοιχα συναντάμε τις τιμές DF 250 mbit/joule και Ris περίπου 164 mbit/joule. Στις 3 συγκεκριμένες περιπτώσεις, που η απόσταση που μεσολαβεί μεταξύ της πηγής και του τελικού df/ris που επικοινωνεί χωρίς κάποιο εμπόδιο με το δέκτη είναι 80, σύμφωνα με τις μετρήσεις η πιο ενεργειακά αποδοτική είναι η 2η περίπτωση όπου τα ris/df βρίσκονται σε σειρά δηλαδή στα 40 m το ένα ris/relay και στα 80 m το άλλο από την πηγή.

4.6.2 Σύγκριση RIS περιπτώσεων 1,4,7

Η περίπτωση 4 και η περίπτωση 7 έχουν ανώτερη ενεργειακή απόδοση 180 mbit/joule και 164 mbit/joule αντίστοιχα, αν παρατηρήσουμε όταν η ακτίνα του αλγόριθμου φθάσει κοντα στο 10 στην περίπτωση 4 η ενεργειακή αποδοτικότητα διατηρείται σε υψηλότερα επίπεδα, δηλαδή στο 164 mbit/joule ενώ στην 7 πέφτει στο 144 mbit/joule. Αν επίσης παρατηρήσουμε στα σχήματα του transmit power ο δείκτης στην περίπτωση 7 αρχίζει και ξοδεύει περισσότερη ενέργεια μετάδοσης(στο σημείο 8.4 του άξονα x ξοδεύει 103 mw και έχει αυξητική τάση προς το 10) συγκριτικά με την περίπτωση 4 (στο σημείο 9.1 του άξονα x η ενέργεια μετάδοσης είναι 92 mw περίπου κι ανεβαίνει πολύ λίγο μέχρι το 10 του άξονα x). Στην περίπτωση 1 επίσης κάνουμε την εξής παρατήρηση σχετικά με το transmit power που ξοδεύεται. Στο σημείο 10 του άξονα x η κατανάλωση ενέργειας φθάνει σε πολύ υψηλά επίπεδα δηλαδή στο 230 mw ενώ από το 8.3 έχει ήδη ξεπεράσει το 160 mw ενώ συγχρόνως αν εξετάσουμε το γράφημα της ενεργειακής απόδοσης θα παρατηρήσουμε ότι όταν πλησιάζει το 10 πέφτει σε πολύ χαμηλά επίπεδα αντιθέτως με τις περιπτώσεις 4 και 7 που διατηρούνται σε ένα καλύτερο επίπεδο. Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι στη συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ πομπού και RIS που είναι 80 m, αυξάνοντας τα ris/relay είτε σε σειρά είτε παράλληλα βελτιώνουμε την ενεργειακή απόδοση και παράλληλα μειώνουμε την κατανάλωση ενέργειας μετάδοσης. Η καλύτερη από τις δύο περιπτώσεις με μικρή διαφορά θεωρούμε ότι είναι η περίπτωση με τα RIS ris/relay σε σειρά.

4.6.3 Σύγκριση DF relays περιπτώσεων 1,4,7

Στην περίπτωση 1 η ενεργειακή απόδοση φθάνει στο ανώτερο επίπεδο 231 mbit/joule ενώ παράλληλα στο γράφημα του transmit power στο σημείο 10 του άξονα x η απαίτηση για ενέργεια φθάνει το νούμερο 1949 mw. Στην περίπτωση 4 η ενεργειακή απόδοση φθάνει το 278 mbit/joule και η ενέργεια μετάδοσης είναι λίγο πιο κάτω από το 500 mw όταν αγγίζει το

10 στον άξονα των x. Η περίπτωση 7 έχει ενεργειακή απόδοση 227 mbit/joule και το transmit power είναι 2286 mw όταν βρίσκεται στο σημείο 10 του άξονα x. Από τις 3 περιπτώσεις σίγουρα η χειρότερη είναι η περίπτωση 7 δηλαδή δύο DF relays παράλληλα καθώς η συγκεκριμένη περίπτωση πετυχαίνει τη μικρότερη ενεργειακή απόδοση καθώς και την υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Και στα 2 γραφήματα παρουσιάζει τα χειρότερα αποτελέσματα καθώς όταν μειώνεται η ενεργειακή απόδοση λογικό είναι να αυξάνεται η κατανάλωση ενέργειας. Η περίπτωση 1 είναι ελάχιστα καλύτερη από την 7 καθώς τα νούμερα της είναι ελάχιστα καλύτερα. Εκεί που βλέπουμε τεράστια βελτίωση είναι όταν βάλουμε τα DF relays σε σειρά, στην περίπτωση 4 δηλαδή, όπου έχουμε αρκετά βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση και ιδιαίτερα χαμηλότερη transmit power. Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τα DF relays σε σειρά είναι η με διαφορά πιο αποδοτική λύση από τις 3 περιπτώσεις που συγκρίναμε.

4.6.4 Σχολιασμός Περιπτώσεων 2,5,8

Οι 3 αυτές περιπτώσεις όπως και οι προηγούμενες 3 έχουν το κοινό χαρακτηριστικό ότι η πηγή κι ο προορισμός τους έχουν την ίδια απόσταση μεταξύ τους. Όμως η κάθε περίπτωση είναι διαφορετική. Η περίπτωση 2 είναι η πιο απλή, δηλαδή έχει μόνο ένα ris/relay να μεσολαβεί μεταξύ πηγής και προορισμού. Η περίπτωση 5 έχει 2 ris/relay να μεσολαβούν σε σειρά και τέλος η 8 έχει 2 ris/relay παράλληλα. Η απόσταση μεταξύ πηγής και IRS/Relay έχει αυξηθεί από 80 m σε 120 m οπότε θα εξετάσουμε τι διαφορές βρίσκουμε μετά από αυτήν την αύξηση.

4.6.5 Σύγκριση RIS περιπτώσεων 2,5,8

Σ'αυτές τις 3 περιπτώσεις υπάρχει το κοινό στοιχείο ότι η απόσταση μεταξύ πηγής και τελικού RIS είναι 120 m. Η διαφορά είναι ότι στην περίπτωση 2 έχουμε ένα στοιχείο να μεσολαβεί, στην περίπτωση 5 2 στοιχεία σε σειρά που μοιράζονται την απόσταση ενώ στην απόσταση 8 2 στοιχεία παράλληλα. Το πιο αποδοτικό είναι το σύστημα της περίπτωσης 5 όπου έχει μεγιστη ενεργειακή απόδοση 148 mbit/joule. Δεύτερο είναι το σύστημα με τα RIS παράλληλα με energy efficiency 127 mbit/joule ενώ χειρότερα αποδίδει το σύστημα με το μονό RIS (99 mbit/joule). Το 2 απαιτεί 313 mw transmit power ενώ το 5 που έχει τη μικρότερη απαίτηση 149 mw. Το σύστημα με τα παράλληλα RIS απαιτεί 197 mw transmit power.

4.6.6 Σύγκριση DF relays περιπτώσεων 2,5,8

Εξετάζοντας τα συστήματα DF των περιπτώσεων 2,5,8 παρατηρούμε, από τα γραφήματα, ότι στην περίπτωση 2 (όπου μεσολαβεί ένα μόνο ris/relay) έχουμε energy efficiency 209 mbit/joule και transmit power 3981 mw, στην περίπτωση 5 (όπου το σύστημα αποτελείται από 2 ris/relay σε σειρά) έχουμε energy efficiency 261 mbit/joule και transmit power 611 mw, και στην περίπτωση 8 (όπου το σύστημα αποτελείται από 2 ris/relay αλλά παράλληλα) η energy efficiency είναι 227 mbit/joule και η transmit power είναι 2286 mw. Από τις συγκεκριμένες παρατηρήσεις που κάναμε οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι αποδίδει με

διαφορά καλύτερα το σύστημα της περίπτωσης 5, δηλαδή αυτό που αποτελείται από 2 στοιχεία DF σε σειρά. Ακολουθεί το σύστημα της περίπτωσης 8, δηλαδή αυτό που έχει 2 στοιχεία DF παράλληλα. Ενώ την χειρότερη απόδοση έχει το σύστημα με μόνο 1 ris/relay.

4.6.7 Σχολιασμός Περιπτώσεων 3,6,9

Και σ' αυτές τις 3 περιπτώσεις συναντάμε το κοινό στοιχείο ότι η απόσταση μεταξύ πηγής και RIS είναι ίδια (150 m) κι αυτός είναι ο λόγος που τις σχολιάζουμε. Η διαφορά μεταξύ τους είναι ότι στην περίπτωση 3 έχουμε μόνο ένα στοιχείο RIS να μεσολαβεί μεταξύ πηγής και προορισμού, στην περίπτωση 6 έχουμε 2 RIS σε σειρά να μεσολαβούν, ενώ στην περίπτωση 9 μεσολαβούν 2 RIS αλλά αυτή τη φορά παράλληλα. Η απόσταση μεταξύ πηγής και IRS/Relay έχει αυξηθεί από 120 m σε 150 m, συγκριτικά με τις περιπτώσεις 2,5,8, οπότε θα εξετάσουμε τι διαφορές βρίσκουμε μετά από αυτήν την αύξηση.

4.6.8 Σύγκριση RIS περιπτώσεων 3,6,9

Στον πρώτο σχηματισμό της περίπτωσης 3 όπου μεσολαβεί μόνο ένα RIS ris/relay μεταξύ πηγής και προορισμού η ενεργειακή απόδοση είναι πολύ χαμηλή καθώς φθάνει στο νούμερο 84 mbit/joule ενώ η απαίτηση για transmit power φθάνει στο 378 mw. Στον σχηματισμό της περίπτωσης 6 όπου έχουμε 2 RIS ris/relay σε σειρά η ενεργειακή απόδοση φθάνει στο 131 mbit/joule και η απαίτηση για ενέργεια μετάδοσης φθάνει στο 176 mw. Στην περίπτωση 9 όπου έχουμε 2 RIS ris/relay παράλληλα η ενεργειακή απόδοση φθάνει στο 112 mbit/joule και η απαίτηση για transmit power στο 232 mw. Οπότε διαπιστώνουμε ότι το σύστημα της περίπτωσης 6 αποδίδει καλύτερα. Δηλαδή αυτό με τα 2 RIS ris/relay σε σειρά.

4.6.9 Σύγκριση DF Relays περιπτώσεων 3,6,9

Παρατηρώντας τα γραφήματα των περιπτώσεων 3, 6 και 9 διαπιστώνουμε ότι το σύστημα DF της περίπτωσης 3 (όπου ανάμεσα στην πηγή και στον προορισμό μεσολαβεί ένα DF ris/relay και η απόσταση μεταξύ πηγής και DF ris/rela είναι 150 m) σημειώνει μέγιστη ενεργειακή απόδοση 197 mbit/joule περίπου και μέγιστη ενέργεια μετάδοσης 7391 mw. Το σύστημα DF της περίπτωσης 6 (όπου ανάμεσα στην πηγή και στον προορισμό μεσολαβούν 2 DF στοιχεία σε σειρά και η απόσταση μεταξύ πηγής και τελικού DF ris/relay είναι στα 150 m) καταγράφει μέγιστη ενεργειακή απόδοση 251 mbit/joule και μέγιστη transmit power 917 mw. Το σύστημα DF της περίπτωσης 9 (όπου ανάμεσα στην πηγή και τον προορισμό μεσολαβούν 2 DF στοιχεία και η απόσταση μεταξύ πηγής και DF ris/relay είναι στο 150 m) σημειώνει μέγιστη ενεργειακή απόδοση 215 mbit/joule και ανώτερη κατανάλωση ενέργειας μετάδοσης 3695 mw. Η χειρότερη περίπτωση από τις 3, αν κρίνουμε από τα νούμερα είναι η περίπτωση 3 με το ένα DF ris/relay όπου σημειώνει την μικρότερη ενεργειακή απόδοση και την υψηλότερη με διαφορά απαίτηση για transmit power. Από τα υπόλοιπα 2 καλύτερα φαίνεται να αποδίδει το DF σύστημα της περίπτωσης 6 με τα στοιχεία σε σειρά καθώς σημειώνει την ανώτερη ενεργειακή απόδοση και τη χαμηλότερη απαίτηση για transmit power ενώ το δεύτερο καλύτερο Simulation είναι το DF σύστημα της περίπτωσης 9.

Συμπεραίνουμε πάντως ότι σε μεγαλύτερη απόσταση και ενισχύοντας το σύστημα με περισσότερα στοιχεία η απόδοση αυξάνεται η απαίτηση για transmit power μειώνεται συγκριτικά με την περίπτωση 3 όπου το σύστημα είναι ενισχυμένο μόνο με ένα ris/relay.

4.6.10 Σύγκριση SISO περιπτώσεων 1,2,3

Θα συγκρίνουμε τις 3 αυτές περιπτώσεις, καθώς οι υπόλοιπες είναι ίδιες. Ο κώδικας και για τις 9 υλοποιήσεις είναι ίδιος αλλά υπάρχει μια μικρή διαφοροποίηση που χωρίζει τις περιπτώσεις σε 3 διαφορετικές κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία είναι η απόσταση 80 m μεταξύ πηγής και προορισμού όπου ανήκουν οι περιπτώσεις 1,4,7. Η δεύτερη κατηγορία είναι η απόσταση 120 m όπου ανήκουν οι περιπτώσεις 2,5,8. Η τρίτη κατηγορία είναι η απόσταση 150 m όπου ανήκουν οι περιπτώσεις 3,6,9.

Εδώ ο μόνος παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση και κατανάλωση transmit power είναι η αυξομείωση της απόστασης μεταξύ πηγής και προορισμού. Δηλαδή το σύστημα δεν έχει κάποια υποβοήθηση από ris/relays ris/relay οπότε επόμενο είναι, όπως διαπιστώνουμε από τα σχήματα να έχει τη μικρότερη απόδοση και τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας μετάδοσης. Στην περίπτωση 1 που η απόσταση είναι 80 m έχουμε energy efficiency 146 mbit/joule και transmit power 2558 mw. Στην περίπτωση 2 έχουμε energy efficiency 81 mbit/joule και transmit power 13418 mw. Στην περίπτωση 3 έχουμε energy efficiency 52 mbit/joule και transmit power 31676 mw. Οπότε επιβεβαιώνουμε το αυτονόητο, ότι η αύξηση της απόστασης μειώνει την ενεργειακή απόδοση και κάνει το σύστημα να απαιτεί περισσότερη ενέργεια μετάδοσης.

4.7 Περιπτώσεις με 3 RIS/Relays σε σειρά και παράλληλα

4.7.1 Περίπτωση 1



Εικόνα 43 Περίπτωση με 3 RIS/Relays σε σειρά σε συνολική απόσταση 150 m

Στην περίπτωση 1 έχουμε 3 ris/relays που μεσολαβούν ανάμεσα σε πηγή και προορισμό. Οπότε έχουμε τις εξής αλλαγές ώστε η συνολική απόσταση να είναι 150 και να συγκριθεί με τις αντιστοιχες περιπτώσεις.

Καθορίζουμε τις αποστάσεις στη ρύθμιση προσομοίωσης.

RIS Elements 10

$d_{SR} = 50$ m; απόσταση μεταξύ πηγής και IRS/Relay1.

$D_{RR1} = 50$ m; απόσταση μεταξύ του irs/relay1 και του irs/relay2.

$D_{RR2} = 50$ m; απόσταση μεταξύ του irs/relay2 και του irs/relay3.

$d_v = 10$ m; ελάχιστη απόσταση μεταξύ προορισμού και IRS/relay2.

Καθορίζουμε το εύρος των τιμών d_1 στη ρύθμιση της προσομοίωσης.

$d_1 = 140$ m;

Διαμορφώνουμε και τους τύπους υπολογισμού αναλόγως.

Υπολογίζουμε την απόσταση μεταξύ πηγής και προορισμού

$d_{SD} = \sqrt{d_1^2 + d_v^2}$;

Υπολογίζουμε την απόσταση μεταξύ irs/relay2 και προορισμού

Η αλλαγή που κάνουμε στον τύπο είναι ότι προσθέτουμε το d_{SR} και το d_{RR} (Πηγή-irs/relay1, irs/relay1-irs/relay2, irs/relay2-irs/relay3) καθώς τώρα μεσολαβούν 2 irs/relays στο simulation μεταξύ πηγής και προορισμού.

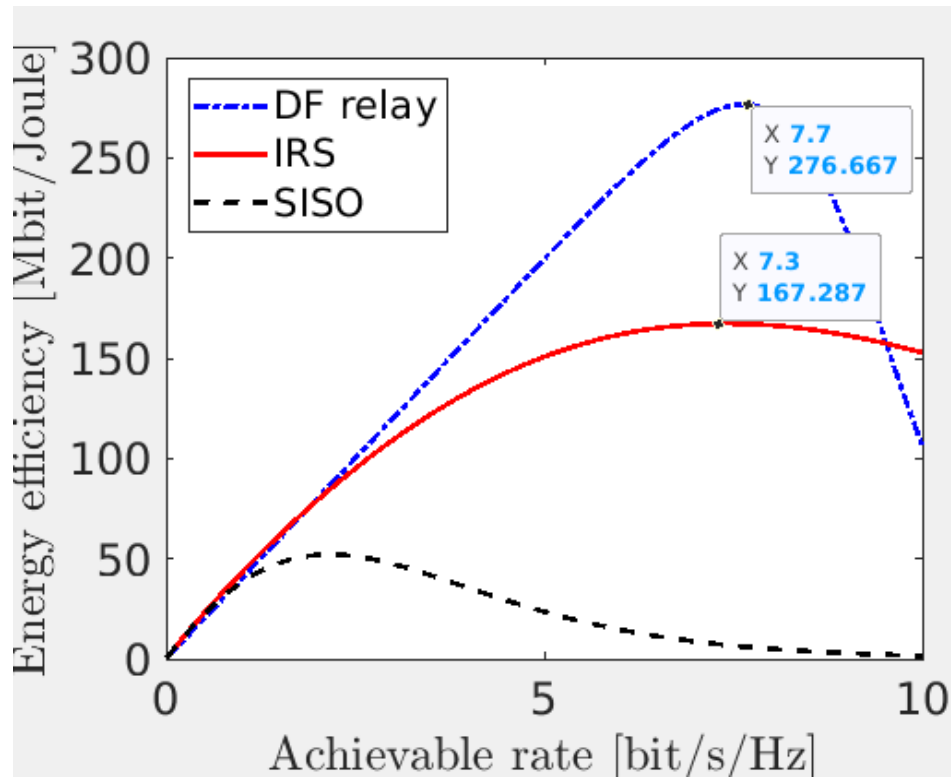
$d_{RD} = \sqrt{(d_1 - (d_{SR} + d_{RR1} + d_{RR2}))^2 + d_v^2}$;

Στη συνέχεια υπολογίζουμε το β_{SR} , β_{RR1} και β_{RR2} , τα προσθέτουμε και αποθηκεύουμε το αποτέλεσμά τους στην μεταβλητή $\beta_{SumRelays}$.

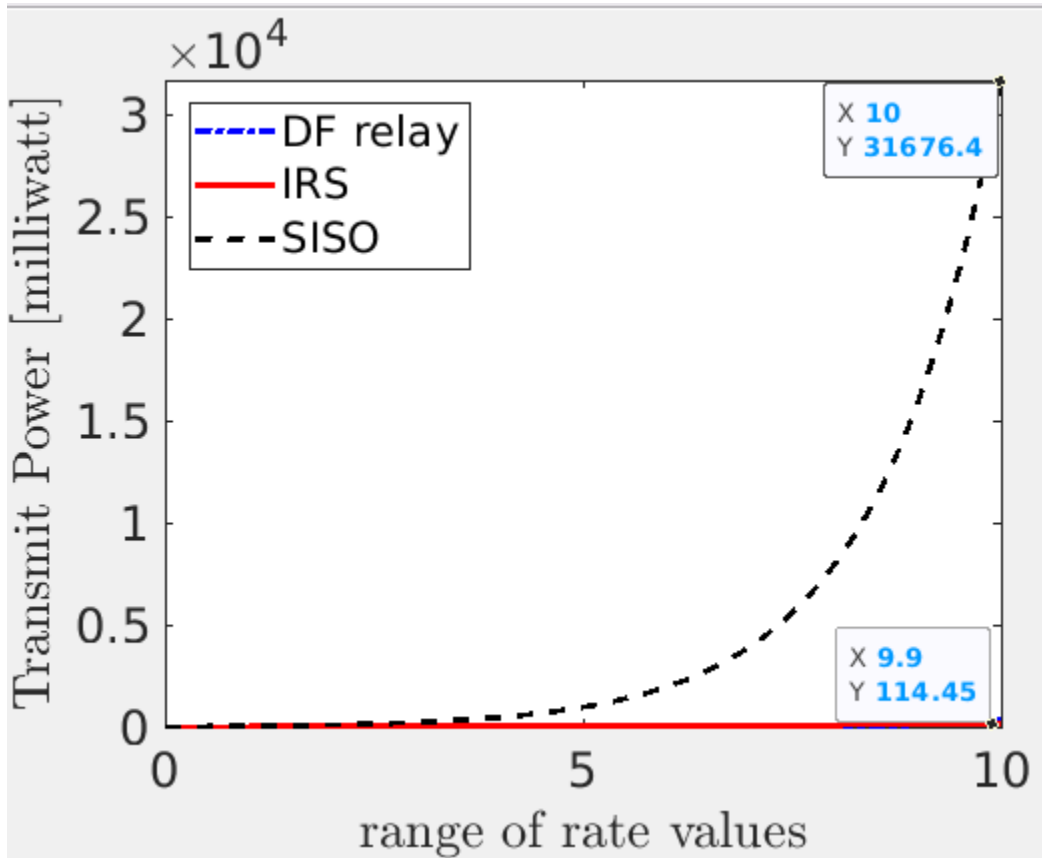
$\beta_{SumRelays} = \beta_{SR} + \beta_{RR1} + \beta_{RR2}$;

Στο τέλος του κώδικα όπου γίνονται οι υπολογισμοί της ενεργειακής αποδοτικότητας του transmit power κάνουμε αντικατάσταση της μεταβλητής β_{SR} με τη μεταβλητή $\beta_{SumRelays}$.

Εκτελούμε τον κώδικα και παίρνουμε τις εξής δύο γραφικές παραστάσεις.



Εικόνα 44 Energy Efficiency περίπτωση 1

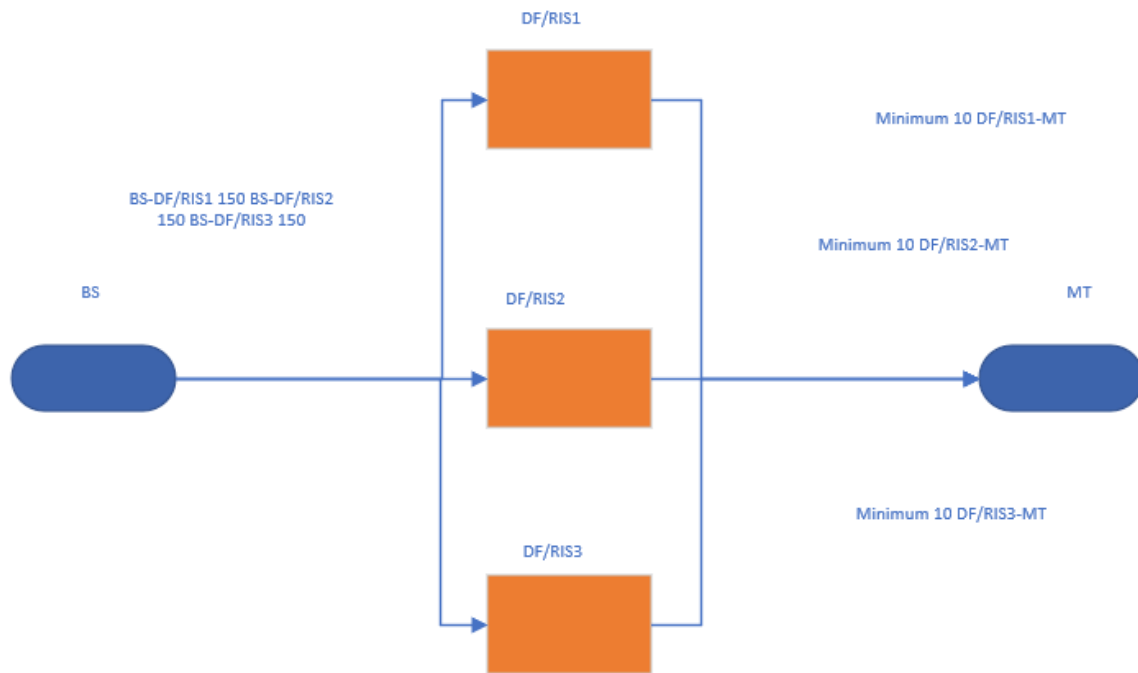


Εικόνα 45 Transmit Power περίπτωση 1

4.7.2 Σύγκριση περιπτώσεων τριών RIS/Relays σε σειρά vs δύο RIS/Relays σε σειρά

Προσθέτοντας ένα ακόμη ris/relay μεταξύ πηγής και προορισμού σε σειρά παρατηρούμε ότι το σύστημα αποδίδει καλύτερα από ότι όταν είχαμε 2 ris/relay σε σειρά. Για του λόγου το αληθές θα παραθέσουμε κάποια νούμερα που αποδεικνύουν το συγκεκριμένο γεγονός. Η μέγιστη ενεργειακή απόδοση του Simulation με τα 3 στοιχεία είναι 167 mbit/joule ενώ του μοντέλου με τα 2 στοιχεία είναι στο 131 mbit/joule. Επίσης η μέγιστη απαίτηση για transmit power στο πρώτο σύστημα φθάνει στα 114 mw ενώ στο 2ο που αναφέρθηκε φθάνει στα 176 mw. Συμπεραίνουμε ότι προσθέτοντας ένα RIS ris/relay αυξήσαμε την ενεργειακή απόδοση και μειώσαμε την απαίτηση για transmit power με όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους του αλγορίθμου να παραμένουν ίδιες.

4.7.3 Περίπτωση 2



Εικόνα 46 Περίπτωση με 3 RIS/Relays παράλληλα σε απόσταση 150 m το καθένα

Στην περίπτωση 2 έχουμε 3 ris/relays παράλληλα.

Υπολογίζουμε τα channel gains και στη συνέχεια σε μια ξεχωριστή μεταβλητή αποθηκεύουμε το σύνολο για όλα τα ris/relay.

$\text{betaSumSR} = \text{betaSR} + \text{betaSR} + \text{betaSR};$

$\text{betaSumRD} = \text{betaRD} + \text{betaRD} + \text{betaRD};$

Στο σημείο των υπολογισμών του κώδικα αντικαθιστούμε τις μεταβλητές betaSR, betaRD με τις αντίστοιχες betaSum.

Οι αποστάσεις που έχουμε δώσει είναι όπως στην περίπτωση 3.

RIS elements 10x3

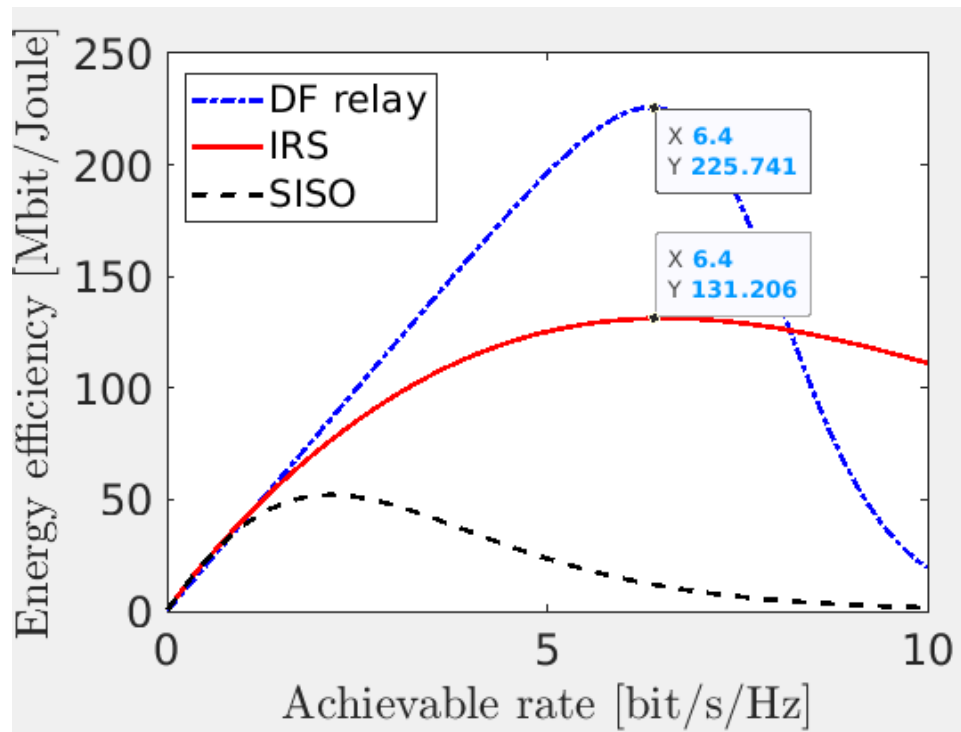
$d_{\text{SR}} = 150 \text{ m};$ απόσταση μεταξύ πηγής και IRS/Relay.

$d_n = 10 \text{ m};$ ελάχιστη απόσταση μεταξύ προορισμού και IRS/ρελέ.

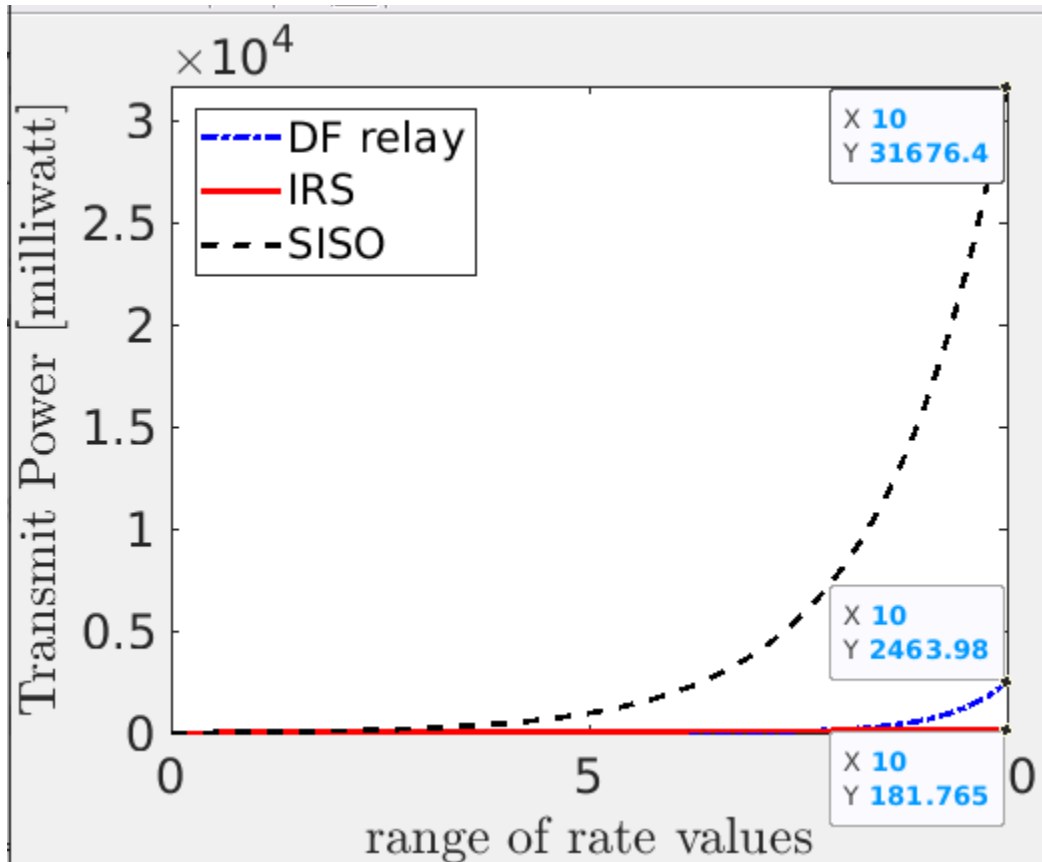
Καθορίζουμε το εύρος των τιμών d1 στη ρύθμιση της προσομοίωσης.

$d_1 = 140$ m;

Εκτελούμε τον κώδικα στο matlab και παίρνουμε τα παρακάτω γραφήματα.



Εικόνα 47 Energy Efficiency περίπτωση 2



Εικόνα 48 Transmit Power περίπτωση 2

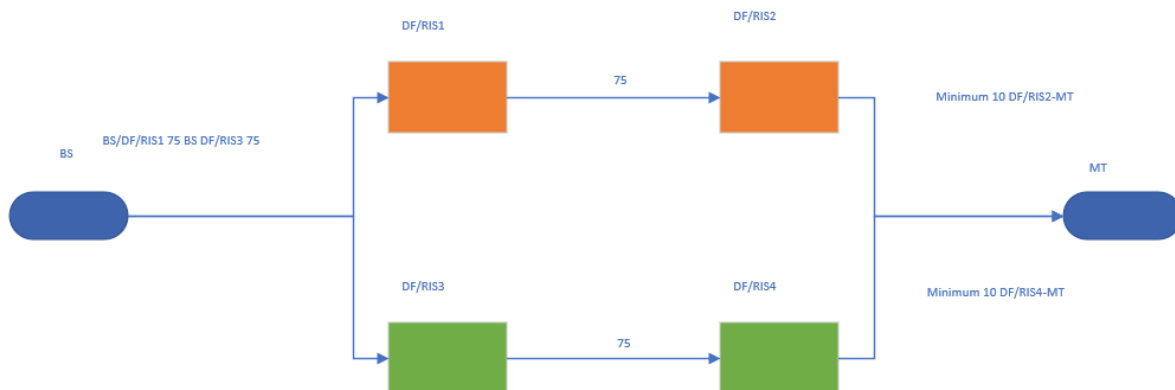
4.7.4 Συγκριση περιπτώσεων τριών RIS/Relays παράλληλα vs δύο RIS/Relays παράλληλα

Η αύξηση κατά ένα ris/relay, και στην περίπτωση που τα RIS είναι παράλληλα, φαίνεται να έχει θετική επίδραση σύμφωνα με τα νούμερα που παρατηρούμε στα γραφήματα των εν λόγω περιπτώσεων. Στην περίπτωση που έχουμε 3 RIS παράλληλα η μέγιστη ενεργειακή απόδοση που σημειώνεται είναι στον αριθμό 131 mbit/joule και η μέγιστη απαίτηση για transmit power φθάνει στον αριθμό 181 mw. Στην περίπτωση με τα 2 RIS παράλληλα έχουμε μέγιστη ενεργειακή απόδοση 112 mbit/joule και μέγιστη κατανάλωση ενέργειας μετάδοσης 232 mw. Με απλά λόγια το σύστημα με τα 3 RIS παράλληλα έχει μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση και μικρότερη απαίτηση για transmit power από το σύστημα με τα 2 RIS παράλληλα.

4.7.5 Σύγκριση περιπτώσεων τριών RIS/Relays παράλληλα vs τριών RIS/Relays σε σειρά

Όπως είχαμε παρατηρήσει και στις συγκρίσεις συστημάτων 2 ris/relay σε σειρά vs παράλληλα έτσι και σ' αυτή την σύγκριση που τα ris/relay έχουν αυξηθεί σε 3 στην κάθε μια υλοποίηση, το μοντέλο που υπερτερεί και είναι το πιο ισχυρό βάσει των νούμερων, που εξάγονται από τις γραφικές παραστάσεις, είναι αυτό που έχει τα ris/relay σε σειρά. Η μέγιστη ενεργειακή απόδοση του σχηματισμού με τα 3 ris/relay σε σειρά είναι 167 mbit/joule και το μέγιστο transmit power που απαιτεί είναι 114 mw. Η μέγιστη ενεργειακή απόδοση του μοντέλου με τα 3 RIS παράλληλα είναι 131 mbit/joule και το μέγιστο transmit power που απαιτεί είναι 181 mw. Οπότε με διαφορά το πιο αποδοτικό από τα δύο σχήματα βάσει των μετρήσεων αναδεικνύεται το σχήμα με τα 3 ris/relay σε σειρά.

4.8 Περίπτωση με 4 RIS/Relays σε τετραγωνικό σχηματισμό



Εικόνα 49 Περίπτωση με 4 Ris Relays σε τετραγωνικό σχηματισμό σε συνολική απόσταση 150 m ανα δυάδες

Στην συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε 2 RIS/Relays σε σειρά, άλλα 2 RIS/Relays σε σειρά και οι δύο δυάδες μεταξύ τους παράλληλα. Οπότε διαμορφώνουμε τον κώδικα ως εξής.

Καθορίζουμε τις αποστάσεις στη ρύθμιση προσομοίωσης.

RIS elements 10

d_SR = 75 m; απόσταση μεταξύ πηγής και IRS/Relay1.

D_RR = 75 m; απόσταση μεταξύ του irs/relay1 και του irs/relay2.

$d_v = 10 \text{ m}$; ελάχιστη απόσταση μεταξύ προορισμού και IRS/relay2.

Καθορίζουμε το εύρος των τιμών d_1 στη ρύθμιση της προσομοίωσης.

$d_1 = 70 \text{ m}$;

Διαμορφώνουμε και τους τύπους υπολογισμού αναλόγως.

Υπολογίζουμε την απόσταση μεταξύ πηγής και προορισμού

$d_{SD} = \sqrt{d_1^2 + d_v^2}$;

Υπολογίζουμε την απόσταση μεταξύ irs/relay2 και προορισμού

$d_{RD} = \sqrt{(d_1 - (d_{SR} + d_{RR}))^2 + d_v^2}$;

Στη συνέχεια υπολογίζουμε το β_{SR} και το β_{RR} , τα προσθέτουμε και αποθηκεύουμε το αποτέλεσμα τους στην μεταβλητή $\beta_{SumRelays}$.

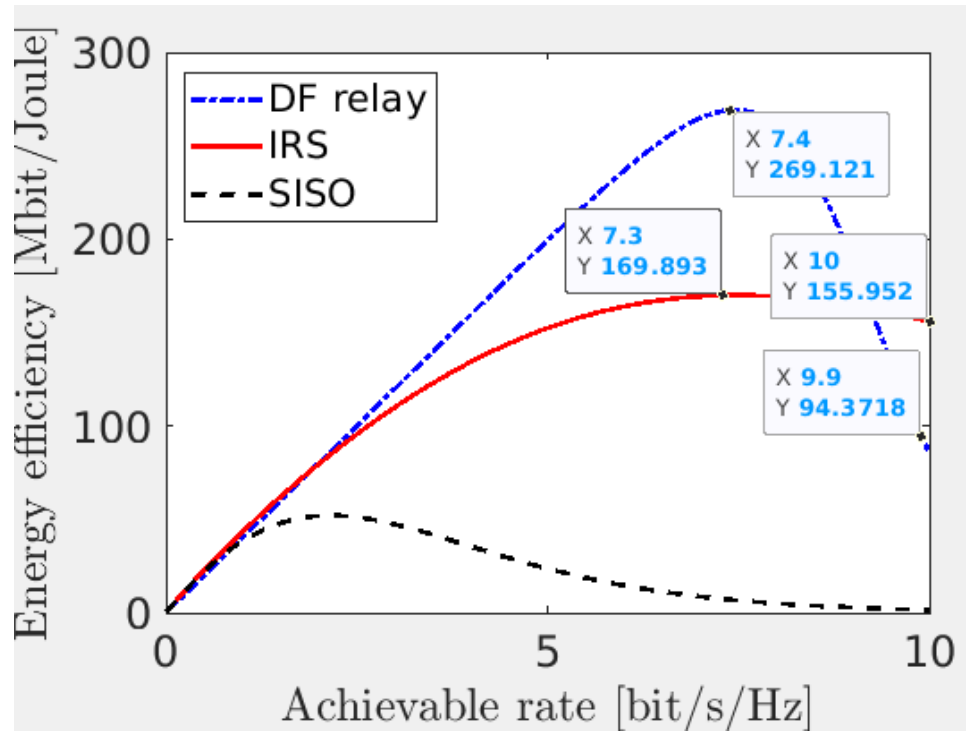
$\beta_{SumRelays} = \beta_{SR} + \beta_{RR}$;

Συνεχίζοντας προσθέτουμε την παράλληλη ενίσχυση με 2 RIS/Relays

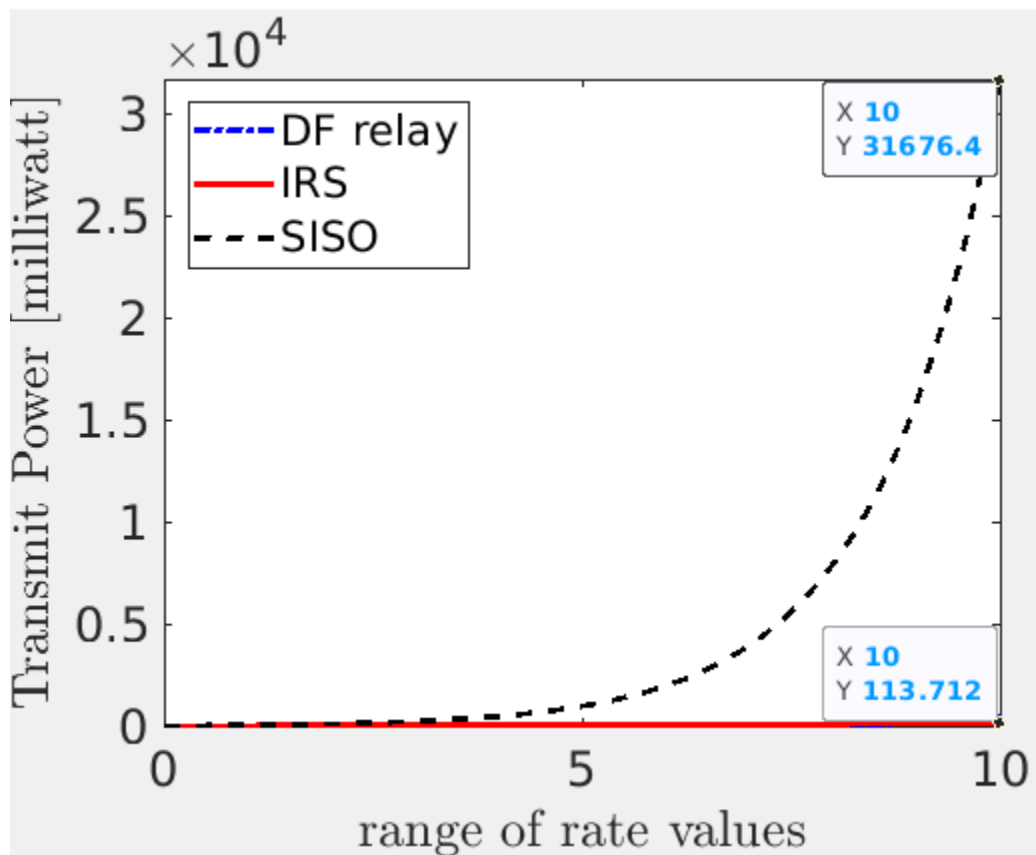
$\beta_{SumSR} = \beta_{SumRelays} + \beta_{SumRelays}$;

$\beta_{SumRD} = \beta_{RD} + \beta_{RD}$;

Τέλος στο σημείο των υπολογισμών αντικαθιστούμε β_{SR} με β_{SumSR} και β_{RD} με β_{SumRD} . Εκτελούμε τον κώδικα στο matlab και παίζουμε τα παρακάτω γραφήματα.



Εικόνα 50 Energy Efficiency περίπτωση τετραγωνικού σχηματισμού



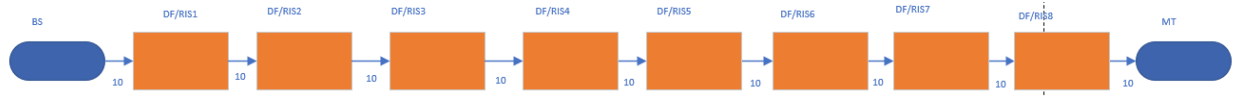
Εικόνα 51 Transmit power περίπτωση τετραγωνικού σχηματισμού

4.8.1 Σύγκριση περιπτώσεων τετραγωνικού σχηματισμού vs 3 RIS σειρά

Εξετάζοντας τα 2 διαφορετικά σχήματα παρατηρούμε ότι πηγαίνοντας από ένα σύστημα 3ών RIS σε σειρά, σε ένα τετραγωνικό σχηματισμό 4ων RIS η διαφορά σε βελτίωση που βλέπουμε είναι ελάχιστη. Το energy efficiency που επιτυγχάνει το σχήμα με 3 σε σειρά RIS είναι 167 mbit/joule και το transmit power που απαιτεί είναι 114 mw. Ο τετραγωνικός σχηματισμός επιτυγχάνει 169 mbit/joule μέγιστη ενεργειακή απόδοση και 113 mw μέγιστη απαίτηση για transmit power. Οπότε εξάγουμε το συμπέρασμα για ακόμη μια φορά ότι ο πιο αποδοτικός συνδυασμός είναι εκείνος με τα RIS σε σειρά μεταξύ πηγής και προορισμού. Καθώς στη συγκεκριμένη σύγκριση είχαμε σχεδόν ίδια αποτελέσματα με ένα σύστημα που αποτελούνταν από περισσότερα ris/relay.

4.9 Περίπτωσης με 8 RIS/Relays σε σειρά

4.9.1 Περίπτωση 1



Εικόνα 52 Περίπτωση 1 8 RIS/Relays σε σειρά σε 80 m απόσταση συνολικά από την πηγή.

Στην συγκεκριμένη έχουμε 8 irs/relays που μεσολαβούν ανάμεσα σε πηγή και προορισμό. Επίσης ο αριθμός των RIS elements της κάθε επιφάνειας RIS έχει αυξηθεί σε 15 από 10. Οπότε έχουμε τις εξής αλλαγές ώστε η συνολική απόσταση να είναι 80 m.

Καθορίζουμε τις αποστάσεις στη ρύθμιση προσομοίωσης.

RIS Elements 15

$d_{SR} = 10$ m; απόσταση μεταξύ πηγής και IRS/Relay1.

$D_{RR1} = 10$ m; απόσταση μεταξύ του irs/relay1 και του irs/relay2.

$D_{RR2} = 10$ m; απόσταση μεταξύ του irs/relay2 και του irs/relay3.

$d_{RR3} = 10$; απόσταση μεταξύ του irs/relay3 και του irs/relay4

$d_{RR4} = 10$; απόσταση μεταξύ του irs/relay4 και του irs/relay5

$d_{RR5} = 10$; απόσταση μεταξύ του irs/relay5 και του irs/relay6

$d_{RR6} = 10$; απόσταση μεταξύ του irs/relay6 και του irs/relay7

$d_{RR7} = 10$; απόσταση μεταξύ του irs/relay7 και του irs/relay8

$d_n = 10$ m; ελάχιστη απόσταση μεταξύ προορισμού και IRS/relay2.

Καθορίζουμε το εύρος των τιμών d_1 στη ρύθμιση της προσομοίωσης.

$d_1 = 70$ m;

Διαμορφώνουμε και τους τύπους υπολογισμού αναλόγως.

Υπολογίζουμε την απόσταση μεταξύ πηγής και προορισμού

$d_{SD} = \sqrt{d_1^2 + d_n^2}$;

Υπολογίζουμε την απόσταση μεταξύ irs/relay8 και προορισμού

Η αλλαγή που κάνουμε στον τύπο είναι ότι προσθέτουμε το d_{SR} και το d_{RR} (Πηγη-irs/relay1, irs/relay1-irs/relay2, irs/relay2-irs/relay3, irs/relay3-irs/relay4, irs/relay4-irs/relay5, irs/relay5-irs/relay6, irs/relay6-irs/relay7, irs/relay7-irs/relay8) καθώς τώρα μεσολαβούν 8 irs/relays στο simulation μεταξύ πηγής και προορισμού.

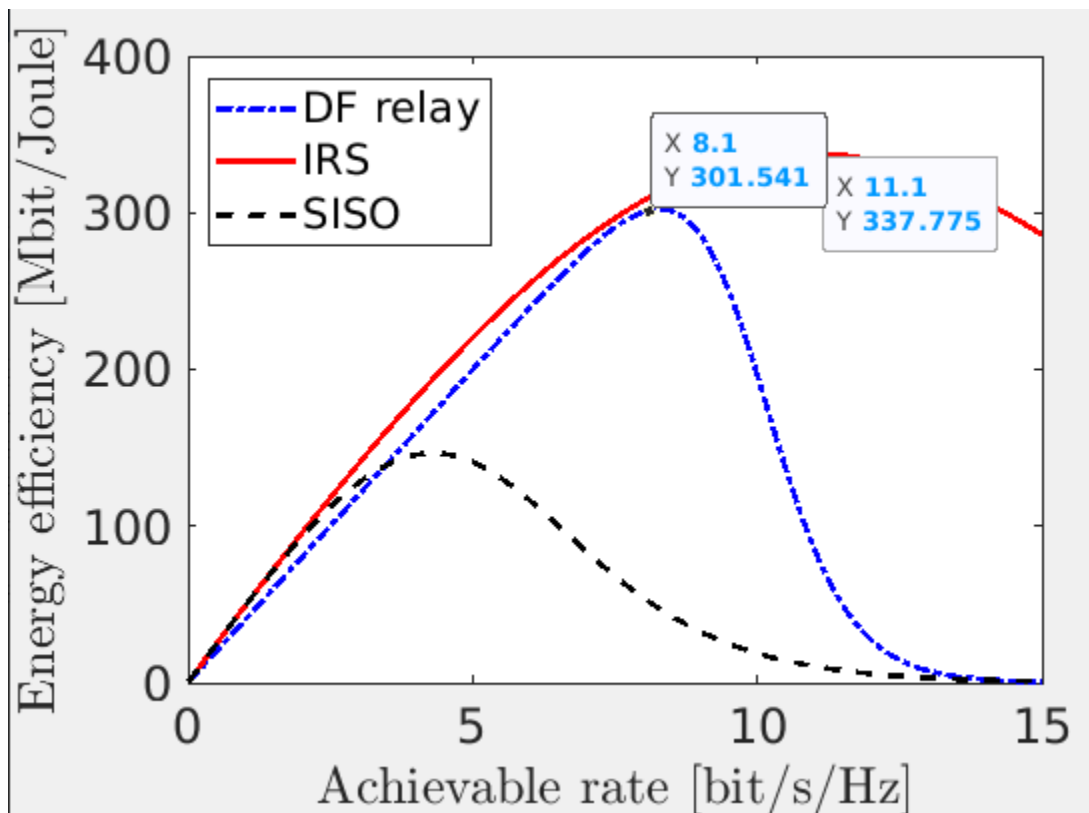
$$d_{RD} = \text{sqrt}((d_1 - (d_{SR} + d_{RR1} + d_{RR2} + d_{RR3} + d_{RR4} + d_{RR5} + d_{RR6} + d_{RR7}))^2 + d_n^2);$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε το β_{SR} , β_{RR1} και β_{RR2} , τα προσθέτουμε και αποθηκεύουμε το αποτέλεσμά τους στην μεταβλητή $\beta_{SumRelays}$.

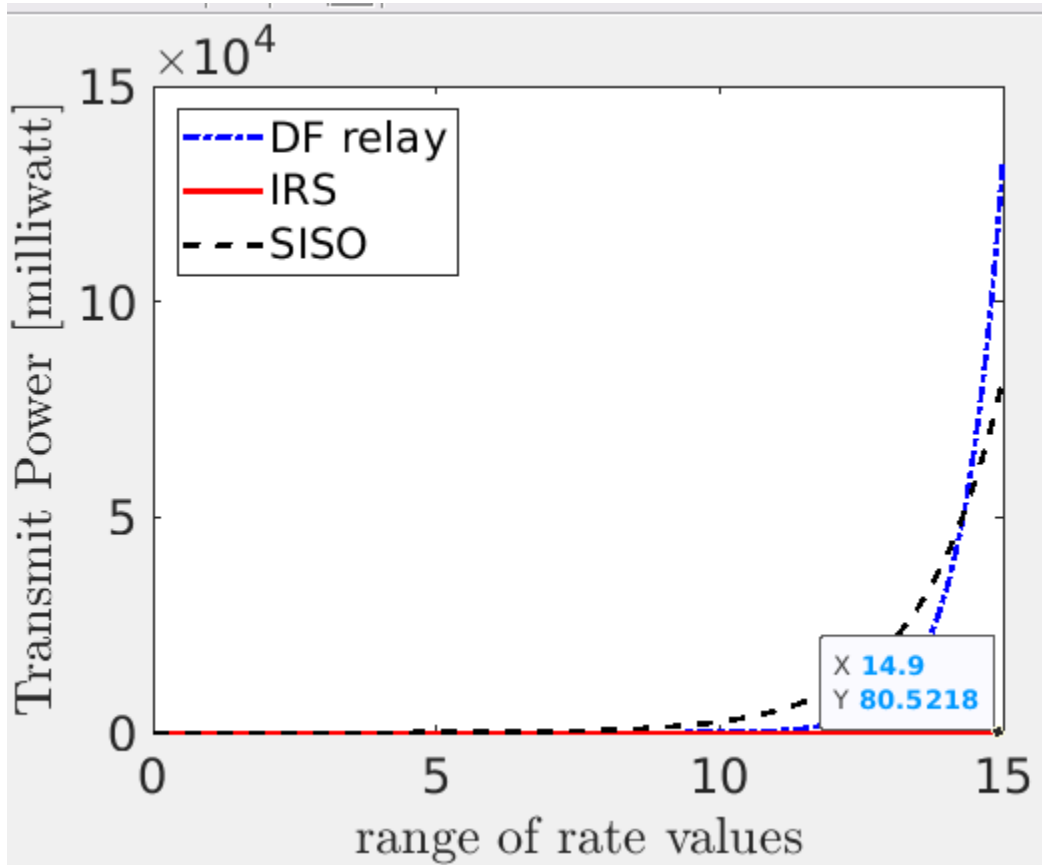
$$\beta_{SumRelays} = \beta_{SR} + \beta_{RR1} + \beta_{RR2} + \beta_{RR3} + \beta_{RR4} + \beta_{RR5} + \beta_{RR6} + \beta_{RR7};$$

Στο τέλος του κώδικα όπου γίνονται οι υπολογισμοί της ενεργειακής αποδοτικότητας του transmit power κάνουμε αντικατάσταση της μεταβλητής β_{SR} με τη μεταβλητή $\beta_{SumRelays}$.

Εκτελούμε τον κώδικα και παίρνουμε τις εξής δύο γραφικές παραστάσεις.



Εικόνα 53 Energy Efficiency Περίπτωση 1 8 RIS/Relays σε σειρά



Εικόνα 54 Transmit Power Περίπτωση 1 8 RIS/Relays σε σειρά

4.9.2 Σύγκριση DF Relay-RIS Περίπτωσης 1

Παρατηρούμε στη συγκεκριμένη περίπτωση που τα ris/relays έχουν αυξηθεί σε 8, η απόσταση μεταξύ πηγής και τελικού ris/relay είναι 80 m και το N είναι 15 το RIS αποδίδει καλύτερα και ποιοτικά και ποσοτικά. Δηλαδή και αποδίδει τη μέγιστη ενεργειακή απόδοση και και σε βάθος χρόνου τη διατηρεί σε ύψηλά επίπεδα. Το RIS έχει μέγιστη ενεργειακή απόδοση 337 mbit/joule ενώ το DF 301 mbit/joule το οποίο στη συνέχεια μειώνεται κατακόρυφα και απαιτεί πολλή ενέργεια για να λειτουργήσει. Η μέγιστη ενέργεια μετάδοσης του RIS είναι 80 mw.

4.9.3 Σύγκριση 8 RIS σε σειρά (απόσταση 80 m) – 1 RIS σε σειρά (απόσταση 80 m)

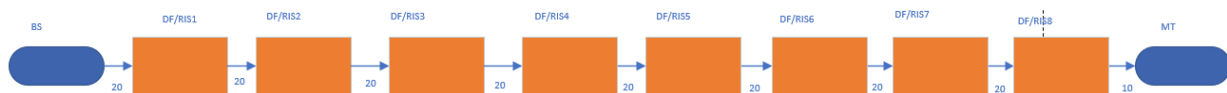
Στη μια περίπτωση έχουμε ένα σύστημα με 8 RIS σε σειρά και N 15 και στην άλλη περίπτωση έχουμε ένα σύστημα με 1 RIS σε σειρά και N 10. Το κοινό είναι η απόσταση 80 οπότε θα δούμε τις διαφορές και πιο αποδίδει καλύτερα. Το σύστημα με τα 8 RIS έχει μέγιστη ενεργειακή απόδοση 337 bit/joule ενώ το σύστημα με το ένα RIS έχει απόδοση 146 bit/ per

joule. Επίσης παρατηρούμε ότι το σύστημα με τα 8 RIS έχει πολύ μικρότερη απαίτηση για transmit power. Οπότε διαπιστώνουμε ότι το σύστημα με τα 8 RIS είναι πολύ πιο αποδοτικό και οικονομικό σε ενέργεια.

4.9.4 Σύγκριση 8 RIS σε σειρά (απόσταση 80 m) – 2 RIS σε σειρά (απόσταση 80 m)

Στη συγκεκριμένη σύγκριση αν προσέξουμε τα γραφήματα παρατηρούμε ότι το σύστημα με τα 8 RIS σε σειρά αποδίδει 337 mbit/joule ενεργειακή απόδοση ενώ το σύστημα με τα 2 RIS σε σειρά αποδίδει 180 mbit/joule ενεργειακή απόδοση. Επίσης το μέγιστο transmit power του συστήματος με τα 8 RIS είναι 80 mw ενώ αυτό με τα 2 RIS έχει 111 mw. Οπότε συμπεραίνουμε ότι το πιο ενισχυμένο σύστημα από επιφάνειες RIS αποδίδει καλύτερα.

4.9.5 Περίπτωση 2



Εικόνα 55 Περίπτωση 2 8 RIS/Relays σε σειρά 160 m συνολική απόσταση από την πηγή.

Στην συγκεκριμένη έχουμε 8 irs/relays που μεσολαβούν ανάμεσα σε πηγή και προορισμό. Επίσης ο αριθμός των RIS elements της κάθε επιφάνειας RIS είναι 15. Οπότε έχουμε τις εξής αλλαγές ώστε η συνολική απόσταση να είναι 160.

Καθορίζουμε τις αποστάσεις στη ρύθμιση προσομοίωσης.

RIS Elements 15

$d_{SR} = 20$ m; απόσταση μεταξύ πηγής και IRS/Relay1.

$D_{RR1} = 20$ m; απόσταση μεταξύ του irs/relay1 και του irs/relay2.

$D_{RR2} = 20$ m; απόσταση μεταξύ του irs/relay2 και του irs/relay3.

$d_{RR3} = 20$; απόσταση μεταξύ του irs/relay3 και του irs/relay4

$d_{RR4} = 20$; απόσταση μεταξύ του irs/relay4 και του irs/relay5

$d_{RR5} = 20$; απόσταση μεταξύ του irs/relay5 και του irs/relay6

$d_{RR6} = 20$; απόσταση μεταξύ του irs/relay6 και του irs/relay7

$d_{RR7} = 20$; απόσταση μεταξύ του irs/relay7 και του irs/relay8

$dn = 10$ m; ελάχιστη απόσταση μεταξύ προορισμού και IRS/relay2.

Καθορίζουμε το εύρος των τιμών $d1$ στη ρύθμιση της προσομοίωσης.

$d1 = 150 \text{ m};$

Διαμορφώνουμε και τους τύπους υπολογισμού αναλόγως.

Υπολογίζουμε την απόσταση μεταξύ πηγής και προορισμού

$d_{SD} = \text{sqrt}(d1^2 + dv^2);$

Υπολογίζουμε την απόσταση μεταξύ irs/relay8 και προορισμού

Η αλλαγή που κάνουμε στον τύπο είναι ότι προσθέτουμε το d_{SR} και το d_{RR} (Πηγή- irs/relay1 , $\text{irs/relay1-irs/relay2}$, $\text{irs/relay2-irs/relay3}$, $\text{irs/relay3-irs/relay4}$, $\text{irs/relay4-irs/relay5}$, $\text{irs/relay5-irs/relay6}$, $\text{irs/relay6-irs/relay7}$, $\text{irs/relay7-irs/relay8}$) καθώς τώρα μεσολαβούν 8 irs/relays στο simulation μεταξύ πηγής και προορισμού.

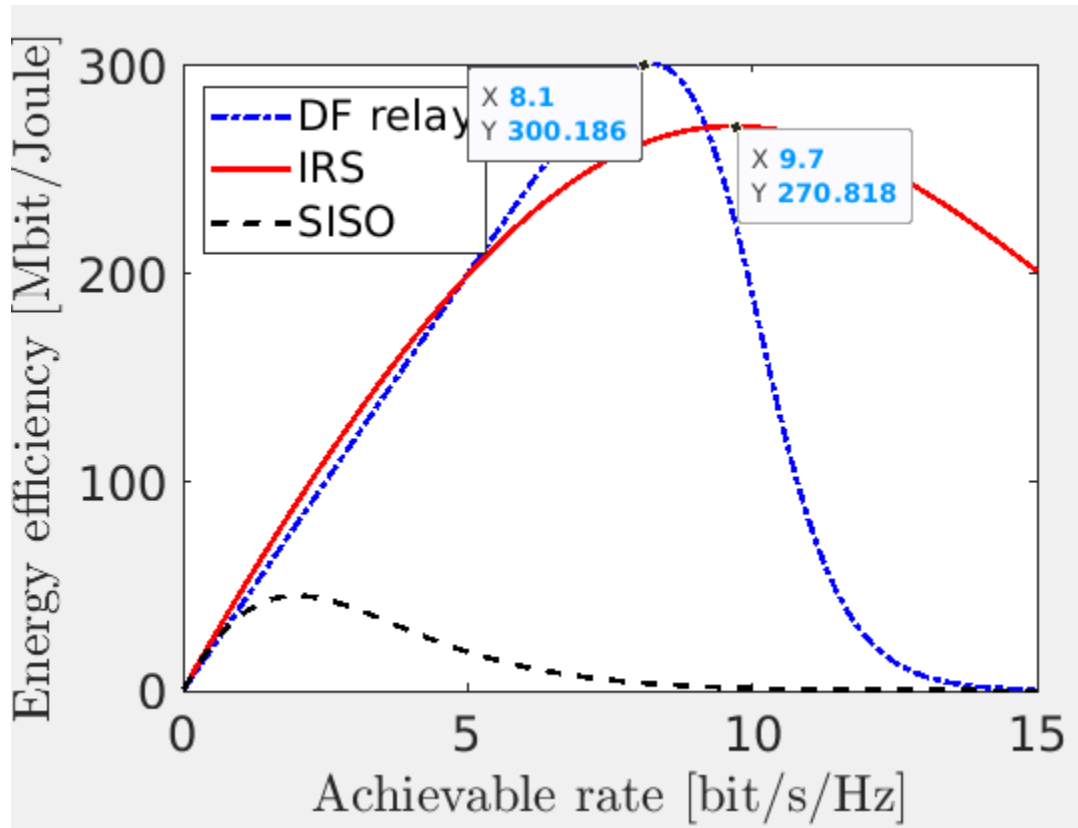
$d_{RD} = \text{sqrt}((d1 - (d_{SR} + d_{RR1} + d_{RR2} + d_{RR3} + d_{RR4} + d_{RR5} + d_{RR6} + d_{RR7}))^2 + dv^2);$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε το betaSR , betaRR1 και betaRR2 , τα προσθέτουμε και αποθηκεύουμε το αποτέλσμά τους στην μεταβλητή betaSumRelays .

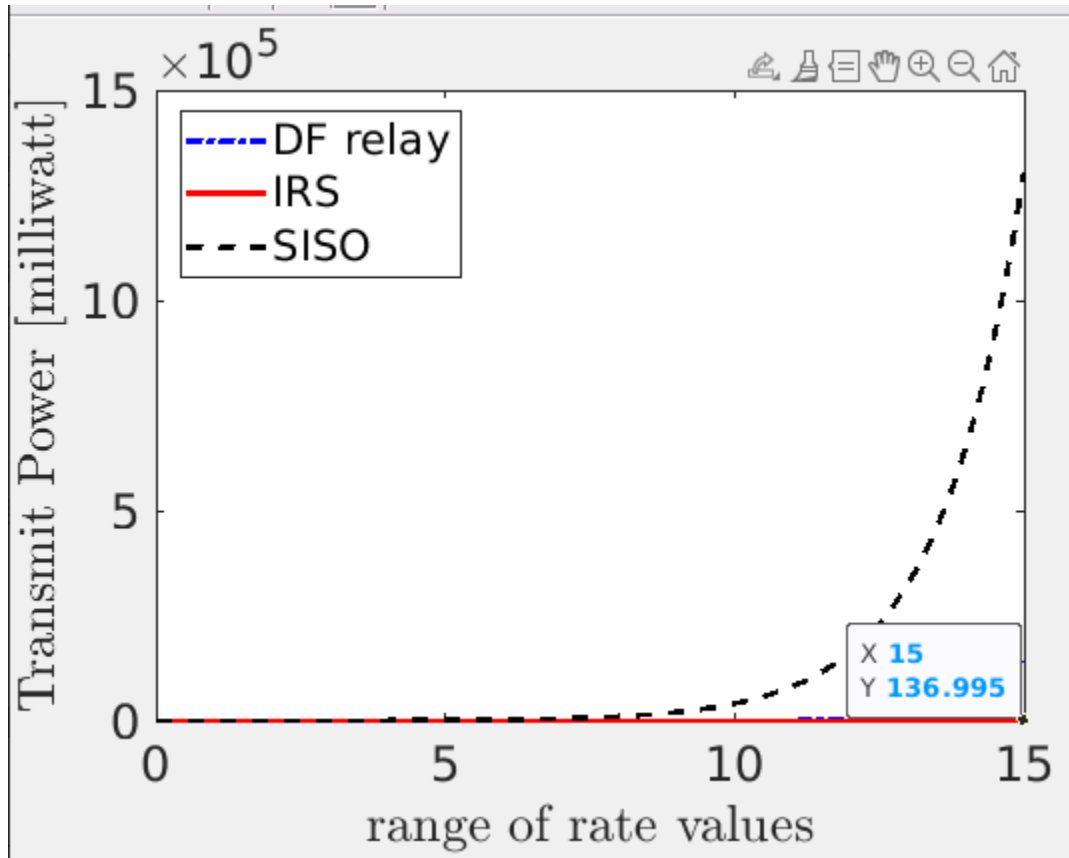
$\text{betaSumRelays} = \text{betaSR} + \text{betaRR1} + \text{betaRR2} + \text{betaRR3} + \text{betaRR4} + \text{betaRR5} + \text{betaRR6} + \text{betaRR7};$

Στο τέλος του κώδικα όπου γίνονται οι υπολογισμοί της ενεργειακής αποδοτικότητας του transmit power κάνουμε αντικατάσταση της μεταβλητής betaSR με τη μεταβλητή betaSumRelays .

Εκτελούμε τον κώδικα και παίρνουμε τις εξής δύο γραφικές παραστάσεις.



Εικόνα 56 Energy Efficiency Περίπτωση 2 8 RIS/Relays σε σειρά



Εικόνα 57 Transmit Power Περίπτωση 2 8 RIS/Relays σε σειρά

4.9.6 Σύγκριση DF Relay-RIS Περίπτωσης 2

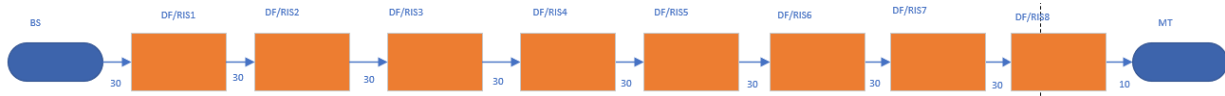
Παρατηρούμε στη συγκεκριμένη περίπτωση που τα ris/relays έχουν αυξηθεί σε 8, η απόσταση μεταξύ πηγής και τελικού ris/relay είναι 160 και το N είναι 15 το RIS έχει πολύ υψηλή απόδοση και σταθερή. Το DF έχει λίγο πιο υψηλή αλλά μειώνεται κατακόρυφα. Η μέγιστη ενεργειακή απόδοση του RIS συστήματος είναι 270 mbit/joule ενώ η μέγιστη ενεργειακή απόδοση του DF συστήματος είναι 300. Στην τελευταία επανάληψη του αλγορίθμου η ενέργεια μετάδοσης που απαιτεί το RIS είναι πολύ χαμηλότερη και βρίσκεται στα επίπεδα του 136 mw.

4.9.7 Σύγκριση 8 RIS σε σειρά (απόσταση 160 m) – 8 RIS σε σειρά (απόσταση 80 m)

Τα 2 συστήματα είναι ίδια απλά έχει διπλασιαστεί η απόσταση που απέχουν τα RIS μεταξύ τους. Εξετάζοντας τα νούμερα της ενεργειακής απόδοσης των 2 συστημάτων παρατηρούμε τα εξής. Το σύστημα στα 80 m αποδίδει 337 mbit/joule μέγιστη ενεργειακή απόδοση ενώ αυτό που έχει διπλάσια απόσταση αποδίδει λίγο χειρότερα. Δηλαδή 270

mbit/joule. Επίσης το σύστημα στην απόσταση 80 m απαιτεί μέγιστη transmit power 80 mw, ενώ το σύστημα στην απόσταση 160 απαιτεί ενέργεια 136 mw. Οπότε συμπεραίνουμε ότι η απόσταση μείωσε την απόδοση του συστήματος.

4.9.8 Περίπτωση 3



Εικόνα 58 Περίπτωση 3 8 RIS/Relays σε σειρά 240 m συνολικά από την πηγή

Στην συγκεκριμένη έχουμε 8 irs/relays που μεσολαβούν ανάμεσα σε πηγή και προορισμό. Επίσης ο αριθμός των RIS elements της κάθε επιφάνειας RIS είναι 15. Οπότε έχουμε τις εξής αλλαγές ώστε η συνολική απόσταση να είναι 240.

Καθορίζουμε τις αποστάσεις στη ρύθμιση προσομοίωσης.

RIS Elements 15

$d_{SR} = 30$ m; απόσταση μεταξύ πηγής και IRS/Relay1.

$D_{RR1} = 30$ m; απόσταση μεταξύ του irs/relay1 και του irs/relay2.

$D_{RR2} = 30$ m; απόσταση μεταξύ του irs/relay2 και του irs/relay3.

$d_{RR3} = 30$ m; απόσταση μεταξύ του irs/relay3 και του irs/relay4

$d_{RR4} = 30$ m; απόσταση μεταξύ του irs/relay4 και του irs/relay5

$d_{RR5} = 30$ m; απόσταση μεταξύ του irs/relay5 και του irs/relay6

$d_{RR6} = 30$ m; απόσταση μεταξύ του irs/relay6 και του irs/relay7

$d_{RR7} = 30$ m; απόσταση μεταξύ του irs/relay7 και του irs/relay8

$d_n = 10$ m; ελάχιστη απόσταση μεταξύ προορισμού και IRS/relay2.

Καθορίζουμε το εύρος των τιμών d_1 στη ρύθμιση της προσομοίωσης.

$d_1 = 230$ m;

Διαμορφώνουμε και τους τύπους υπολογισμού αναλόγως.

Υπολογίζουμε την απόσταση μεταξύ πηγής και προορισμού

$d_{SD} = \sqrt{d_1^2 + d_n^2}$;

Υπολογίζουμε την απόσταση μεταξύ irs/relay8 και προορισμού

Η αλλαγή που κάνουμε στον τύπο είναι ότι προσθέτουμε το d_{SR} και το d_{RR} (Πηγή-irs/relay1,irs/relay1-irs/relay2,irs/relay2-irs/relay3, irs/relay3-irs/relay4, irs/relay4-irs/relay5, irs/relay5-irs/relay6, irs/relay6-irs/relay7, irs/relay7-irs/relay8) καθώς τώρα μεσολαβούν 8 irs/relays στο simulation μεταξύ πηγής και προορισμού.

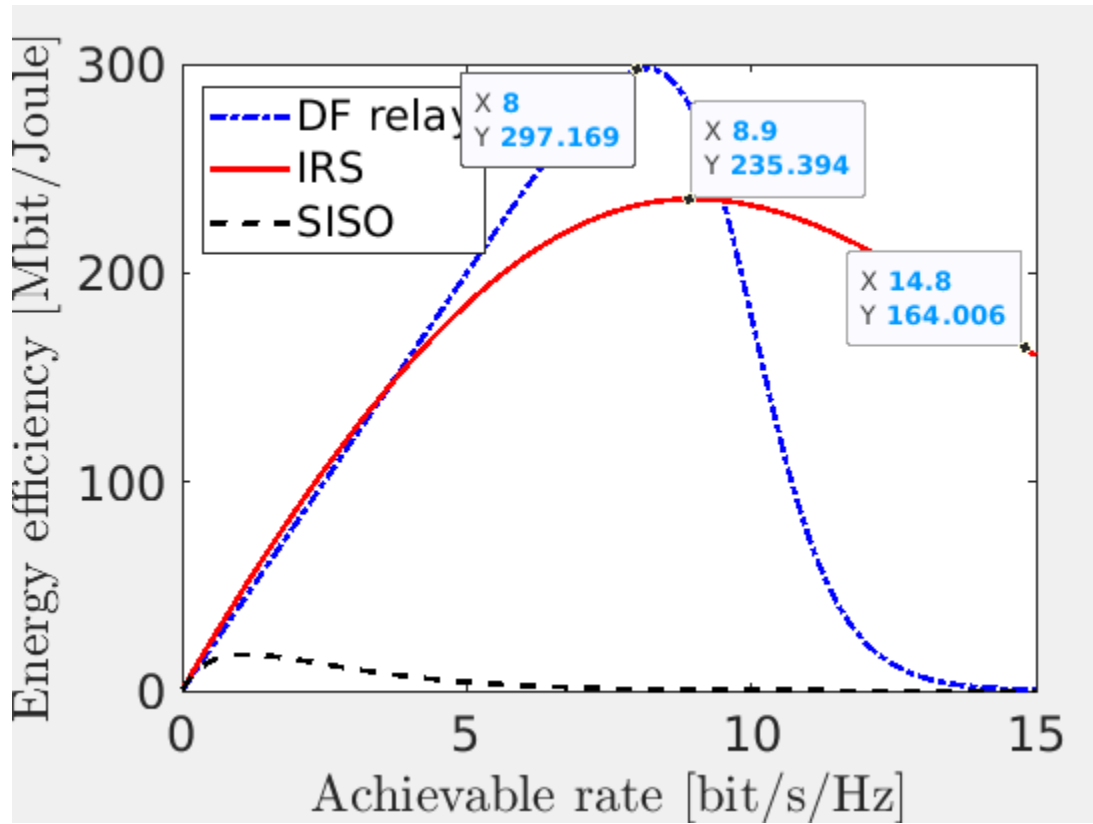
$d_{RD} = \text{sqrt}((d_1 - (d_{SR} + d_{RR1} + d_{RR2} + d_{RR3} + d_{RR4} + d_{RR5} + d_{RR6} + d_{RR7}))^2 + d_v^2);$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε το β_{SR} , β_{RR1} και β_{RR2} , τα προσθέτουμε και αποθηκεύουμε το αποτέλσμά τους στην μεταβλητή $\beta_{SumRelays}$.

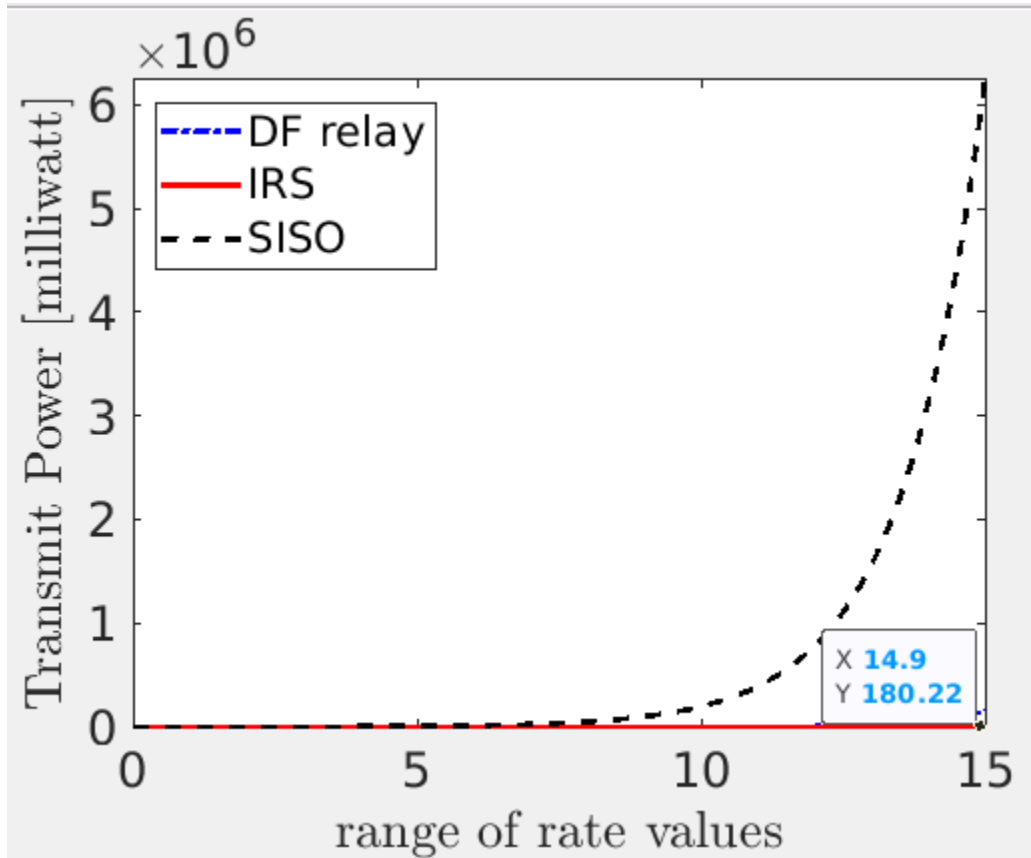
$\beta_{SumRelays} = \beta_{SR} + \beta_{RR1} + \beta_{RR2} + \beta_{RR3} + \beta_{RR4} + \beta_{RR5} + \beta_{RR6} + \beta_{RR7};$

Στο τέλος του κώδικα όπου γίνονται οι υπολογισμοί της ενεργειακής αποδοτικότητας του transmit power κάνουμε αντικατάσταση της μεταβλητής β_{SR} με τη μεταβλητή $\beta_{SumRelays}$.

Εκτελούμε τον κώδικα και παίρνουμε τις εξής δύο γραφικές παραστάσεις.



Εικόνα 59 Energy Efficiency Περίπτωση 3 8 RIS/Relays σε σειρά



Εικόνα 60 Transmit Power Περίπτωση 3 8 RIS/Relays σε σειρά

4.9.9 Σύγκριση DF Relay-RIS Περίπτωσης 3

Παρατηρούμε στη συγκεκριμένη περίπτωση που τα ris/relays έχουν αυξηθεί σε 8, η απόσταση μεταξύ πηγής και τελικού ris/relay είναι 240 και το N είναι 15 το RIS το έχει υψηλή απόδοση και σταθερή. Το DF έχει λίγο πιο υψηλή αλλά μειώνεται κατακόρυφα. Η μέγιστη ενεργειακή απόδοση του RIS συστήματος είναι 235 mbit/joule ενώ η μέγιστη ενεργειακή απόδοση του DF συστήματος είναι 297. Στην τελευταία επανάληψη του αλγορίθμου η ενέργεια μετάδοσης που απαιτεί το RIS είναι πολύ χαμηλότερη και βρίσκεται στα επίπεδα του 180 mw.

4.9.10 Σύγκριση 8 RIS σε σειρά (απόσταση 240 m) – 8 RIS σε σειρά (απόσταση 160 m)

Τα 2 συστήματα είναι ίδια απλά έχει αυξηθεί η απόσταση που απέχουν τα RIS μεταξύ τους. Εξετάζοντας τα νούμερα της ενεργειακής απόδοσης των 2 συστημάτων παρατηρούμε τα εξής. Το σύστημα στα 160 m αποδίδει 270 mbit/joule μέγιστη ενεργειακή απόδοση ενώ

αυτό που βρίσκεται σε απόσταση 240 αποδίδει λίγο χειρότερα. Δηλαδή 235 mbit/joule. Επίσης το σύστημα στην απόσταση 160 m απαιτεί μέγιστη transmit power 136 mw, ενώ το σύστημα στην απόσταση 240 απαιτεί ενέργεια 180 mw. Οπότε συμπεραίνουμε ότι η απόσταση μείωσε την απόδοση του συστήματος και αύξησε την απίτηση για ενέργεια.

5 Συμπεράσματα - Επίλογος - Μελλοντικές προεκτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Τα κυριότερα συμπεράσματα μέσα από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου συγκεντρωτικά είναι τα παρακάτω. Το πρώτο και κυριότερο συμπέρασμα είναι ότι η απόσταση, που μεσολαβεί μεταξύ πηγής και RIS είναι καταλυτικής σημασίας καθώς, όσο αυτή αυξάνεται αντίστοιχα και η απόδοση του συστήματος μειώνεται. Η απόσταση με την απόδοση είναι αντιστρόφως ανάλογα νούμερα. Όσο αυξάνουμε την απόσταση τόσο μειώνουμε την απόδοση του συστήματος και είμαστε υποχρεωμένοι να το ενισχύσουμε σε περίπτωση που θέλουμε η απόδοσή του να διατηρηθεί σε υψηλά επίπεδα. Το γεγονός αυτό το συναντάμε σε όλους τους σχηματισμούς που εξετάσαμε. Δηλαδή στο σύστημα που μεσολαβεί ένα RIS, στο σύστημα που μεσολαβούν 2 RIS σε σειρά, στο σύστημα που μεσολαβούν 2 RIS παράλληλα, στο σύστημα που μεσολαβούν 3 RIS παράλληλα, στο σύστημα που μεσολαβούν 3 RIS σε σειρά, στον τετραγωνικό σχηματισμό και στα 8 RIS σε σειρά. Και στα 7 συστήματα, σύμφωνα με τις αξιολογήσεις που πραγματοποιήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, διαπιστώσαμε ότι ο κανόνας της αύξησης της απόστασης, ο οποίος έχει ως συνέπεια να μειώνεται η απόδοση του συστήματος, δεν έχει εξαίρεση.

Το δεύτερο και εξίσου σημαντικό συμπέρασμα που πρέπει απαραίτητα να αναφερθεί μέσα από αυτήν την ανακεφαλαίωση είναι το εξής. Το RIS σύστημα που αποδίδει καλύτερα από τους 6 διαφορετικούς σχηματισμούς είναι το σύστημα όπου ανάμεσα σε πηγή και προορισμό μεσολαβούν 8 RIS ris/relay σε σειρά. Σε όλα τα γραφήματα που εξετάσαμε, συγκρίνοντάς το με τα υπόλοιπα συστήματα, απέδιδε καλύτερα και είχε τη μικρότερη κατανάλωση transmit power. Το χειρότερο σε απόδοση και απαίτηση transmit power σύστημα από τα 6 ήταν φυσικά το πιο απλό σύστημα με ένα RIS ris/relay να μεσολαβεί μεταξύ πηγής και προορισμού, ενώ αυτό που απέδιδε ικανοποιητικά αλλά λίγο χειρότερα από το σύστημα με 8 RIS ris/relay σε σειρά ήταν εκείνο το σύστημα που μεταξύ πηγής και προορισμού μεσολαβούσαν 3 RIS ris/relay σε σειρά. Επίσης αξιοσημείωτη ήταν και η απόδοση του τετραγωνικού συστήματος αλλά το συγκεκριμένο αποτελούνταν από 4 στοιχεία. Άρα διαπιστώνουμε, μέσα από τις αξιολογήσεις του προηγούμενου κεφαλαίου, ότι τα 3 συστήματα με 8 RIS σε σειρά, με 2 ή 3 RIS ris/relay, είτε σε σειρά είτε παράλληλα ή 4 RIS σε τετραγωνικό σχηματισμό, βελτιώνουν την απόδοση του συστήματος και μειώνουν αισθητά την απαίτηση για transmit power εν συγκρίσει με την περίπτωση που το σύστημα ενισχύεται από ένα και μόνο RIS ris/relay. Ειδικά όσο μεγαλώνει η απόσταση το σύστημα θα ήταν καλό να το ενισχύαμε με περισσότερα του ενός ris/relay γιατί όπως συμπεραίνουμε θα οδηγηθούμε σε πολύ θετικά αποτελέσματα.

Επίσης ένα σημαντικό συμπέρασμα που εξήχθη, μέσα από τις αξιολογήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι ότι στη σύγκριση του Decode and Forward με το RIS το DF πετύχαινε υψηλότερες ενεργειακές αποδόσεις (Εκτός από την περίπτωση 8 RIS σε σειρά σε απόσταση 80) αλλά δεν τις διατηρούσε και απαιτούσε πολύ μεγαλύτερη ενέργεια μετάδοσης όταν ο αλγόριθμος έφθανε σε μεγαλύτερη κλίμακα. Το RIS αποδείχθηκε πολύ πιο σταθερό και αποδοτικό σε βάθος χρόνου με μικρή φθορά στην ενεργειακή απόδοση όσο οι επαναλήψεις του αλγορίθμου αυξάνονταν.

Θα μπορούσαμε να εκφράσουμε με ασφάλεια την άποψη ότι το RIS, είτε συγκριτικά με το SISO είτε συγκριτικά με το DF, αποδείχθηκε το πιο αποτελεσματικό στην εξοικονόμηση ενέργειας όσο η απόσταση μεταξύ πηγής και προορισμού μεγάλωνε.

5.2 Επίλογος

Κάνοντας μια ανασκόπηση της εργασίας θα αναφερθούμε στα σημαντικότερα στοιχεία που την χαρακτήρισαν. Τα 3 πρώτα κεφάλαια ήταν βιβλιογραφική έρευνα που επικεντρώθηκε σε θέματα που θα εμφανιστούν καθώς θα προσπερνάμε την 5η γενιά κινητής τεχνολογίας όπως και όταν θα φτάσουμε στην 6η γενιά. Επίσης ένα από τα 3 βιβλιογραφικά κεφάλαια αναφέρθηκε στην περιγραφή των reconfigurable intelligent surfaces και ένα ακόμη κεφάλαιο αφιερώθηκε στις προκλήσεις που βρισκονται ενόψει της ανάπτυξης της συγκεκριμένης τεχνολογίας RIS. Στο 4ο κεφάλαιο έγινε η περιγραφή και υλοποίηση του project καθώς πραγματοποιήθηκε και η παρουσίαση διαφόρων use cases από τα μοντέλα και τα σενάρια που εφαρμόστηκαν. Στο 4ο κεφάλαιο επίσης έγινε η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των διαφόρων σεναρίων που εφαρμόστηκαν καθώς και διάφορες συγκρίσεις ανάμεσα στα αποτελέσματα διαφορετικών σεναρίων ώστε να εξαχθούν περαιτέρω συμπεράσματα. Στο 5ο κεφάλαιο βγήκαν κάποια συνολικά συμπεράσματα για τις αξιολογήσεις που σημειώθηκαν στο 4ο κεφάλαιο. Επίσης στο 5ο κεφάλαιο συμπεριλήφθηκε ο επίλογος και οι μελλοντικές προεκτάσεις. Στο 6ο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν κάποια δείγματα κώδικα ενώ στο 7ο και τελευταίο κεφάλαιο αναφέρθηκαν οι πηγές.

5.3 Μελλοντικές προεκτάσεις

Η συγκεκριμένη εργασία προσπάθησε να ρίξει μια ματιά προς το μέλλον της επόμενης γενιάς κινητών επικοινωνιών και συγκεκριμένα προς την τεχνολογία RIS αναδιαρθρώσιμων ευφυών επιφανειών. Εμβάθυνε σε περιπτώσεις χρήσεις που θα κυριαρχήσουν στο μέλλον με την εμφάνιση της επόμενης γενιάς κινητών επικοινωνιών. Αναφέρθηκε στις εφαρμογές που θα έχει το RIS στις κινητές επικοινωνίες, στα διάφορα πλεονεκτήματα που θα έχει σαν τεχνολογία, τις διάφορες κατηγορίες που θα έχει η τεχνολογία του RIS, στα smart radio environments που θα αποτελούνται από ris/relay. Στη συνέχεια έκανε μια σύγκριση ανάμεσα σε RIS και Relays ενώ αναφέρθηκαν και οι προκλήσεις που το RIS έχει να αντιμετωπίσει. Μερικές από αυτές χαρακτηριστικά είναι

channel modelling and channel acquisition, σχεδιασμός υπό αβεβαιότητα CSI, RIS design κ.α. Μέσα από το Project που υλοποιήθηκε και παρουσιάστηκε εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα για το πως συμπεριφέρθηκε το RIS, σε συγκεκριμένες παραμέτρους που εισήχθησαν στον αλγόριθμο, συγκριτικά με το DF relay και με το SISO.

6 Παράρτημα

6.1 Κώδικας Περιπτώσεων 1,2,3

```
close all;

clear;

Set simulation parameters

Carrier frequency (in GHz)

fc = 3;

Bandwidth

B = 10e6;

Noise figure (in dB)

noiseFiguredB = 10;

Compute the noise power in dBm

sigma2dBm = -174 + 10*log10(B) + noiseFiguredB;

sigma2 = db2pow(sigma2dBm);

Define the channel gain functions based on the 3GPP Urban Micro in
"Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9)."
3GPP TS 36.814, Mar. 2010. Note that x is measured in m and that the
antenna gains are included later in the code

pathloss_3GPP_LOS = @(x) db2pow(-28-20*log10(fc)-22*log10(x));
pathloss_3GPP_NLOS = @(x) db2pow(-22.7-26*log10(fc)-36.7*log10(x));

Define the antenna gains at the source, relay/IRS, and destination. The
numbers are in linear scale

antennaGainS = db2pow(5);
antennaGainR = db2pow(5);
antennaGainD = db2pow(0);

Set the amplitude reflection coefficient

alpha = 1;

Set the range of rate values

Rbar = [0.01 0.1:0.1:10];

Set parameters related to circuit power consumption

Ps = 100; Power dissipation in the transceiver hardware of the source
Pd = 100; Power dissipation in the transceiver hardware of the destination
Pe = 5; Power dissipation per element in the IRS (mW)
```



```

Pr = 100; Power dissipation in the transceiver hardware of the relay
nu = 0.5; Efficiency of the power amplifier at the source
Define distances in simulation setup
d_SR = 80; Distance between the source and IRS/relay
dv = 10; Minimum distance between destination and the IRS/relay
Define the range of d1 values in the simulation setup
d1 = 70;
Compute distance between the source and destination
d_SD = sqrt(d1^2+dv^2);
Compute distance between the IRS/relay and destination
d_RD = sqrt((d1-d_SR)^2+dv^2);
Compute the channel gains using the 3GPP models and antenna gains
betaSR = pathloss_3GPP_LOS(d_SR)*antennaGainS*antennaGainR;
betaRD = pathloss_3GPP_LOS(d_RD)*antennaGainR*antennaGainD;
betaSD = pathloss_3GPP_NLOS(d_SD)*antennaGainS*antennaGainD;
Prepare to save simulation results
EE_SISO = zeros(length(Rbar),1);
EE_IRS = zeros(length(Rbar),1);
EE_DF = zeros(length(Rbar),1);
TR_SISO = zeros(length(Rbar),1);
TR_IRS = zeros(length(Rbar),1);
TR_DF = zeros(length(Rbar),1);
Nopt = zeros(length(Rbar),1);
Go through all rate values
for ind = 1:length(Rbar)
    Compute required SINR values
    SINR = 2^(Rbar(ind))-1; SISO and IRS
    SINR_DF = 2^(2*Rbar(ind))-1; DF relaying
    Compute the transmit power in the SISO case
    P_SISO = SINR*sigma2/betaSD;
    TR_SISO(ind)=P_SISO;
    Compute the energy efficiency in the SISO case
    (the factor 1000 is used to convert mW to W)
    EE_SISO(ind) = 1000*B*Rbar(ind)/(P_SISO/nu + Ps + Pd);

```

```

Compute the transmit power in the DF relaying case
P_DF = SINR_DF*sigma2*(betaSR+betaRD-betaSD)/(2*betaRD*betaSR);
TR_DF(ind)=P_DF;
Compute the energy efficiency in the DF relaying case
(the factor 1000 is used to convert mW to W)
EE_DF(ind) = 1000*B*Rbar(ind)/(P_DF/nu + Ps/2 + Pd + Pr);
Compute the power-minimizing number of reflecting elements
Nopt(ind) = (2*SINR*sigma2/(alpha^2*betaSR*betaRD*Pe))^(1/3) -
sqrt(betaSD/(betaSR*betaRD))/alpha;
if Nopt(ind)<0
    Nopt(ind) = 0;
end
Compute the transmit power in the IRS case
P_IRS = SINR*sigma2./(sqrt(betaSD) + Nopt(ind)*alpha*sqrt(betaSR*betaRD)).^2;
TR_IRS(ind)=P_IRS;
Compute the energy efficiency in the IRS case
(the factor 1000 is used to convert mW to W)
EE_IRS(ind) = 1000*B*Rbar(ind)/(P_IRS/nu + Ps + Pd + Nopt(ind)*Pe);
end
Plot simulation results
figure;
hold on; box on;
plot(Rbar,TR_DF,'b-.','LineWidth',2);
plot(Rbar,TR_IRS,'r-','LineWidth',2);
plot(Rbar,TR_SISO,'k--','LineWidth',2);
xlabel('range of rate values','Interpreter','Latex');
ylabel('Transmit Power [Watt]','Interpreter','Latex');
legend('DF relay','IRS','SISO','Location','NorthWest');
set(gca,'fontsize',18);
figure;
hold on; box on;
plot(Rbar,(EE_DF)/1e6,'b-.','LineWidth',2);
plot(Rbar,(EE_IRS)/1e6,'r-','LineWidth',2);
plot(Rbar,(EE_SISO)/1e6,'k--','LineWidth',2);

```

```

xlabel('Achievable rate [bit/s/Hz]','Interpreter','Latex');
ylabel('Energy efficiency [Mbit/Joule]','Interpreter','Latex');
legend('DF relay','IRS','SISO','Location','NorthWest');
set(gca,'fontsize',18);[6]

```

6.2 Κώδικας Περιπτώσεων 4,5,6

```

close all;

clear;

Set simulation parameters

Carrier frequency (in GHz)

fc = 3;

Bandwidth

B = 10e6;

Noise figure (in dB)

noiseFiguredB = 10;

Compute the noise power in dBm

sigma2dBm = -174 + 10*log10(B) + noiseFiguredB;

sigma2 = db2pow(sigma2dBm);

Define the channel gain functions based on the 3GPP Urban Micro in
"Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9)."
3GPP TS 36.814, Mar. 2010. Note that x is measured in m and that the
antenna gains are included later in the code

pathloss_3GPP_LOS = @(x) db2pow(-28-20*log10(fc)-22*log10(x));
pathloss_3GPP_NLOS = @(x) db2pow(-22.7-26*log10(fc)-36.7*log10(x));

Define the antenna gains at the source, relay/IRS, and destination. The
numbers are in linear scale

antennaGainS = db2pow(5);
antennaGainR = db2pow(5);
antennaGainD = db2pow(0);

Set the amplitude reflection coefficient

alpha = 1;

Set the range of rate values

Rbar = [0.01 0.1:0.1:10];

```

```

Set parameters related to circuit power consumption
Ps = 100; Power dissipation in the transceiver hardware of the source
Pd = 100; Power dissipation in the transceiver hardware of the destination
Pe = 5; Power dissipation per element in the IRS (mW)
Pr = 100; Power dissipation in the transceiver hardware of the relay
nu = 0.5; Efficiency of the power amplifier at the source
Define distances in simulation setup
d_SR = 40; Distance between the source and IRS/relay1
d_RR = 40; Distance between the IRS/RELAY1 and IRS/relay2
dv = 10; Minimum distance between destination and the IRS/relay
Define the range of d1 values in the simulation setup
d1 = 70;
Compute distance between the source and destination
d_SD = sqrt(d1^2+dv^2);
Compute distance between the IRS/relay and destination
d_RD = sqrt((d1-(d_SR+d_RR))^2+dv^2);
Compute the channel gains using the 3GPP models and antenna gains
betaSR = pathloss_3GPP_LOS(d_SR)*antennaGainS*antennaGainR;
betaRR = pathloss_3GPP_LOS(d_RR)*antennaGainR*antennaGainR;
betaRD = pathloss_3GPP_LOS(d_RD)*antennaGainR*antennaGainD;
betaSD = pathloss_3GPP_NLOS(d_SD)*antennaGainS*antennaGainD;
Compute The sum of relays/irs
betaSumRelays=betaSR+betaRR;
Prepare to save simulation results
EE_SISO = zeros(length(Rbar),1);
EE_IRS = zeros(length(Rbar),1);
EE_DF = zeros(length(Rbar),1);
TR_SISO = zeros(length(Rbar),1);
TR_IRS = zeros(length(Rbar),1);
TR_DF = zeros(length(Rbar),1);
Nopt = zeros(length(Rbar),1);
Go through all rate values
for ind = 1:length(Rbar)
    Compute required SINR values

```

```

SINR = 2^(Rbar(ind))-1; SISO and IRS
SINR_DF = 2^(2*Rbar(ind))-1; DF relaying
Compute the transmit power in the SISO case
P_SISO = SINR*sigma2/betaSD;
TR_SISO(ind)=P_SISO;
Compute the energy efficiency in the SISO case
(the factor 1000 is used to convert mW to W)
EE_SISO(ind) = 1000*B*Rbar(ind)/(P_SISO/nu + Ps + Pd);
Compute the transmit power in the DF relaying case
P_DF = SINR_DF*sigma2*(betaRD+betaSumRelays-betaSD)/(2*betaRD*betaSumRelays);
TR_DF(ind)=P_DF;
Compute the energy efficiency in the DF relaying case
(the factor 1000 is used to convert mW to W)
EE_DF(ind) = 1000*B*Rbar(ind)/(P_DF/nu + Ps/2 + Pd + Pr);
Compute the power-minimizing number of reflecting elements
Nopt(ind) = (2*SINR*sigma2/(alpha^2*betaSumRelays*betaRD*Pe))^(1/3) -
sqrt(betaSD/(betaSumRelays*betaRD))/alpha;
if Nopt(ind)<0
    Nopt(ind) = 0;
end
Compute the transmit power in the IRS case
P_IRS = SINR*sigma2./(sqrt(betaSD)
Nopt(ind)*alpha*sqrt(betaSumRelays*betaRD)).^2;
TR_IRS(ind)=P_IRS;
Compute the energy efficiency in the IRS case
(the factor 1000 is used to convert mW to W)
EE_IRS(ind) = 1000*B*Rbar(ind)/(P_IRS/nu + Ps + Pd + Nopt(ind)*Pe);
end
Plot simulation results
figure;
hold on; box on;
plot(Rbar,TR_DF,'b-.','LineWidth',2);
plot(Rbar,TR_IRS,'r-','LineWidth',2);
plot(Rbar,TR_SISO,'k--','LineWidth',2);

```

```

xlabel('range of rate values','Interpreter','Latex');
ylabel('Transmit Power [Watt]','Interpreter','Latex');
legend('DF relay','IRS','SISO','Location','NorthWest');
set(gca,'fontsize',18);
figure;
hold on; box on;
plot(Rbar,(EE_DF)/1e6,'b-.','LineWidth',2);
plot(Rbar,(EE_IRS)/1e6,'r-','LineWidth',2);
plot(Rbar,(EE_SISO)/1e6,'k--','LineWidth',2);
xlabel('Achievable rate [bit/s/Hz]','Interpreter','Latex');
ylabel('Energy efficiency [Mbit/Joule]','Interpreter','Latex');
legend('DF relay','IRS','SISO','Location','NorthWest');
set(gca,'fontsize',18);[6]

```

6.3 Κώδικας Περιπτώσεων 7,8,9

```

close all;
clear;
Set simulation parameters
Carrier frequency (in GHz)
fc = 3;
Bandwidth
B = 10e6;
Noise figure (in dB)
noiseFiguredB = 10;
Compute the noise power in dBm
sigma2dBm = -174 + 10*log10(B) + noiseFiguredB;
sigma2 = db2pow(sigma2dBm);
Define the channel gain functions based on the 3GPP Urban Micro in
"Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9)."
3GPP TS 36.814, Mar. 2010. Note that x is measured in m and that the
antenna gains are included later in the code
pathloss_3GPP_LOS = @(x) db2pow(-28-20*log10(fc)-22*log10(x));
pathloss_3GPP_NLOS = @(x) db2pow(-22.7-26*log10(fc)-36.7*log10(x));

```

```

Define the antenna gains at the source, relay/IRS, and destination. The
numbers are in linear scale
antennaGainS = db2pow(5);
antennaGainR = db2pow(5);
antennaGainD = db2pow(0);
Set the amplitude reflection coefficient
alpha = 1;
Set the range of rate values
Rbar = [0.01 0.1:0.1:10];
Set parameters related to circuit power consumption
Ps = 100; Power dissipation in the transceiver hardware of the source
Pd = 100; Power dissipation in the transceiver hardware of the destination
Pe = 5; Power dissipation per element in the IRS (mW)
Pr = 100; Power dissipation in the transceiver hardware of the relay
nu = 0.5; Efficiency of the power amplifier at the source
Define distances in simulation setup
d_SR = 80; Distance between the source and IRS/relay
dv = 10; Minimum distance between destination and the IRS/relay
Define the range of d1 values in the simulation setup
d1 = 70;
Compute distance between the source and destination
d_SD = sqrt(d1^2+dv^2);
Compute distance between the IRS/relay and destination
d_RD = sqrt((d1-d_SR)^2+dv^2);
Compute the channel gains using the 3GPP models and antenna gains
betaSR = pathloss_3GPP_LOS(d_SR)*antennaGainS*antennaGainR;
betaRD = pathloss_3GPP_LOS(d_RD)*antennaGainR*antennaGainD;
betaSD = pathloss_3GPP_NLOS(d_SD)*antennaGainS*antennaGainD;
Compute The sum of relays/irs
betaSumSR=betaSR+betaSR;
betaSumRD=betaRD+betaRD;
Prepare to save simulation results
EE_SISO = zeros(length(Rbar),1);
EE_IRS = zeros(1,length(Rbar),1);

```

```

EE_DF = zeros(length(Rbar),1);
TR_SISO = zeros(length(Rbar),1);
TR_IRS = zeros(length(Rbar),1);
TR_DF = zeros(length(Rbar),1);
Nopt = zeros(length(Rbar),1);
Go through all rate values
for ind = 1:length(Rbar)
    Compute required SINR values
    SINR = 2^(Rbar(ind))-1; SISO and IRS
    SINR_DF = 2^(2*Rbar(ind))-1; DF relaying
    Compute the transmit power in the SISO case
    P_SISO = SINR*sigma2/betaSD;
    TR_SISO(ind)=P_SISO;
    Compute the energy efficiency in the SISO case
    (the factor 1000 is used to convert mW to W)
    EE_SISO(ind) = 1000*B*Rbar(ind)/(P_SISO/nu + Ps + Pd);
    Compute the transmit power in the DF relaying case
    P_DF = SINR_DF*sigma2*(betaSumSR+betaSumRD-betaSD)/(2*betaSumRD*betaSumSR);
    TR_DF(ind)=P_DF;
    Compute the energy efficiency in the DF relaying case
    (the factor 1000 is used to convert mW to W)
    EE_DF(ind) = 1000*B*Rbar(ind)/(P_DF/nu + Ps/2 + Pd + Pr);
    Compute the power-minimizing number of reflecting elements
    Nopt(ind) = (2*SINR*sigma2/(alpha^2*betaSumSR*betaSumRD*Pe))^(1/3) -
    sqrt(betaSD/(betaSumSR*betaSumRD))/alpha;
    if Nopt(ind)<0
        Nopt(ind) = 0;
    end
    Compute the transmit power in the IRS case
    P_IRS = SINR*sigma2./(sqrt(betaSD) + Nopt(ind)*alpha*sqrt(betaSumSR*betaSumRD)).^2;
    TR_IRS(ind)=P_IRS;
    Compute the energy efficiency in the IRS case
    (the factor 1000 is used to convert mW to W)
    EE_IRS(ind) = 1000*B*Rbar(ind)/(P_IRS/nu + Ps + Pd + Nopt(ind)*Pe);

```



```

end

Plot simulation results

figure;

hold on; box on;

plot(Rbar,TR_DF,'b-.','LineWidth',2);

plot(Rbar,TR_IRS,'r-','LineWidth',2);

plot(Rbar,TR_SISO,'k--','LineWidth',2);

xlabel('range of rate values','Interpreter','Latex');

ylabel('Transmit Power [Watt]','Interpreter','Latex');

legend('DF relay','IRS','SISO','Location','NorthWest');

set(gca,'fontsize',18);

figure;

hold on; box on;

plot(Rbar,(EE_DF)/1e6,'b-.','LineWidth',2);

plot(Rbar,(EE_IRS)/1e6,'r-','LineWidth',2);

plot(Rbar,(EE_SISO)/1e6,'k--','LineWidth',2);

xlabel('Achievable rate [bit/s/Hz]','Interpreter','Latex');

ylabel('Energy efficiency [Mbit/Joule]','Interpreter','Latex');

legend('DF relay','IRS','SISO','Location','NorthWest');

set(gca,'fontsize',18);[6]

```

6.4 Κώδικας Περίπτωσης με 3 RIS/Relays σε σειρά

```

close all;

clear;

Set simulation parameters

Carrier frequency (in GHz)

fc = 3;

Bandwidth

B = 10e6;

Noise figure (in dB)

noiseFiguredB = 10;

Compute the noise power in dBm

sigma2dBm = -174 + 10*log10(B) + noiseFiguredB;

```

```

sigma2 = db2pow(sigma2dBm);

Define the channel gain functions based on the 3GPP Urban Micro in "Further advancements
for E-UTRA physical layer aspects (Release 9)." 3GPP TS 36.814, Mar. 2010. Note that x
is measured in m and that the antenna gains are included later in the code

pathloss_3GPP_LOS = @(x) db2pow(-28-20*log10(fc)-22*log10(x));
pathloss_3GPP_NLOS = @(x) db2pow(-22.7-26*log10(fc)-36.7*log10(x));

Define the antenna gains at the source, relay/IRS, and destination. The numbers are in
linear scale

antennaGainS = db2pow(5);
antennaGainR = db2pow(5);
antennaGainD = db2pow(0);

Set the amplitude reflection coefficient

alpha = 1;

Set the range of rate values

Rbar = [0.01 0.1:0.1:10];

Set parameters related to circuit power consumption

Ps = 100; Power dissipation in the transceiver hardware of the source
Pd = 100; Power dissipation in the transceiver hardware of the destination
Pe = 5; Power dissipation per element in the IRS (mW)
Pr = 100; Power dissipation in the transceiver hardware of the relay
nu = 0.5; Efficiency of the power amplifier at the source

Define distances in simulation setup

d_SR = 50; Distance between the source and IRS/relay1
d_RR1 = 50; Distance between the IRS/RELAY1 and IRS/relay2
d_RR2 = 50; Distance between the IRS/RELAY2 and IRS/relay3
dv = 10; Minimum distance between destination and the IRS/relay

Define the range of d1 values in the simulation setup

d1 = 140;

Compute distance between the source and destination

d_SD = sqrt(d1^2+dv^2);

Compute distance between the IRS/relay and destination

d_RD = sqrt((d1-(d_SR+d_RR1+d_RR2))^2+dv^2);

Compute the channel gains using the 3GPP models and antenna gains

betaSR = pathloss_3GPP_LOS(d_SR)*antennaGainS*antennaGainR;

```

```

betaRR1 = pathloss_3GPP_LOS(d_RR1)*antennaGainR*antennaGainR;
betaRR2 = pathloss_3GPP_LOS(d_RR2)*antennaGainR*antennaGainR;
betaRD = pathloss_3GPP_LOS(d_RD)*antennaGainR*antennaGainD;
betaSD = pathloss_3GPP_NLOS(d_SD)*antennaGainS*antennaGainD;
Compute The sum of relays/irs
betaSumRelays=betaSR+betaRR1+betaRR2;
Prepare to save simulation results
EE_SISO = zeros(length(Rbar),1);
EE_IRS = zeros(length(Rbar),1);
EE_DF = zeros(length(Rbar),1);
TR_SISO = zeros(length(Rbar),1);
TR_IRS = zeros(length(Rbar),1);
TR_DF = zeros(length(Rbar),1);
Nopt = zeros(length(Rbar),1);
Go through all rate values
for ind = 1:length(Rbar)
    Compute required SINR values
    SINR = 2^(Rbar(ind))-1; %SISO and IRS
    SINR_DF = 2^(2*Rbar(ind))-1; %DF relaying
    Compute the transmit power in the SISO case, using Eq. (17)
    P_SISO = SINR*sigma2/betaSD;
    TR_SISO(ind)=P_SISO;

    Compute the energy efficiency in the SISO case
    (the factor 1000 is used to convert mW to W)
    EE_SISO(ind) = 1000*B*Rbar(ind)/(P_SISO/nu + Ps + Pd);

    Compute the transmit power in the DF relaying case, using Eq. (19)
    P_DF = SINR_DF*sigma2*(betaRD+betaSumRelays-betaSD)/(2*betaRD*betaSumRelays);
    TR_DF(ind)=P_DF;

    Compute the energy efficiency in the DF relaying case
    (the factor 1000 is used to convert mW to W)
    EE_DF(ind) = 1000*B*Rbar(ind)/(P_DF/nu + Ps/2 + Pd + Pr);

```

```

Compute the power-minimizing number of reflecting elements      Nopt(ind) =
(2*SINR*sigma2/(alpha^2*betaSumRelays*betaRD*Pe))^(1/3)        -
sqrt(betaSD/(betaSumRelays*betaRD))/alpha;

    if Nopt(ind)<0
        Nopt(ind) = 0;
    end

    Compute the transmit power in the IRS case, using Eq. (18)

    P_IRS = SINR*sigma2./(sqrt(betaSD)
Nopt(ind)*alpha*sqrt(betaSumRelays*betaRD)).^2; +

    TR_IRS(ind)=P_IRS;

    Compute the energy efficiency in the IRS case
    (the factor 1000 is used to convert mW to W)

    EE_IRS(ind) = 1000*B*Rbar(ind)/(P_IRS/nu + Ps + Pd + Nopt(ind)*Pe);

end

Plot simulation results

figure;
hold on; box on;
plot(Rbar,TR_DF,'b-.','LineWidth',2);
plot(Rbar,TR_IRS,'r-','LineWidth',2);
plot(Rbar,TR_SISO,'k--','LineWidth',2);
xlabel('range of rate values','Interpreter','Latex');
ylabel('Transmit Power [Watt]','Interpreter','Latex');
legend('DF relay','IRS','SISO','Location','NorthWest');
set(gca,'fontsize',18);

figure;
hold on; box on;
plot(Rbar,(EE_DF)/1e6,'b-.','LineWidth',2);
plot(Rbar,(EE_IRS)/1e6,'r-','LineWidth',2);
plot(Rbar,(EE_SISO)/1e6,'k--','LineWidth',2);
xlabel('Achievable rate [bit/s/Hz]','Interpreter','Latex');
ylabel('Energy efficiency [Mbit/Joule]','Interpreter','Latex');
legend('DF relay','IRS','SISO','Location','NorthWest');
set(gca,'fontsize',18);[6]

```

6.5 Κώδικας Περίπτωσης με 3 RIS/Relays παράλληλα

```
close all;

clear;

Set simulation parametersCarrier frequency (in GHz)

fc = 3;

Bandwidth

B = 10e6;

Noise figure (in dB)

noiseFiguredB = 10;

Compute the noise power in dBm

sigma2dBm = -174 + 10*log10(B) + noiseFiguredB;

sigma2 = db2pow(sigma2dBm);

Define the channel gain functions based on the 3GPP Urban Micro in
"Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9)."
3GPP TS 36.814, Mar. 2010. Note that x is measured in m and that the
antenna gains are included later in the code

pathloss_3GPP_LOS = @(x) db2pow(-28-20*log10(fc)-22*log10(x));
pathloss_3GPP_NLOS = @(x) db2pow(-22.7-26*log10(fc)-36.7*log10(x));

Define the antenna gains at the source, relay/IRS, and destination. The numbers are in
linear scale

antennaGainS = db2pow(5);
antennaGainR = db2pow(5);
antennaGainD = db2pow(0);

Set the amplitude reflection coefficient

alpha = 1;

Set the range of rate values

Rbar = [0.01 0.1:0.1:10];

Set parameters related to circuit power consumption

Ps = 100; Power dissipation in the transceiver hardware of the source
Pd = 100; Power dissipation in the transceiver hardware of the destination
Pe = 5; Power dissipation per element in the IRS (mW)
Pr = 100; Power dissipation in the transceiver hardware of the relay
```

```

nu = 0.5; Efficiency of the power amplifier at the source
Define distances in simulation setup
d_SR = 150; Distance between the source and IRS/relay1
Distance between the IRS/RELAY1 and IRS/relay2
dv = 10; Minimum distance between destination and the IRS/relay
Define the range of d1 values in the simulation setup
d1 = 140;
Compute distance between the source and destination
d_SD = sqrt(d1^2+dv^2);
Compute distance between the IRS/relay and destination
d_RD = sqrt((d1-d_SR)^2+dv^2);
Compute the channel gains using the 3GPP models and antenna gains
betaSR = pathloss_3GPP_LOS(d_SR)*antennaGainS*antennaGainR;
betaRD = pathloss_3GPP_LOS(d_RD)*antennaGainR*antennaGainD;
betaSD = pathloss_3GPP_NLOS(d_SD)*antennaGainS*antennaGainD
Compute The sum of relays/irs
betaSumSR=betaSR+betaSR+betaSR;
betaSumRD=betaRD+betaRD+betaRD;
Prepare to save simulation results
EE_SISO = zeros(length(Rbar),1);
EE_IRS = zeros(length(Rbar),1);
EE_DF = zeros(length(Rbar),1);
TR_SISO = zeros(length(Rbar),1);
TR_IRS = zeros(length(Rbar),1);
TR_DF = zeros(length(Rbar),1);
Nopt = zeros(length(Rbar),1);
Go through all rate values
for ind = 1:length(Rbar)
    Compute required SINR values
    SINR = 2^(Rbar(ind))-1; %SISO and IRS
    SINR_DF = 2^(2*Rbar(ind))-1; %DF relaying
    Compute the transmit power in the SISO case, using Eq. (17)
    P_SISO = SINR*sigma2/betaSD;
    TR_SISO(ind)=P_SISO;

```

```

Compute the energy efficiency in the SISO case
(the factor 1000 is used to convert mW to W)
EE_SISO(ind) = 1000*B*Rbar(ind)/(P_SISO/nu + Ps + Pd);
Compute the transmit power in the DF relaying case, using Eq. (19)
P_DF = SINR_DF*sigma2*(betaSumSR+betaSumRD-betaSD)/(2*betaSumRD*betaSumSR);
TR_DF(ind)=P_DF;
Compute the energy efficiency in the DF relaying case
(the factor 1000 is used to convert mW to W)
EE_DF(ind) = 1000*B*Rbar(ind)/(P_DF/nu + Ps/2 + Pd + Pr);
Compute the power-minimizing number of reflecting elements
Nopt(ind) = (2*SINR*sigma2/(alpha^2*betaSumSR*betaSumRD*Pe))^(1/3) -
sqrt(betaSD/(betaSumSR*betaSumRD))/alpha;
if Nopt(ind)<0
    Nopt(ind) = 0;
end
Compute the transmit power in the IRS case, using Eq. (18)
P_IRS = SINR*sigma2./(sqrt(betaSD) + Nopt(ind)*alpha*sqrt(betaSumSR*betaSumRD)).^2;
TR_IRS(ind)=P_IRS;
Compute the energy efficiency in the IRS case
(the factor 1000 is used to convert mW to W)
EE_IRS(ind) = 1000*B*Rbar(ind)/(P_IRS/nu + Ps + Pd + Nopt(ind)*Pe);
end
Plot simulation results
figure;
hold on; box on;
plot(Rbar,TR_DF,'b-.','LineWidth',2);
plot(Rbar,TR_IRS,'r-','LineWidth',2);
plot(Rbar,TR_SISO,'k--','LineWidth',2);
xlabel('range of rate values','Interpreter','Latex');
ylabel('Transmit Power [Watt]','Interpreter','Latex');
legend('DF relay','IRS','SISO','Location','NorthWest');
set(gca,'fontsize',18);
figure;
hold on; box on;

```

```

plot(Rbar, (EE_DF)/1e6, 'b-.', 'LineWidth', 2);
plot(Rbar, (EE_IRS)/1e6, 'r-', 'LineWidth', 2);
plot(Rbar, (EE_SISO)/1e6, 'k--', 'LineWidth', 2);
xlabel('Achievable rate [bit/s/Hz]', 'Interpreter', 'Latex');
ylabel('Energy efficiency [Mbit/Joule]', 'Interpreter', 'Latex');
legend('DF relay', 'IRS', 'SISO', 'Location', 'NorthWest');
set(gca, 'fontsize', 18); [6]

```

6.6 Κώδικας περίπτωσης με 4 RIS/Relays σε τετραγωνικό σχηματισμό

```

close all;

clear;

Set simulation parameters

Carrier frequency (in GHz)

fc = 3;

Bandwidth

B = 10e6;

Noise figure (in dB)

noiseFiguredB = 10;

Compute the noise power in dBm

sigma2dBm = -174 + 10*log10(B) + noiseFiguredB;

sigma2 = db2pow(sigma2dBm);

Define the channel gain functions based on the 3GPP Urban Micro in
"Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9)."
3GPP TS 36.814, Mar. 2010. Note that x is measured in m and that the
antenna gains are included later in the code

pathloss_3GPP_LOS = @(x) db2pow(-28-20*log10(fc)-22*log10(x));
pathloss_3GPP_NLOS = @(x) db2pow(-22.7-26*log10(fc)-36.7*log10(x));

Define the antenna gains at the source, relay/IRS, and destination. The numbers are in
linear scale

antennaGainS = db2pow(5);
antennaGainR = db2pow(5);
antennaGainD = db2pow(0);

```



```

Set the amplitude reflection coefficient
alpha = 1;

Set the range of rate values
Rbar = [0.01 0.1:0.1:10];

Set parameters related to circuit power consumption
Ps = 100; Power dissipation in the transceiver hardware of the source
Pd = 100; Power dissipation in the transceiver hardware of the destination
Pe = 5; Power dissipation per element in the IRS (mW)
Pr = 100; Power dissipation in the transceiver hardware of the relay
nu = 0.5; Efficiency of the power amplifier at the source

Define distances in simulation setup
d_SR = 75; Distance between the source and IRS/relay1
d_RR = 75; Distance between the IRS/RELAY1 and IRS/relay2
dv = 10; Minimum distance between destination and the IRS/relay

Define the range of dl values in the simulation setup
dl = 140;

Compute distance between the source and destination
d_SD = sqrt(dl^2+dv^2);

Compute distance between the IRS/relay and destination
d_RD = sqrt((dl-(d_SR+d_RR))^2+dv^2);

Compute the channel gains using the 3GPP models and antenna gains
betaSR = pathloss_3GPP_LOS(d_SR)*antennaGainS*antennaGainR;
betaRR = pathloss_3GPP_LOS(d_RR)*antennaGainR*antennaGainR;
betaRD = pathloss_3GPP_LOS(d_RD)*antennaGainR*antennaGainD;
betaSD = pathloss_3GPP_NLOS(d_SD)*antennaGainS*antennaGainD;

Compute The sum of relays/irs
betaSumRelays=betaSR+betaRR;
betaSumSR=betaSumRelays+betaSumRelays;
betaSumRD=betaRD+betaRD;

Prepare to save simulation results
EE_SISO = zeros(length(Rbar),1);
EE_IRS = zeros(length(Rbar),1);
EE_DF = zeros(length(Rbar),1);
TR_SISO = zeros(length(Rbar),1);

```

```

TR_IRS = zeros(length(Rbar),1);
TR_DF = zeros(length(Rbar),1);
Nopt = zeros(length(Rbar),1);
Go through all rate values
for ind = 1:length(Rbar)
    Compute required SINR values
    SINR = 2^(Rbar(ind))-1; %SISO and IRS
    SINR_DF = 2^(2*Rbar(ind))-1; %DF relaying
    Compute the transmit power in the SISO case, using Eq. (17)
    P_SISO = SINR*sigma2/betaSD;
    TR_SISO(ind)=P_SISO;
    Compute the energy efficiency in the SISO case
    (the factor 1000 is used to convert mW to W)
    EE_SISO(ind) = 1000*B*Rbar(ind)/(P_SISO/nu + Ps + Pd);
    Compute the transmit power in the DF relaying case, using Eq. (19)
    P_DF = SINR_DF*sigma2*(betaSumSR+betaSumRD-betaSD)/(2*betaSumRD*betaSumSR);
    TR_DF(ind)=P_DF;
    Compute the energy efficiency in the DF relaying case
    (the factor 1000 is used to convert mW to W)
    EE_DF(ind) = 1000*B*Rbar(ind)/(P_DF/nu + Ps/2 + Pd + Pr);
    Compute the power-minimizing number of reflecting elements
    Nopt(ind) = (2*SINR*sigma2/(alpha^2*betaSumSR*betaSumRD*Pe))^(1/3) -
sqrt(betaSD/(betaSumSR*betaSumRD))/alpha;
    if Nopt(ind)<0
        Nopt(ind) = 0;
    end
    Compute the transmit power in the IRS case, using Eq. (18)
    P_IRS = SINR*sigma2./(sqrt(betaSD) + Nopt(ind)*alpha*sqrt(betaSumSR*betaSumRD)).^2;
    TR_IRS(ind)=P_IRS;
    Compute the energy efficiency in the IRS case
    (the factor 1000 is used to convert mW to W)
    EE_IRS(ind) = 1000*B*Rbar(ind)/(P_IRS/nu + Ps + Pd + Nopt(ind)*Pe);
end
Plot simulation results

```

```

figure;
hold on; box on;
plot(Rbar,TR_DF,'b-.','LineWidth',2);
plot(Rbar,TR_IRS,'r-','LineWidth',2);
plot(Rbar,TR_SISO,'k--','LineWidth',2);
xlabel('range of rate values','Interpreter','Latex');
ylabel('Transmit Power [Watt]','Interpreter','Latex');
legend('DF relay','IRS','SISO','Location','NorthWest');
set(gca,'fontsize',18);
figure;
hold on; box on;
plot(Rbar,(EE_DF)/1e6,'b-.','LineWidth',2);
plot(Rbar,(EE_IRS)/1e6,'r-','LineWidth',2);
plot(Rbar,(EE_SISO)/1e6,'k--','LineWidth',2);
xlabel('Achievable rate [bit/s/Hz]','Interpreter','Latex');
ylabel('Energy efficiency [Mbit/Joule]','Interpreter','Latex');
legend('DF relay','IRS','SISO','Location','NorthWest');
set(gca,'fontsize',18);[6]

close all;
clear;

```

6.7 Κώδικας περιπτώσεων με 8 RIS/Relays σε σειρά

```

Set simulation parameters
Carrier frequency (in GHz)
fc = 3;
Bandwidth
B = 10e6;
Noise figure (in dB)
noiseFiguredB = 10;
Compute the noise power in dBm
sigma2dBm = -174 + 10*log10(B) + noiseFiguredB;

```

```

sigma2 = db2pow(sigma2dBm);
Define the channel gain functions based on the 3GPP Urban Micro in
"Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9)."
3GPP TS 36.814, Mar. 2010. Note that x is measured in m and that the
antenna gains are included later in the code
pathloss_3GPP_LOS = @(x) db2pow(-28-20*log10(fc)-22*log10(x));
pathloss_3GPP_NLOS = @(x) db2pow(-22.7-26*log10(fc)-36.7*log10(x));
Define the antenna gains at the source, relay/IRS, and destination. The
numbers are in linear scale
antennaGainS = db2pow(5);
antennaGainR = db2pow(5);
antennaGainD = db2pow(0);
Set the amplitude reflection coefficient
alpha = 1;
Set the range of rate values
Rbar = [0.01 0.1:0.1:15];%Set parameters related to circuit power consumption
Ps = 100; Power dissipation in the transceiver hardware of the source
Pd = 100; Power dissipation in the transceiver hardware of the destination
Pe = 5; Power dissipation per element in the IRS (mW)
Pr = 100; Power dissipation in the transceiver hardware of the relay
nu = 0.5; Efficiency of the power amplifier at the source
Define distances in simulation setup
d_SR = 10; %Distance between the source and IRS/relay1
d_RR1 = 10; %Distance between the IRS/RELAY1 and IRS/relay2
d_RR2 = 10; %Distance between the IRS/RELAY2 and IRS/relay3
d_RR3 = 10; %Distance between the IRS/RELAY3 and IRS/relay4
d_RR4 = 10; %Distance between the IRS/RELAY4 and IRS/relay5
d_RR5 = 10; %Distance between the IRS/RELAY5 and IRS/relay6
d_RR6 = 10; %Distance between the IRS/RELAY6 and IRS/relay7
d_RR7 = 10; %Distance between the IRS/RELAY7 and IRS/relay8
dv = 10; %Minimum distance between destination and the IRS/relay
Define the range of dl values in the simulation setup
dl = 70;
Compute distance between the source and destination

```

```

d_SD = sqrt(d1^2+dv^2);
Compute distance between the IRS/relay and destination
d_RD = sqrt((d1-(d_SR+d_RR1+d_RR2+d_RR3+d_RR4+d_RR5+d_RR6+d_RR7))^2+dv^2);
Compute the channel gains using the 3GPP models and antenna gains
betaSR = pathloss_3GPP_LOS(d_SR)*antennaGainS*antennaGainR;
betaRR1 = pathloss_3GPP_LOS(d_RR1)*antennaGainR*antennaGainR;
betaRR2 = pathloss_3GPP_LOS(d_RR2)*antennaGainR*antennaGainR;
betaRR3 = pathloss_3GPP_LOS(d_RR3)*antennaGainR*antennaGainR;
betaRR4 = pathloss_3GPP_LOS(d_RR4)*antennaGainR*antennaGainR;
betaRR5 = pathloss_3GPP_LOS(d_RR5)*antennaGainR*antennaGainR;
betaRR6 = pathloss_3GPP_LOS(d_RR6)*antennaGainR*antennaGainR;
betaRR7 = pathloss_3GPP_LOS(d_RR7)*antennaGainR*antennaGainR;
betaRD = pathloss_3GPP_LOS(d_RD)*antennaGainR*antennaGainD;
betaSD = pathloss_3GPP_NLOS(d_SD)*antennaGainS*antennaGainD;
Compute The sum of relays/irs
betaSumRelays=betaSR+betaRR1+betaRR2+betaRR3+betaRR4+betaRR5+betaRR6+betaRR7;
Prepare to save simulation results
EE_SISO = zeros(length(Rbar),1);
EE_IRS = zeros(length(Rbar),1);
EE_DF = zeros(length(Rbar),1);
TR_SISO = zeros(length(Rbar),1);
TR_IRS = zeros(length(Rbar),1);
TR_DF = zeros(length(Rbar),1);
Nopt = zeros(length(Rbar),1);
Go through all rate values
for ind = 1:length(Rbar)
    Compute required SINR values
    SINR = 2^(Rbar(ind))-1; %SISO and IRS
    SINR_DF = 2^(2*Rbar(ind))-1; %DF relaying
    Compute the transmit power in the SISO case, using Eq. (17)
    P_SISO = SINR*sigma2/betaSD;
    TR_SISO(ind)=P_SISO;
    Compute the energy efficiency in the SISO case
    (the factor 1000 is used to convert mW to W)

```

```

EE_SISO(ind) = 1000*B*Rbar(ind)/(P_SISO/nu + Ps + Pd);

Compute the transmit power in the DF relaying case, using Eq. (19)
P_DF = SINR_DF*sigma2*(betaRD+betaSumRelays-betaSD)/(2*betaRD*betaSumRelays);
TR_DF(ind)=P_DF;
Compute the energy efficiency in the DF relaying case
(the factor 1000 is used to convert mW to W)
EE_DF(ind) = 1000*B*Rbar(ind)/(P_DF/nu + Ps/2 + Pd + Pr);
Compute the power-minimizing number of reflecting elements
Nopt(ind)      =      (2*SINR*sigma2/(alpha^2*betaSumRelays*betaRD*Pe))^(1/3) -
sqrt(betaSD/(betaSumRelays*betaRD))/alpha;
if Nopt(ind)<0
    Nopt(ind) = 0;
end
Compute the transmit power in the IRS case, using Eq. (18)
P_IRS          =          SINR*sigma2./(sqrt(betaSD)
Nopt(ind)*alpha*sqrt(betaSumRelays*betaRD)).^2;      +
TR_IRS(ind)=P_IRS;
Compute the energy efficiency in the IRS case
(the factor 1000 is used to convert mW to W)
EE_IRS(ind) = 1000*B*Rbar(ind)/(P_IRS/nu + Ps + Pd + Nopt(ind)*Pe);
end
Plot simulation results
figure;
hold on; box on;
plot(Rbar,TR_DF,'b-.','LineWidth',2);
plot(Rbar,TR_IRS,'r-','LineWidth',2);
plot(Rbar,TR_SISO,'k--','LineWidth',2);
xlabel('range of rate values','Interpreter','Latex');
ylabel('Transmit Power [milliwatt]','Interpreter','Latex');
legend('DF relay','IRS','SISO','Location','NorthWest');
set(gca,'fontsize',18);
figure;
hold on; box on;

```

```
plot(Rbar, (EE_DF)/1e6, 'b-.', 'LineWidth', 2);  
plot(Rbar, (EE_IRS)/1e6, 'r-', 'LineWidth', 2);  
plot(Rbar, (EE_SISO)/1e6, 'k--', 'LineWidth', 2);  
xlabel('Achievable rate [bit/s/Hz]', 'Interpreter', 'Latex');  
ylabel('Energy efficiency [Mbit/Joule]', 'Interpreter', 'Latex');  
legend('DF relay', 'IRS', 'SISO', 'Location', 'NorthWest');  
set(gca, 'fontsize', 18);
```

7 Αναφορές

- [1] Chongwen Huang , Alessio Zappone , Senior Member, IEEE, George C. Alexandropoulos , Senior Member, IEEE, Mérouane Debbah, Fellow, IEEE, and Chau Yuen , Senior Member, IEEE, “ Reconfigurable Intelligent Surfaces for Energy Efficiency in Wireless Communication”, IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS, VOL. 18, NO. 8, AUGUST 2019
- [2] Y. Liu, X. Liu, X. Mu, T. Hou, J. Xu, Z. Qin, M. D. Renzo, and N. Al-Dhahir, “Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities,”IEEE Commun. Surveys Tutorials, to appear in 2021.
- [3] WEI JIANG (Senior Member, IEEE), BIN HAN (Member, IEEE), MOHAMMAD ASIF HABIBI , AND HANS DIETER SCHOTTEN (Member, IEEE), “The Road Towards 6G: A Comprehensive Survey” Digital Object Identifier 10.1109/OJCOMS.2021.3057679, Received 25 January 2021; accepted 31 January 2021. Date of publication 8 February 2021; date of current version 24 February 2021.
- [4] Xiaojun Yuan, Ying-Jun Angela Zhang, Yuanming Shi, Wenjing Yan, and Hang Liu, “Reconfigurable-Intelligent-Surface Empowered Wireless Communications: Challenges and Opportunities”, IEEE Wireless Communications, April 2021.
- [5] MARCO DI RENZO (Fellow, IEEE), KONSTANTINOS NTONTIN (Member, IEEE), JIAN SONG, FADIL H. DANUFANE1, XUEWEN QIAN, FOTIS LAZARAKIS, JULIEN DE ROSNY, DINH-THUY PHAN-HUY (Member, IEEE), OSVALDO SIMEONE (Fellow, IEEE), RUI ZHANG (Fellow, IEEE), MEROAUNE DEBBAH (Fellow, IEEE), GEOFFROY LEROSEY, MATHIAS FINK (Member, IEEE), SERGEI TRETAKOV (Fellow, IEEE), AND SHLOMO SHAMAI (Life Fellow, IEEE), “Reconfigurable Intelligent Surfaces vs. Relaying: Differences, Similarities, and Performance Comparison”, Digital Object Identifier 10.1109/OJCOMS.2020.3002955, Received 3 May 2020; revised 26 May 2020; accepted 11 June 2020. Date of publication 16 June 2020; date of current version 1 July 2020.
- [6] Emil Björnson, Senior Member, IEEE, Özgecan Özdogan, Student Member, IEEE, Erik G. Larsson, Fellow, IEEE, “Intelligent Reflecting Surface vs. Decode-and-Forward: How Large Surfaces Are Needed to Beat Relaying?” <https://arxiv.org/pdf/1906.03949> [cs.it] 11 Nov 2019.