

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Τηλεπικοινωνιών



Γούλιαρος Αντωνιάδης Αλέξανδρος
ΑΕΜ:7869

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των δικτύων επικοινωνίας με
συσκευές μηδενικής-ενέργειας

Επιβλέπων: Καθηγητής Γεώργιος Καραγιαννίδης

Θεσσαλονίκη, Σεπτέμβριος 2022

© Γούλιαρος Αντωνιάδης Αλέξανδρος

© Α.Π.Θ.

Βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των δικτύων επικοινωνίας με συσκευές μηδενικής-ενέργειας

«Η έγκριση της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής από το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέως»

(Ν. 5343/1932, άρθρο 202, παρ. 2)

Κείμενο αφιέρωσης (προαιρετικό).

Περίληψη

Το WPT είναι μία τεχνολογία ΕΗ η οποία χρησιμοποιεί την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία για την φόρτιση των κόμβων σε ένα δίκτυο επικοινωνίας. Στο WPT η ενέργεια συλλέγεται είτε μέσα σήματα περιβάλλοντος είτε από μία ελεγχόμενη πηγή ενέργειας κι έτσι ξεπερνάμε την απρόβλεπτη φύση των φυσικών πηγών ενέργειας. Αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές τεχνολογίες ΕΗ καθώς έχει πολύ σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη και έχει φανεί ότι είναι αρκετά χρήσιμη για της επόμενες γενιές ΙοΤ. Επομένως, η περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας WPT είναι αρκετά σημαντική τα επόμενα χρόνια. Παράλληλα, η ενσωμάτωση της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας στα δίκτυα επικοινωνίας δημιουργεί την ανάγκη για ανάπτυξη τεχνολογίας η οποία μεταφέρει τόσο πληροφορία όσο και ισχύς ταυτόχρονα στις συσκευές. Αυτή την απαίτηση την επιλύει η τεχνολογία SWIPT η οποία είναι πολύ σημαντική για την μεταφορά ενέργειας και δεδομένων. Ωστόσο, στο SWIPT δεν γίνεται να λαμβάνουμε από το ίδιο σήμα ισχύ και πληροφορία καθώς η συλλογή ενέργειας καταστρέφει το περιεχόμενο πληροφοριών επομένως είναι απαραίτητες τεχνικές SWIPT για να τα λαμβάνουμε ξεχωριστά. Εμείς, επιλέγουμε να χωρίσουμε το σήμα στα δύο. Ένα σήμα κάτω ζεύξης συλλέγει την ενέργεια και ένα σήμα άνω ζεύξης πραγματοποιεί την μεταφορά πληροφορίας.

Το μοντέλο συστήματός μας αποτελείται από έναν σταθμό βάσης για την παραγωγή ενέργειας και χρήστες ZED οι οποίοι λαμβάνουν ισχύ μόνο από τον φάρο ισχύος. Έτσι, στο WPCN θα χρειαστούμε το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης χρόνου TDMA όπου τα δύο σήματα άνω και κάτω ζεύξης χωρίζονται σε χρονοθυρίδες για τον κάθε χρήστη. Η κάθε συσκευή θα λαμβάνει πρώτα το σήμα κάτω ζεύξης για να συλλέξει ισχύ και στη συνέχεια χρησιμοποιεί αυτή την ισχύ για να μεταφέρει πληροφορία. Η μόνη παροχή ενέργεια στις ZED προέρχεται μόνο από το WPT, το οποίο γενικά παρέχει αρκετά περιορισμένη ποσότητα. Επομένως, αντιλαμβανόμαστε ότι θα πρέπει οι μελέτες μας να επικεντρωθούν στην ανάπτυξη αποδοτικών συστημάτων ενέργειας για να μπορέσουν να ανταπεξέλθουμε σε αυτή την αδυναμία.

Σε αυτή την κατεύθυνση η συγκεκριμένη διατριβή σκοπεύει να βελτιώσει την διαχείριση πόρων του συστήματος για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας που χρησιμοποιεί ο κάθε χρήστης. Κάθε ZED καταναλώνει ένα κομμάτι από της συνολικής ισχύς στα διάφορα εξαρτήματα λειτουργίας της και την υπόλοιπη στην μεταφορά δεδομένων. Γνωστή ως ισχύ σταθερού κυκλώματος. Έτσι, διαμορφώνουμε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης της μέσης ενέργειας που συλλέγεται σε κάθε ZED. Επιπλέον, χωρίς να επηρεάζεται η γενικότητα θα μελετήσουμε το πρόβλημα μόνο για την μία συσκευή και τα αποτελέσματα που προέκυψαν θα ισχύουν για τις υπόλοιπες. Το παραγόμενο πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι μη-κυρτό οπότε με την βοήθεια του Εσσιανού Πίνακα και της θεωρίας το μετατρέπουμε σε κυρτό προκειμένου να λυθεί σε πολυωνμικό χρόνο.

Τέλος, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μας επιδεικνύουν την στρατηγική για την διαχείριση των πόρων στα δίκτυα συσκευών μηδενικής ενέργειας. Μελετήσαμε στις προσομοιώσεις για δίκτυα με δύο και τρεις χρήστες. Η διαφορά που εντοπίσαμε στα δύο δίκτυα είναι δεκαπλάσια ισχύς μεταφοράς που καταναλώνεται στους τρεις χρήστες σε σύγκριση με τους δυο. Και στις δύο περιπτώσεις η ποιότητα του καναλιού επικοινωνίας παίζει σημαντικό ρόλο στην μείωση της ενέργειας που χρειάζεται το σύστημα. Καταληκτικά, αν λαμβάνουμε υπόψη την ισχύ σταθερού κυκλώματος βελτιώνεται η ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος μέσα από την μείωση της. Επομένως, για την ανάπτυξη αποδοτικότερων συστημάτων επικοινωνίας θα πρέπει η τεχνολογία να εστιάσει στην μείωση της κατανάλωσης των συσκευών και στην βελτίωση της ποιότητα του καναλιού επικοινωνίας.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Ραδιοσυχνότητα Συλλογής Ενέργειας (RF-EH)	2
1.1.1	Σχεδιασμός κυκλώματος RF-EH	2
1.1.2	Συνήθης Εφαρμογές	3
1.1.3	Προκλήσεις	3
1.2	Ασύρματη Μεταφορά Ισχύος (WPT)	4
1.2.1	Κοντινό Πεδίο	5
1.2.2	Μακρινό Πεδίο	6
1.2.3	Προκλήσεις	7
1.3	Ταυτόχρονη Μεταφορά πληροφορίας και ισχύς (SWIPT)	7
1.3.1	Ξεχωριστός Δέκτης SR	8
1.3.2	Δέκτης Εναλλαγής Χρόνου	8
1.3.3	Δέκτης Διαχωρισμού Ισχύος	9
1.3.4	Κεραία Εναλλαγής Δέκτη	9
1.4	Ασύρματη Τροφοδοτούμενη Δικτύωση Επικοινωνίας	10
1.5	Δομή	11
2	Μοντέλο Συστήματος	13
3	Βέλτιστη κατανομή πόρων για ελαχιστοποίηση της ενέργειας	17
3.1	Διαμόρφωση προβλήματος ελαχιστοποίησης	17
3.2	Μετατροπή από non-convex σε convex πρόβλημα	19
4	Αποτελέσματα και Συζήτηση	25
4.1	Διάγραμμα της Ισχύος Μεταφοράς ως προς την ποιότητα επικοινωνίας	25
4.1.1	για $N=2$	25
4.1.2	για $N=3$	26
4.2	Διάγραμμα της Ισχύος Μεταφοράς ως προς την κυκλωματική κατανάλωση ισχύος	27
4.2.1	για $N=2$	27
4.2.2	για $N=3$	28
5	Επίλογος	31
	Βιβλιογραφία	33

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η Συλλογή Ενέργειας Energy Harvesting(EH) είναι μια διαδικασία σύλληψης και μετατροπής χαμένων ή ασήμαντων σημάτων ενέργειας, όπως θερμότητα, ήχος και Ραδιοσυχνότητες (RF), σε ηλεκτρική ενέργεια και βάζοντάς τα να λειτουργίσουν με βάση τις απαιτήσεις ισχύος. Η χρησιμοποίηση φυσικών πηγών στην EH δεν ήταν τόσο αποτελεσματικό όσο αναμενόταν λόγω της ακανόνιστης και απρόβλεπτης φύσης των περιβαλλοντικών πηγών. Επίσης, οι κύριες τεχνικές EH είναι εφαρμόσιμες μόνο σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα.

Η Ασύρματη Μεταφορά Ενέργειας WPT είναι μία από τις τεχνολογίες EH που ξεπερνούν το προαναφερθέντες περιορισμούς [1], όπου οι κόμβοι στις επικοινωνίες δικτύου φορτίζουν τις ενσωματωμένες μπαταρίες τους από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η πράσινη ενέργεια μπορεί να συλλεχθεί χρησιμοποιώντας δύο μέθοδοι στο WPT, είτε από τα σήματα περιβάλλοντος είτε από μια αποκλειστική πλήρως ελεγχόμενη πηγή ενέργειας όπως ένας σταθμός βάσης. Οι πιο πρόσφατες εφαρμογές που βασίζονται στο WPT έχουν επικεντρωθεί σε μικρή απόσταση (εγγύς πεδίο) και όχι σε μεγάλη απόσταση (μακρινό πεδίο) μετάδοσης ενέργειας. Οι αποστάσεις κοντινού και μακρινού πεδίου εξαρτώνται σχετικά με τα σενάρια εφαρμογής. Για παράδειγμα, κατά την ασύρματη ανταλλαγή ηλεκτρομαγνητικής ισχύς, η απόσταση κοντινού πεδίου μπορεί να είναι μόνο μερικά μέτρα τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους περιβάλλοντος, ενώ για το μακρινό πεδίο μπορεί να είναι έως και αρκετά χιλιόμετρα. Ωστόσο, το WPT κοντινού πεδίου έχει πολλά μειονεκτήματα: περιορισμούς στην απόσταση, υψηλό αρχικό κόστος, χρήση υψηλής συχνότητας στην παροχή και το ανέφικτο των τεχνικών ιονισμού αέρα δυσκολίες στη διατήρηση της ισχύς πεδίου εντός των επιπέδων ασφαλείας και στον συντονισμένο επαγωγικό συντονισμό[2].

Στα πλαίσια των δικτύων επικοινωνίας, η απόσταση από το σταθμό βάσης στη συσκευή είναι ένας κρίσιμος παράγοντας τόσο για την μεταφορά πληροφορίας όσο και για την ισχύ. Επομένως, οι τεχνικές WPT σε μακρινό πεδίο πρέπει να βελτιωθούν περαιτέρω. Η προοπτική ενσωμάτωσης του WPT με τα δίκτυα επικοινωνίας δημιουργεί την ανάγκη για τεχνολογία που μπορεί να μεταφέρει τόσο πληροφορίες όσο και ισχύς ταυτόχρονα στις τελικές συσκευές. Για αυτήν την απαίτηση, εισηχθεί για πρώτη φορά η έννοια της Ταυτόχρονης Μεταφοράς Πληροφορίας και Ενέργειας(SWIPT) στο [1] μελετάται το SWIPT από θεωρητικής σκοπιάς. Πρόσφατα, το SWIPT έχει προσελκύσει σημαντική προσοχή στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας [3]. Στην εποχή της επικοινωνίας 5G, η τεχνολογία SWIPT μπορεί να έχει θεμελιώδη σημασία για την μετάδοση ενέργεια και πληροφοριών σε

πολυάριθμους τύπους σύγχρονων δικτύων επικοινωνιών. Με την ταχεία πρόοδο της τεχνολογίας, οι ασύρματοι πομποδέκτες και αισθητήρες γίνονται πιο αποδοτικοί στην κατανάλωση ενέργειας και μικρότεροι σε μέγεθος. Φανταζόμαστε ως μελλοντική πιθανότητα ότι τα σήματα ραδιοσυχνότητας δεν θα γίνουν μόνο πηγή ενέργειας για την λειτουργία των συσκευών στο δίκτυο, αλλά θα συνδυαστεί και με την μεταφορά ισχύος και πληροφορίας.

1.1 Ραδιοσυχνότητα Συλλογής Ενέργειας (RF-EH)

Η EH είναι μία διαδικασία μετατροπής της ενέργειας η οποία λαμβάνει ενέργεια από εξωτερικές πηγές όπως αιολική, θερμική, κινητική, ηλιακή και τις μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια. Το περιβάλλον παρέχει διάφορα ήδη πηγών ενέργειας πέρα από την αποθήκευση ενέργειας σε μπαταρίες και υπερπυκνωτές. Υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον όσον αφορά την RF-EH, ως απαίτηση του Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων (WSNs) καθώς ο αριθμός των ραδιοπομπών και των κινητών σταθμών τηλεφωνίας συνεχίζει να αυξάνεται [4]. Η ενέργεια ραδιοσυχνότητας είναι μία μορφή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας αποτελούμενη από ραδιοκύματα με μαγνητική και ηλεκτρική ενεργεία η οποία εκπέμπει στον ελεύθερο χώρο. Η RF-EH είναι μία ευνοϊκή λύση για ασύρματα δίκτυα με περιορισμένη διάρκεια ζωής. Η τροφοδοσία του δικτύου RF-EH έχει διατηρηθεί σε ένα ορισμένο ρυθμό στο περιβάλλον ραδιοσυχνότητας κατασκευασμένο από δισεκατομμύρια ραδιοπομπούς, κινητά τηλέφωνα, κινητούς σταθμούς βάσης και τηλεοπτικά συστήματα εκπομπής σε όλο τον κόσμο. Έτσι, οι ασύρματες συσκευές τώρα μπορούν να απορροφήσουν ενέργεια από RF σήματα ανάλογα με τις διακυμάνσεις ισχύς με την πάροδο του χρόνου.

1.1.1 Σχεδιασμός κυκλώματος RF-EH

1) Σχεδιασμός Κεραίας:

Η κεραία είναι μία συσκευή στο RF-EH κύκλωμα όπου εξυπηρετεί στην λήψη των RF σημάτων. Η απόδοση της κεραίας είναι ένας βασικός παράγοντας που σχετίζεται με τη συχνότητα λειτουργίας και βοηθάει να διαβεβαιώνει την επιτυχή λειτουργία του RF-EH συστήματος. Το υψηλό κέρδος κεραίας διατηρώντας το μέγεθος μικρογραφίας είναι ο κύριος στόχος της τεχνολογίας κεραίων, το οποίο οδηγεί σε συμβιβασμό ανάμεσα στο μέγεθος και την απόδοση μιας κεραίας. Η ποσότητα της ενέργειας απορρόφησης μπορεί να αυξηθεί δραματικά είτε μέσα από σωστά ρυθμισμένες κεραίες, με το αντίστοιχο κύκλωμα, και την διαχείριση της ισχύς είτε όταν λειτουργούν κεραίες σε διαφορετικές συχνότητες. Οι κεραίες RF μπορούν να συλλέγουν ενέργεια από διάφορες πηγές όπως είναι τα κινητά τηλέφωνα (900-950)MHz, τα τοπικά δίκτυα (2,4 GHz-5,8 GHz), τα σήματα Wi-Fi και η εκπομπή Ultra High τηλεοπτικών σημάτων συχνότητας (UHF). Ωστόσο, αυτό έρχεται με αρκετούς παράγοντες που μετριάζουν την απόδοση, όπως είναι η απώλεια διαδρομής και η σκίαση.

2) Δίκτυο αντιστοίχισης:

Η κύρια λειτουργία ενός δικτύου αντιστοίχισης είναι να αυξάνουν την τάση εισόδου του ανορθωτή και να ελαχιστοποιούν την απώλεια μετάδοσης από την κεραία προς αυτόν. Όταν η σύνθετη αντίσταση των φορτίων και η σύνθετη αντίσταση στην έξοδο της κεραίας ταιριάζουν μεταξύ τους, η μέγιστη μεταφορά ισχύος μπορεί να επιτευχθεί, και είναι γνωστή ως σύνθετη αντίσταση αντιστοίχισης.

3) Ανορθωτής:

Η κύρια λειτουργία του ανορθωτή είναι η μετατροπή των λαμβανόμενων σημάτων RF σε επίπεδα τάσης DC. Μία από τις πολύ σημαντικές προκλήσεις του σχεδιασμού του ανορθωτή είναι η δημιουργία σημαντικής τάσης (τάση που μοιάζει με μπαταρία) από τη λήψη Ισχύος RF. Η απόδοση της μετατροπής RF σε DC καθορίζεται από τη διόδο στο κύκλωμα του ανορθωτή. Επομένως, η διόδος αναγνωρίζεται ως το κύριο στοιχείο του κυκλώματος ανορθωτή. Υψηλότερη απόδοση ανόρθωσης μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας μια διόδο με χαμηλότερη τάση.

1.1.2 Συνήθης Εφαρμογές

Ως αποτέλεσμα της τεχνικής RF-EH, διάφορες μορφές πρακτικής εφαρμογής έχουν γίνει δυνατές: τα WSN, τα ασύρματα δίκτυα σώματος και τα ασύρματα συστήματα φόρτισης για ασύρματες συσκευές. Σε αυτή την τεχνική τα ραδιοσήματα χρησιμοποιούν κανάλια για να μεταφέρουν ενέργεια στην μορφή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με εύρος συχνότητας από 3kHz έως 300GHz. Η RF μεταφορά ενέργειας θεωρείται μία τεχνική μεταφοράς ενέργειας μεγάλης απόστασης, καθώς το μεταφερόμενο ηλεκτρομαγνητικό σήμα δεν μπορεί να ανασυρσθεί σε απόσταση άνω των $l/2p$ στην κεραία εκπομπής. Σε μεγάλη απόσταση, RF η ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικές επικοινωνίες τεχνολογίας όπως η επικοινωνία D2D, IoT, η συνεργατική επικοινωνία και τα γνωστικά ραδιοδίκτυα.

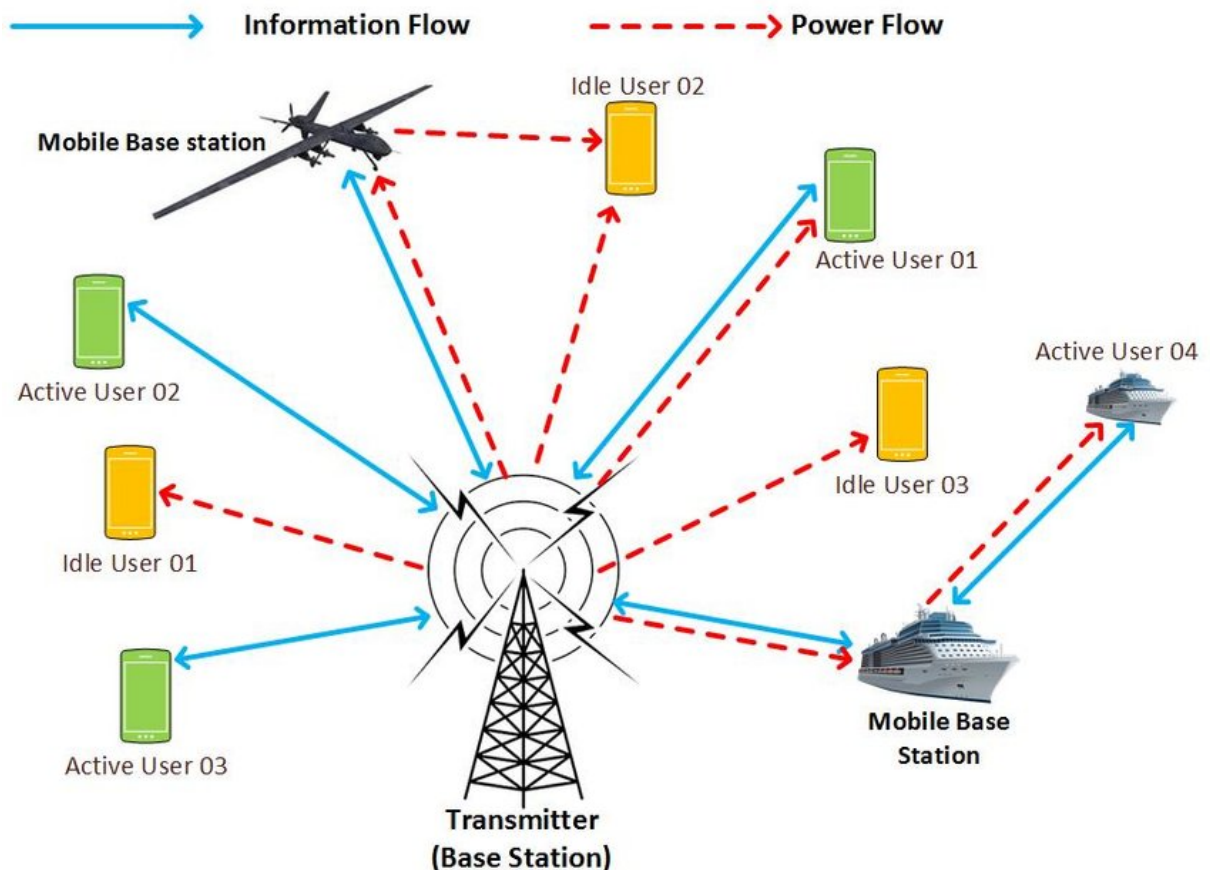
1.1.3 Προκλήσεις

Μερικές γνωστικές μελέτες που εξέτασαν τις επιπτώσεις του ανθρώπου σε σχέση με την RF τεχνολογία. Στο [5] απεικονίζεται ότι η παρουσία της RF ακτινοβολίας, μπορεί να υπάρξει μεγάλη καθυστέρηση της φυσικής απόκρισης με τις αντιδράσεις της μνήμης του ανθρώπου. Επιπλέον, η έντονη έκθεση σε ακτινοβολίες ραδιοσυχνοτήτων μπορεί να προκαλέσει έντονη θέρμανση σε βιολογικούς ιστούς. Η επιστημονική κοινότητα με τη βοήθεια κρατικών φορέων θα πρέπει να αποκτήσει πληρέστερη κατανόηση των πιθανών επιπτώσεων στην υγεία και στην ασφάλεια που σχετίζονται με τη χρήση του WPT/SWIPT σε δημόσιες ρυθμίσεις. Η απόσταση μεταφοράς είναι από τα κύρια προβλήματα στην RF EH αλλά λόγω του νόμου του αντίστροφου τετραγώνου, η μεταφορά ενέργειας RF είναι περιορισμένη ως προς το εύρος κάλυψής του. Η κατευθυντικότητα και το κέρδος της κεραίας λήψης επηρεάζουν κρίσιμα την RF-EH τιμή. Έτσι, αναπτύσσεται κεραία υψηλού κέρδους που μπορεί να υποστηρίξει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων και αποτελεί μια σημαντική ερευνητική κατεύθυνση. Η αντιστοίχιση της σύνθετης αντίστασης είναι ένα από τα κύρια στοιχεία στους ανορθωτές, η οποία καθορίζει την ποσότητα της συγκομιδής ενέργεια που δέχεται. Έτσι, ο σωστός σχεδιασμός κυκλώματος απαιτεί τεχνικές, οι οποίες συντονίζουν αυτόματα τις παραμέτρους για μείωση της αναντιστοιχίας της σύνθετης αντίστασης. Με τις ραγδαίες προόδους στις συσκευές επικοινωνίας, η μονάδα RF-EH πρέπει να είναι αρκετά μικρή για να ενσωματωθούν σε συσκευές χαμηλής κατανάλωσης. Ωστόσο, είναι πρόκληση η μείωση του μεγέθους της μονάδας RF-EH ενώ ταυτόχρονα διατηρείται η υψηλή απόδοση EH και επομένως απαιτούνται περαιτέρω ερευνητικές εργασίες για τη μείωση του μεγέθους της μονάδας RF-EH. Επιπλέον, η ευαισθησία ενός δέκτη πληροφοριών είναι υψηλότερη από τον δέκτη που χρησιμοποιείται σε RF-EH, με αποτέλεσμα το σχήμα SWIPT δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σε ορισμένα από τα σενάρια επικοινωνίας. Επομένως,

η ευαισθησία του δέκτη RF-EH πρέπει να βελτιωθεί προκειμένου να έχουμε ένα αποτελεσματικό SWIPT. Συσκευές με ραδιοσυχνότητες έχουν αυστηρό περιορισμό ισχύος και είναι δύσκολο να υποστηριχθούν σε αλγόριθμους που απαιτούν υψηλή υπολογιστική ισχύ. Επομένως, όλες οι τεχνικές διαμόρφωσης, κωδικοποίησης καναλιών, πρωτόκολλα δρομολόγησης και οι πολιτικές λειτουργίας του δέκτη πρέπει να επανασχεδιαστούν για RF ηλεκτρικά δίκτυα επικοινωνίας.

1.2 Ασύρματη Μεταφορά Ισχύος (WPT)

Το WPT είναι μια καινοτόμος ιδέα που επινοήθηκε αρχικά από τον Νίκο Τέσλα τη δεκαετία του 1890. Το WPT αναφέρεται στη μετάδοση ηλεκτρικής ενέργειας από μία πηγή ενέργειας, μέσω ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, σε ένα ηλεκτρικό εξάρτημα ή ένα τμήμα ενός κυκλώματος που καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια χωρίς τη βοήθεια ενσύρματων διασυνδέσεων. Το σύστημα WPT περιέχει έναν πομπό, μία κύρια πηγή ενέργειας και μία ή περισσότερες συσκευές-δέκτες. Ο πομπός συνδέεται με την πηγή, η οποία μεταμορφώνει την κύρια ισχύ σε ένα χρονικά κυμαινόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Τέλος, οι δέκτες λαμβάνουν και συλλέγουν την ενέργεια από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Στις πρόηγες προσπάθειες του WPT έχουν μελετηθεί δύο παράγοντες: η μεγάλη απόσταση μετάδοσης και η υψηλή ισχύς. Ωστόσο, στην περαιτέρω ανάπτυξη αφέθηκαν λόγω της χαμηλής απόδοσης της μετάδοσης ισχύος και τις ανυπαρξίες για ζητήματα υγείας που σχετίζονται με τις εφαρμογές υψηλής ισχύος. Ως εκ τούτου, οι περισσότερες έρευνες WPT συνεχίστηκαν σε δύο διακριτές περιοχές, την μη-ακτινοβολούμενη (κοντινό πεδίο) και την ακτινοβολούμενη (μακρινό πεδίο). Σε αυτά τα δύο πεδία έχουν αναπτυχθεί ξεχωριστά χαρακτηριστικά και αντίστοιχα χρησιμοποιούνται διαφορετικές τεχνικές WPT.



1.2.1 Κοντινό Πεδίο

Η περιοχή κοντινού πεδίου ή μη ακτινοβολούμενη είναι η περιοχή του ενός μήκος κύματος της κεραίας εκπομπής. Το εύρος τιμών της ισχύς σε αυτό το πεδίο είναι της τάξης των δεκάτων Watt και μεταφέρεται χρησιμοποιώντας με διάφορους τρόπους όπως είναι: η επαγωγική σύζευξη, η συντονιστική επαγωγική σύζευξη, η χωρητική σύζευξη ή ο ιονισμός αέρα (αστραπή). Στην κοντινή περιοχή, το σύστημα WPT απαιτεί υψηλή απόδοση μετάδοσης ισχύος (PTE) και μπορεί να επιτευχθεί πάνω από 80 τις εκατό PTE. Η ισχύς φεύγει από τον πομπό μόνο όταν υπάρχει δέκτης ή κάποιο υλικό απορρόφησης εντός του μήκος κύματος, το οποίο εξαρτάται από το σχήμα και το μέγεθος της κεραίας στον πομπό. Επομένως, η μεταδιδόμενη ισχύς μειώνεται εκθετικά με την απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη, δηλαδή αν η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη είναι μεγαλύτερη από το μήκος κύματος του μέσου μετάδοσης τότε πολύ μικρή ισχύς μπορεί να συλλεχθεί. Η θεωρία συζευγμένου τρόπου έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των χαρακτηριστικών του WPT κοντινού πεδίου στο [6] και έχει αποδοχηθεί από τους συγγραφείς, χρησιμοποιώντας συζευγμένες κεραίες, ότι η συχνότητα συντονισμού και το 40 τις εκατό PTE επιτυγχάθηκε στην απόσταση των 2μ. Αποδεικνύεται επίσης στο [2] ότι η διαμεσολάβηση μίας συντονισμένης κεραία μεταξύ των κεραίων λήψης και εκπομπής μπορούν να βελτιώσουν το PTE στο WPT. Επίσης, είναι γνωστό ότι η απόσταση σύζευξης και ο προσανατολισμός των κεραίων έχουν μεγάλη επίδραση στη βέλτιστη σύνθετη αντίσταση πηγής και φορτίου.

Επαγωγική Σύζευξη

Στην επαγωγική σύζευξη (επαγωγική μεταφορά ισχύος, IPT), που χρησιμοποιείται στο κοντινό πεδίο WPT, η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται μέσω πηνίων και του μαγνητικού πεδίου. Υψηλή απόδοση μπορεί να επιτευχθεί όταν τα πηνία είναι πολύ κοντά μεταξύ τους. Σύμφωνα με το νόμο του Αμπερε, ένα ταλαντούμενο δημιουργεί μαγνητικό πεδίο, όταν ένα Εναλλασσόμενο Ρεύμα (AC) διέρχεται από το πηνίο του πομπού. Όταν το μαγνητικό πεδίο προκαλέσει ένα πηνίο λήψης τότε δημιουργεί AC στον δέκτη. Στη συνέχεια, ένας ανορθωτής στον δέκτη τον μετατρέπει σε Direct Ρεύμα (DC) (ή οδηγεί απευθείας το φορτίο). Λίγες εφαρμογές λειτουργούν στα 50/60 Hz, οι οποίες χρησιμοποιούνται στην επαγωγική σύζευξη σε συσκευές επαναφόρτισης όπως ηλεκτρικές βάσεις οδοντόβουρτσας.

Ωστόσο, στις περισσότερες εφαρμογές, εφαρμόζεται μόνο ρεύμα AC μετά την αύξηση της συχνότητας AC ενός ηλεκτρονικού ταλαντωτή, αφού η απόδοση μετάδοσης μπορεί να βελτιωθεί με υψηλότερη συχνότητα. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται στην ασύρματη φόρτιση για καταναλωτικές ηλεκτρονικές συσκευές όπως φορητοί υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα και άλλες φορητές συσκευές, και χρησιμοποιούνται επίσης για φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Το IPT έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στα Ηλεκτρονικά Συστήματα οχημάτων (EV). Σε αρχικά στάδια, η φόρτιση κουπί έχει χρησιμοποιηθεί για την επαναφόρτιση της μπαταρίας του EV. Ωστόσο, αυτό το σύστημα είναι χωρίς σύνδεση, αλλά όχι ασύρματο.

Κύκλωμα Συντονισμού

Αργότερα, προστίθενται τα κυκλώματα συντονισμού για να ενισχύσουν την επαγωγική μετάδοση ισχύος. Επομένως, η ίδια ποσότητα ισχύος που μεταφέρεται χρησιμοποιώντας επαγωγική σύζευξη, μπορεί να μεταφέρεται τώρα σε μεγαλύτερη απόσταση. Ο Νίκολα Τέσλα ανακάλυψε το Resonant

IPT, το οποίο είναι ένα από τα πιο γνωστά ρεύματα στις τεχνολογίες WPT, που ενεργοποιούνται από σύγχρονα ηλεκτρονικά εξαρτήματα όπως μπαταρίες ηλεκτρικών οχημάτων. Στην ηχητική επαγωγική μεταφορά ισχύος (RIPT), η ισχύς μεταφέρεται με μαγνητικά πεδία μεταξύ των κυκλωμάτων συντονισμού πομπού και δέκτη που αποτελούνται από ένα πηνίο σύρματος προσαρτημένο σε έναν πυκνωτή ή έναν αυτοσυντονιστή ή ένα αντηχείο με εσωτερική χωρητικότητα. Η συντονισμένη IPT έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με την απλή. Συγκεκριμένα, στην συντονισμένη έχουμε μεγαλύτερη εμβέλεια, μειωμένες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, υψηλότερη συχνότητα λειτουργίας και συχνότητα υψηλότερης απόδοσης. Ωστόσο, η υψηλότερη λειτουργία συχνότητας στην περιοχή των kHz είναι ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της συντονισμένης IPT, το οποίο μπορεί να υποστηριχθεί από την τρέχουσα τελευταία λέξη της τεχνολογίας. Η ασύρματη κάλυψη ρεύματος είναι μία από τις πιθανές περιοχές για συντονισμένη IPT που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τροφοδοσία φώτων και για την επαναφόρτιση των μπαταριών κινητών οπουδήποτε σε ένα δωμάτιο χωρίς να χρησιμοποιούνται ενσύρματες συνδέσεις. Μια άλλη εφαρμογή του συντονισμού IPT είναι τα συστήματα δημόσιας συγκοινωνίας που παρέχουν ρεύμα σε όλο το πλάτος του οδοστρώματος για την επαναφόρτιση των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων και την τροφοδοσία συστημάτων μετακίνησης ανθρώπων, όπως τα ηλεκτρικά λεωφορεία με αυτόματη καθοδήγηση, τα τρένα κλπ. Ασύρματη τροφοδοσία ή επαναφόρτιση μικρών ηλεκτρικών συσκευών θα μπορούσαν να μειώσουν δραστικά την ποσότητα των απορριμάτων από μπαταρίες, τα τοξικά απόβλητα και την μόλυνση των υπόγειων υδάτων.

1.2.2 Μακρινό Πεδίο

Η περιοχή μακρινού πεδίου περιγράφει την περιοχή όπου βρίσκεται η απόσταση πολύ μεγαλύτερη από τη διάμετρο της κεραίας εκπομπής και ανακαλύφθηκε αμέσως μετά την ανακάλυψη των ενισχυτών μικροκύματος υψηλής ισχύος [7]. Η μετάδοση ισχύος σε μακρινό πεδίο έχει επιτρέψει τη μεταφορά ενέργειας σε μεγαλύτερες αποστάσεις χωρίς την χρησιμοποίηση ενός ενσύρματου ηλεκτρικού δικτύου κι έτσι παρέχει κίνητρα για περαιτέρω έρευνα για τη βελτίωση της αποδοτικότητας, της απόδοσης και της ευρωστίας των εφαρμογών WPT. Οι πιο γνωστές μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται για WPT σε μακρινό πεδίο είναι τα μικροκύματα και οι ακτίνες λέιζερ. Σύμφωνα με το Rayleigh κριτήριο, σε κάποια απόσταση κάθε είδους ραδιοκύματα, όπως π.χ τα μικροκύματα και οι ακτίνες λέιζερ θα εξασθενήσουν. Στο σύστημα WPT έχουμε μεγάλη κεραία εκπομπής σε σύγκριση με το μήκος κύματος ακτινοβολίας, κι έτσι μπορεί να σφίξει η δέσμη και να εξαπλωθεί σε μικρότερη απόσταση μετάδοσης. Όταν η διάμετρος της κεραίας ενός πομπού είναι μικρότερη από το μήκος κύματος, αυτό μπορεί να προκαλέσει υπερβολικές απώλειες λόγω πλευρικών λοβών. Η δέσμη ισχύος μικροκυμάτων είναι λιγότερο ευάλωτη στην ατμοσφαιρική εξασθένηση που προέρχεται από υδρατμούς ή σκόνης κι έτσι είναι πιο αποτελεσματική από τις ακτίνες λέιζερ. Η δέσμη ισχύος μικροκυμάτων προτείνεται η χρήση της σε διαστημικές εφαρμογές, όπως στο [8] μελετάται η μετάδοση ενέργειας από δορυφόρους ηλιακής ενέργειας σε γήινες βάσεις. Ωστόσο, πρακτικά είναι δύσκολο χρησιμοποιούνται δέσμες ισχύος μικροκυμάτων για τις περισσότερες διαστημικές εφαρμογές λόγω της απαίτησης μεγάλου μεγέθους διαφράγματος. Σε μια έρευνα για δορυφόρους ηλιακής ενέργειας το 1978, η NASA απαιτούσε εκπομπή κεραίας με διάμετρο 1 km [9]. Αυτά τα μεγέθη μπορούν να μειωθούν έχοντας μικρότερα μήκη κύματος, αλλά μπορούν να προκαλέσουν ατμοσφαιρική απορροφητικότητα. Επιπλέον, σε μια περιοχή διαμέτρου 10 χλμ η συστοιχία λήψης επιτρέπει τη χρήση επιπέδων

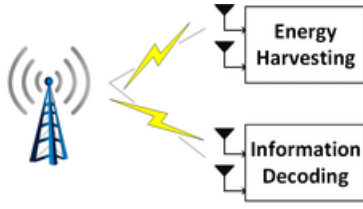
συνολικής ισχύος μέχρι 750 MW. Αυτά μπορούν να βρεθούν σε πολλούς σύγχρονους ηλεκτρικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής κάτω από την ανθρώπινη ασφαλή πυκνότητα ισχύος $1\text{mW}/\text{cm}^2$.

1.2.3 Προκλήσεις

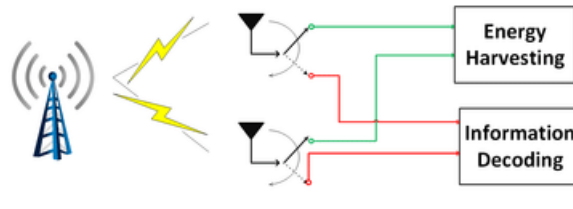
Η κύρια πρόκληση στο WPT είναι ο περιορισμός της μετάδοσής του στις περιφέρειες. Μέγιστη ενεργειακή απόδοση που μπορεί να είναι επιτυχής στο μακρινό πεδίο συνήθως δεν υπερβαίνει το 50 τις εκατό. Υπάρχουν τωρινά συστήματα που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας σήματα μικροκυμάτων με κεραίες υψηλής απολαβής, οι οποίες μπορούν να μεταφέρουν ισχύ σε περιοχές μακρινού πεδίου με το 90 τις εκατό της απόδοσης μετάδοσης ισχύος. Ωστόσο, αυτά τα συστήματα χρειάζονται από σημείο σε σημείο σύνδεση ή με οπτική επαφή. Παρόλα αυτά με την πρόοδο της τεχνολογία επικοινωνίας, υπάρχει ανάγκη μεταφοράς ισχύος με χρήση πανκατευθυντικών κεραιών για τη βελτίωση της περιοχής μετάδοσης. Επομένως, απαιτούνται περισσότερες μελλοντικές μελέτες στο μακρινό WPT για τη βελτίωση της κατευθυντικότητας και της αποδοτικότητας της μετάδοσης ενέργειας σε διαφορετικές τεχνολογίες επικοινωνίας.

1.3 Ταυτόχρονη Μεταφορά πληροφορίας και ισχύς (SWIPT)

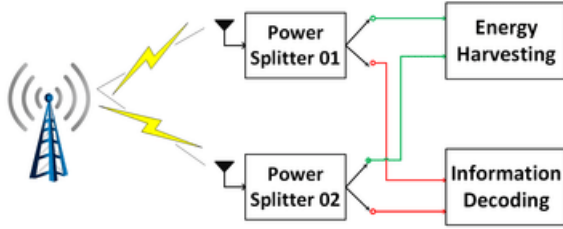
Το SWIPT είναι μια τεχνική που αναπτύχθηκε πρόσφατα από διάφορες Τεχνολογίες WPT και επιτρέπει την ταυτόχρονη ασύρματη μεταφορά πληροφοριών και ενέργειας. Ωστόσο, απαιτούνται θεμελιώδεις αλλαγές σχεδιασμού στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας για να έχουν ένα αποτελεσματικό SWIPT. Η αξιοπιστία λήψης και τα ποσοστά μεταφοράς πληροφοριών είναι συμβατικά και χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης του ασύρματου δίκτυα [1]. Επιπλέον, ο συμβιβασμός μεταξύ του ρυθμού των πληροφοριών και του επίπεδο της ενέργειας απορρόφησης γίνεται ένας σημαντικός παράγοντας για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος. Μόλις οι χρήστες εισέλθουν στο σύστημα εκτελείται η ΕΗ χρησιμοποιώντας σήματα RF. Στο [1], χρησιμοποιείται ένας ιδανικός δέκτης, ο οποίος έχει τη δυνατότητα εκτέλεσης Πληροφοριών Αποκωδικοποίησης (ID) και ΕΗ ταυτόχρονα. Δύο δέκτες κυκλώματος χρησιμοποιούνται στην αρχιτεκτονική του δέκτη που προτείνεται στο [10] για την εκτέλεση ΕΗ και ID χωριστά. Επιπλέον, εξετάστηκαν εφαρμογές τεχνολογιών έξυπνης κεραίας στο SWIPT MIMO και στην αναμετάδοση στο [11]. Η δυνατότητα περαιτέρω βελτιώσεων στην ενεργειακή απόδοση WPT ανοίγει με τη χρήση αυτών των έξυπνων τεχνολογιών κεραίας. Γενικότερα, στο SWIPT σύστημα δεν είναι δυνατό να πραγματοποιείται η διαδικασία ΕΗ και ID στο ίδιο λαμβανόμενο σήμα καθώς η συλλογή ενέργειας στις ραδιοσυχνότητες καταστρέφει το περιεχόμενο της πληροφορίας του σήματος. Επιπλέον, η κεραία λήψης είναι αρκετά πιθανό να μην έχει την δυνατότητα να παρέχει μία αξιόπιστη παροχή ενέργειας, λόγω της περιορισμένης συλλογής ενέργειας. Επομένως, για να ξεπεράσουμε αυτό το ζήτημα και να έχει πρακτική εφαρμογή το SWIPT θα πρέπει είτε το σήμα να χωρίζεται στα δύο είτε θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ξεχωριστές κεραίες τόσο ΕΗ όσο και ID. Για να παράγει επαρκή ισχύ για αξιόπιστες συσκευές, απαιτείται η ανάπτυξη μιας κεντρικής ή κατανεμημένης συστοιχίας κεραιών (MIMO, αναμετάδοση κ.λπ.). Παρακάτω θα περιγράψουμε κάποιες μέθοδοι SWIPT ενεργοποιημένων αρχιτεκτονικών δέκτη συμπεριλαμβανομένου: του ξεχωριστού δέκτη SR, της Εναλλαγής Χρόνου (TS), Διαχωρισμού Ισχύος PS και της



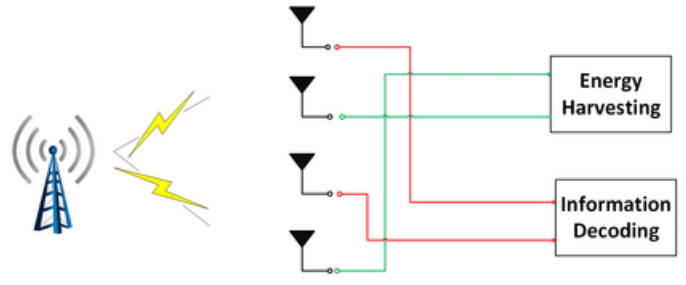
a) Separate Receiver Architecture



b) Time Switching Architecture



c) Power Splitting Architecture



d) Antenna Switching Architecture

Κεραίας Εναλλαγής (AS). Για πιο αναλυτική παρουσίαση στο [12]

1.3.1 Ξεχωριστός Δέκτης SR

Στην αρχιτεκτονική κεραίας ξεχωριστού δέκτη τα δύο ID και τα κυκλώματα EH περιλαμβάνονται ως δύο ξεχωριστούς δέκτες με ξεχωριστές κεραίες, οι οποίες εξυπηρετούνται από τον πομπό σε πολλαπλές κεραίες. Οι δύο ξεχωριστές κεραίες παρακολουθούν προφανώς ξεχωριστά κανάλια. Αυτή η αρχιτεκτονική μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα χρησιμοποιώντας εξαρτήματα off-the-rack για τους δέκτες EH και ID. Έτσι, επιτρέπει την ταυτόχρονη και ανεξάρτητη εκτέλεση και των δύο δεκτών. Τέλος, για την βελτιστοποίηση της αντιστάθμισης μεταξύ επιτεύξιμου EH και ποσοστού πληροφορίας χρησιμοποιούμε τις πληροφορίες καναλιών κατάστασης CSI και της ανάδρασης του δέκτη.

1.3.2 Δέκτης Εναλλαγής Χρόνου

Η TS αρχιτεκτονική, γνωστή και ως αρχιτεκτονική συστεγαζόμενου δέκτη, χρησιμοποιεί την ίδια κεραία για την συλλογή ενέργειας και την υποδοχή πληροφοριών. Ο δέκτης, που χρησιμοποιείται σε αυτή την αρχιτεκτονική, περιέχει ένα RF συλλέκτη ενέργειας, έναν αποκωδικοποιητή πληροφοριών και έναν διακόπτη αλλαγής του τύπου κεραίας λήψης στο σύστημα. Με βάση της TS αλληλουχίας η κεραία ή κεραίες λήψης αλλάζουν περιοδικά μεταξύ τους τα κυκλώματα ID και EH. Ο TS δέκτης απαιτεί επίσης ακριβείς πληροφορίες, προγραμματισμό ενέργειας και συγχρονισμένο χρόνο. Όταν ο δέκτης λειτουργεί ως συλλέκτης ενέργειας, η ποσότητα της ενέργειας που συλλέγεται από τον δέκτη j και λαμβάνεται από την πηγή i μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$P_{i,j} = \eta P_i h_{i,j}^2 \quad (1.1)$$

η : συντελεστής απόδοσης της διεργασίας EH

P_i : η ισχύς εκπομπής στην πηγή i

$h_{i,j}$: αντιπροσωπεύει το κέρδος καναλιού μεταξύ πηγής i και δέκτη j

Όταν ο ίδιος δέκτης αλλάζει σε ID, το ποσοστό ID μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$R_{i,j} = W \log \left(1 + \frac{P_i h_{i,j}^2}{\sigma^2} \right) \quad (1.2)$$

W : εύρος ζώνης ισχύος

σ^2 : ισχύς θορύβου

Τέλος, το σήμα μετάδοσης και η ακολουθία TS μπορούν να βελτιστοποιηθούν μαζί για διαφορετικούς στόχους σχεδιασμού με βάση τις QoS απαιτήσεις της μεταφοράς ενέργειας και των στατιστικών καναλιού.

1.3.3 Δέκτης Διαχωρισμού Ισχύος

Ο PS δέκτης διαχωρίζει το λαμβανόμενο σήμα σε δύο ροές ισχύος διαφορετικών επιπέδων ισχύος, αλλά με συγκεκριμένο λόγο PS πριν πραγματοποιηθεί η επεξεργασία του σήματος στον δέκτη. Μετέπειτα, για να καταστεί δυνατή η ταυτόχρονη ID και EH, οι δύο ροές ισχύος αποστέλλονται σε έναν αποκοδικοποιητή πληροφοριών και συλλέκτη ενέργειας. Εκτός από το κύκλωμα του δέκτη καμία άλλη αλλαγή της συμβατικής επικοινωνίας συστήματος δεν χρειάζεται να πραγματοποιηθεί στο σχεδιασμό του διαχωρισμού ισχύος. Η PS αναλογία μπορεί να βελτιστοποιηθεί σε κάθε κεραία λήψης. Επιπλέον, μεταβάλλοντας τις αναλογίες PS ο ρυθμός πληροφόρησης και η συλλεγόμενη ενέργεια μπορούν να εξισορροπηθούν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του συστήματος. Η συνολική απόδοση μπορεί να βελτιωθεί μέσα από την συνδυασμένη βελτιστοποίηση του σήματος και της αναλογίας PS. Η ποσότητα ισχύος που συλλέγεται στο PS από την πηγή i στον δέκτη j μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$P_{i,j} = \eta P_i |h_{i,j}|^2 \theta_j \quad (1.3)$$

θ : ο συντελεστής διάσπασης ισχύος για τους δέκτες

Ο μεγιστός ID ρυθμός του δέκτη j που αποκοδικοποιήθηκε από την πηγή i μπορεί να γραφτεί ως:

$$R_{i,j} = W \log \left(1 + \frac{(1 - \theta_i) P_i h_{i,j}^2}{\sigma^2 + \sigma_{sp}^2} \right) \quad (1.4)$$

σ_{sp}^2 : η ισχύς του θορύβου επεξεργασίας σήματος

Θεωρητικά, έχει αναγνωριστεί ότι η ισχύς διαχωρισμού πετυχαίνει την καλύτερη αντιστάθμιση μεταξύ του ρυθμού πληροφόρησης και της ποσότητας RF ενέργειας που μεταφέρεται

1.3.4 Κεραία Εναλλαγής Δέκτη

Η χαμηλής πολυπλοκότητας εναλλαγής κεραίας μεταξύ EH και ID χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση του SWIPT. Για παράδειγμα, ενώ ένα υποσύνολο των κεραίων στον δέκτη δουλεύουν στο ID, οι υπόλοιπες κεραίες μπορούν να λειτουργήσουν σε EH. Σε σύγκριση με τη χρονική εναλλαγή και με τον διαχωρισμό ισχύος, η εναλλαγή κεραίας είναι συγκριτικά ευκολότερη και πιο ελκυστική

για πρακτικά σχέδια αρχιτεκτονικής SWIPT. Η αρχιτεκτονική δέκτη διπλής κεραίας που προτείνεται μπορεί επίσης να υιοθετηθεί. Επιπλέον, με ένα κατάλληλο πρωτόκολλο μεταγωγής κεραίας, είναι δυνατόν να επεκταθεί αυτή η αρχιτεκτονική εύκολα για να συμπεριληφθεί μεγαλύτερος αριθμός κεραιών. Μερικές φορές η εναλλαγή κεραίας θεωρείται επίσης ως μια ξεχωριστή περίπτωση της αρχιτεκτονικής PS. Επιπλέον, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί η αρχιτεκτονική μεταγωγής κεραίας για να βελτιστοποιήσουμε μια ξεχωριστή αρχιτεκτονική δέκτη.

1.4 Ασύρματη Τροφοδοτούμενη Δικτύωση Επικοινωνίας

Ασύρματη τροφοδοτούμενη δικτύωση επικοινωνίας (WPCN) είναι ένα νέο παράδειγμα δικτύωσης όπου η μπαταρία των συσκευών ασύρματης επικοινωνίας μπορεί να αναπληρωθεί εξ' αποστάσεως μέσω των μικροκυμάτων τεχνολογίας ασύρματης μεταφοράς ενέργειας (WPT). Το WPCN εξαλείφει την ανάγκη για συχνή χειροκίνητη αντικατάσταση/επαναφόρτιση μπαταρίας, κι έτσι βελτιώνει σημαντικά σε πολλές πτυχές την απόδοση σε σχέση με τα συμβατικά δίκτυα επικοινωνίας με μπαταρία. Αυτές οι πτυχές είναι η υψηλότερη απόδοση, η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της συσκευής και η χαμηλότερη λειτουργία δικτύου κόστος. Ωστόσο, ο σχεδιασμός και η μελλοντική εφαρμογή του WPCN αμφισβητείται ουσιαστικά λόγω της χαμηλής απόδοσης WPT σε μεγάλες αποστάσεις και της σύνθετης φύσης των κοινών ασύρματων πληροφοριών και μεταφοράς ισχύος στο ίδιο δίκτυο.

Η πρόσφατη πρόοδος της τεχνολογίας της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας μικροκυμάτων (WPT) επιτρέπει την κατασκευή δικτύων επικοινωνίας με ασύρματη τροφοδοσία (WPCN), όπου τροφοδοτούνται ασύρματες συσκευές (WD) μέσω του αέρα με αποκλειστική ασύρματη τροφοδοσία πομπών για επικοινωνίες. Σε σύγκριση με συμβατικά δίκτυα που τροφοδοτούνται από μπαταρίες, το WPCN εξαλείφει την ανάγκη για χειροκίνητη αντικατάσταση/επαναφόρτιση της μπαταρίας, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του λειτουργικού κόστους και την ενίσχυση της απόδοσης της επικοινωνίας. Εκτός αυτού, ένα WPCN έχει πλήρη έλεγχο της μεταφοράς ισχύος του, όπου η μετάδοση ισχύος, οι κυματομορφές, ο κατειλημμένος χρόνος/συχνότητα, οι διαστάσεις και ούτω καθεξής είναι όλα ρυθμιζόμενα ώστε να δίνουν σταθερή παροχή ενέργειας υπό διαφορετικές φυσικές προϋποθέσεις και απαιτήσεις. Αυτό είναι μέσα σε έντονη αντίθεση με τις προσεγγίσεις με την συγκομιδή ενέργειας, όπου τα WD αξιοποιούν ευκαιριακά ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε περιβάλλον όχι αφιερωμένο στην τροφοδοσία των WD (π.χ. ηλιακή ενέργεια και μετάδοση RF περιβάλλοντος). Επειδή η διαθεσιμότητα και η ισχύ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι ως επί το πλείστον τυχαία και χρονικά μεταβαλλόμενα, η σταθερή, κατ' απαίτηση, παροχή ενέργειας στα WD συχνά δεν είναι επιτεύξιμη με μεθόδους που βασίζονται σε ΕΗ. Τα προφανή πλεονεκτήματα του WPT έναντι των μεθόδων παροχής συμβατικής ενέργειας καθιστούν το WPCN πολλά υποσχόμενο νέο πρότυπο στο σχεδιασμό και την υλοποίηση μελλοντικών συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας με σταθερά και αυτοσυντηρούμενα τροφοδοτικά ισχύς.

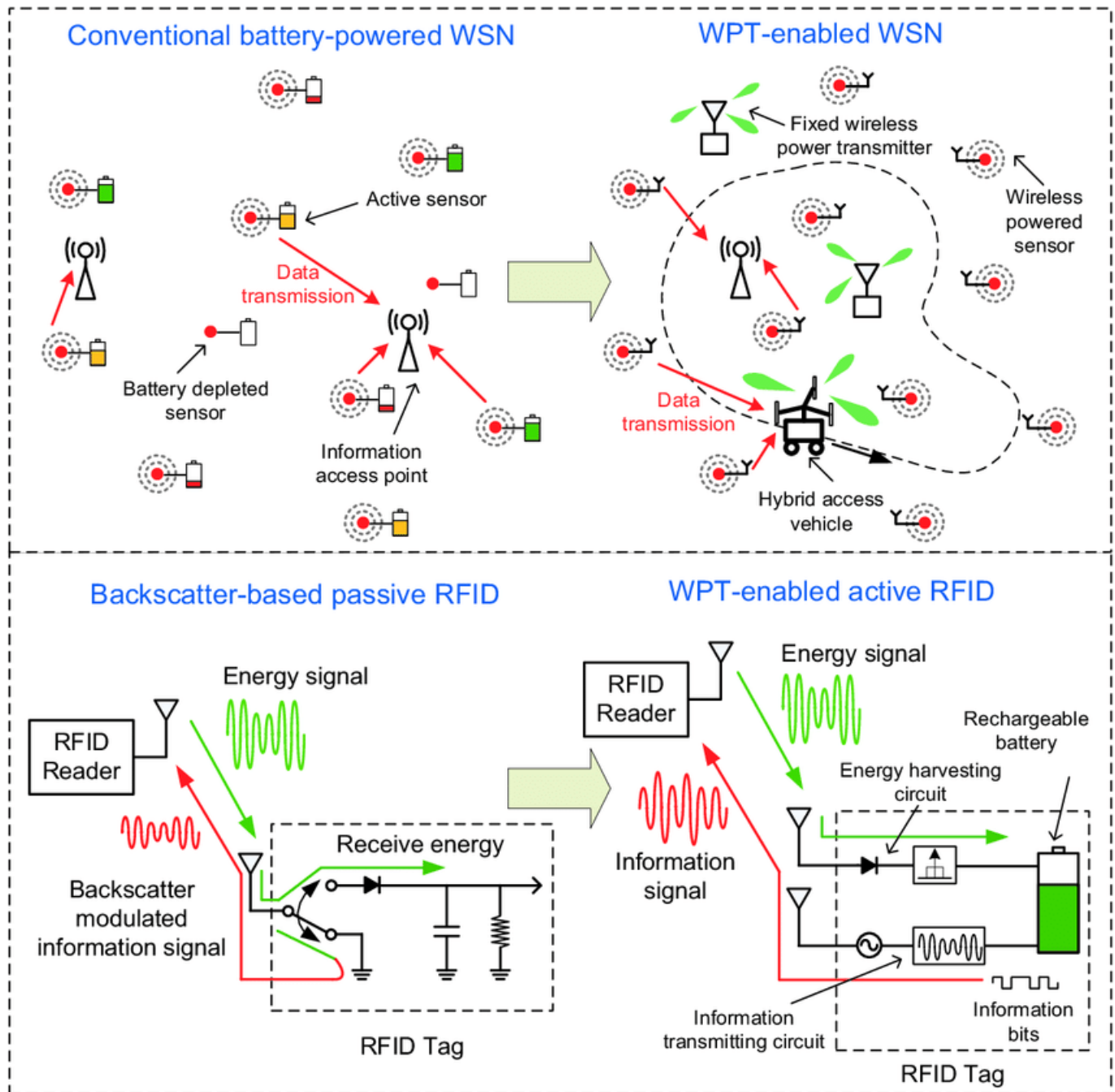
Η τρέχουσα τεχνολογία WPT μπορεί αποτελεσματικά να μεταφέρει δεκάδες μικροβάτ ισχύος RF σε WD από απόσταση μεγαλύτερη των 10 μέτρων. Ωστόσο, υπάρχουν ακόμη σημαντικά περιθώρια βελτίωσης σε μέγεθος και εύρος μέσα από τη μελλοντική πρόοδο της WPT. Αυτό καθιστά ένα WPCN δυνητικά κατάλληλο για μια ποικιλία εφαρμογών χαμηλής κατανάλωσης με ισχύ λειτουργίας της συσκευής της τάξης των αρκετά milliwatts, όπως είναι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN)

και τα δίκτυα αναγνώρισης RF (RFID). Από εμπορική σκοπιά, οι αισθητήρες με δυνατότητα WPT και οι ετικέτες RFID είναι ήδη στην αγορά. Στο μέλλον, η εκτεταμένη εφαρμογή συσκευών με δυνατότητα WPT ενδέχεται να αναδιαμορφώσει θεμελιωδώς το τοπίο των αντίστοιχων βιομηχανικών κλάδων, όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) και επικοινωνίες μηχανής-με-μηχανή (M2M). Όπως απεικονίζεται στο 1.4, χωρίς να χρειάζεται να αντικαταστήσουμε αισθητήρες με εξάντληση ενέργειας σε συμβατικά WSN, ένα WSN με δυνατότητα WPT μπορεί να επιτύχει αδιάκοπη λειτουργία με τεράστιο αριθμό αισθητήρων που τροφοδοτούνται από σταθερούς πομπούς ενέργειας και/ή από όχημα που κινείται σε προγραμματισμένη διαδρομή, το οποίο χρησιμοποιείται τόσο για την ασύρματη φόρτιση όσο και για την συλλογή δεδομένων. Εκτός αυτού, χάρη στην άφθονη παροχή ρεύματος από το WPT, οι συσκευές RFID μπορούν πλέον να έχουν πολλή μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και τη δυνατότητα μετάδοσης με ενεργό τρόπο με πολύ μεγαλύτερο ρυθμό δεδομένων και από μεγαλύτερη απόσταση από τις συμβατικές, οι οποίες βασίζονται στην οπισθοσκέδαση, RFID επικοινωνίες.

Παρά την μεγάλη δυνατότητα βελτίωσης της απόδοσης που προέρχεται από το WPCN, η αποτελεσματική κατασκευή των WPCN είναι ένα δύσκολο πρόβλημα στην πράξη. Από τη μία πλευρά, το επίπεδο ενέργειας που λαμβάνεται μπορεί να είναι πολύ χαμηλό σε WDs που βρίσκονται μακριά από τους πομπούς της ενέργειας, λόγω της σημαντικής εξασθένησης στην ισχύ μικροκυμάτων που παραιτείται σε μακρινή απόσταση. Αυτή η ενέργεια μπορεί να προκαλέσει σοβαρή απώλεια απόδοσης μεταξύ των WD σε διαφορετικές τοποθεσίες. Από την άλλη, η κοινή σχεδίαση ασύρματων απαιτούνται μεταδόσεις ενέργειας και πληροφοριών σε ένα WPCN. Πρώτον, η ασύρματη ενέργεια και οι μεταδόσεις πληροφορίας σχετίζονται συχνά (π.χ. ένα WD χρειάζεται να συλλέξει αρκετή ενέργεια μέσω WPT πριν από τη μετάδοση δεδομένων). Δεύτερον, η ενέργεια μεταφοράς μπορεί να μοιράζεται κοινό φάσμα με το κανάλι επικοινωνίας, το οποίο μπορεί να προκαλέσει παρεμβολή συν-καναλιού σε ταυτόχρονες μεταδόσεις πληροφορίας. Για τους παραπάνω λόγους, πρέπει να επινοηθούν νέες τεχνικές μετάδοσης σε φυσικό επίπεδο καθώς και πρωτόκολλα δικτύωσης για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των WPCN. Για πιο αναλυτική παρουσίαση του WPCN στο [13].

1.5 Δομή

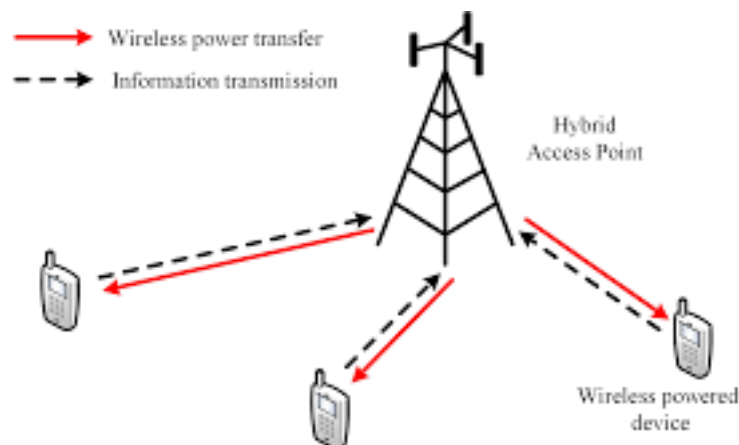
Η παρούσα διατριβή εκτός από την εισαγωγή σε κάποιες βασικές έννοιες των ασύρματων τηλεπικοινωνιών, όπως είναι το η RF-EH, WPT, SWIPT και η WPCN, ακολουθεί την παρακάτω δομή. Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το μοντέλο συστήματος πάνω στο οποίο μελετάμε την βέλτιστη κατανομή πόρων για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας. Στο κεφάλαιο 3, διαμορφώνουμε το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της συνολικής ισχύς μεταφοράς για τον έναν χρήστη του συστήματος και στην συνέχεια μετατρέπουμε το non-convex πρόβλημα, που προέκυψε, σε convex. Τέλος, στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα που βγάλαμε κατά τις προσομοιώσεις στις οποίες συγκρίνεται η ισχύς μεταφοράς ως προς την ποιότητα επικοινωνίας και ως προς την κυκλωματική κατανάλωση ισχύος για δύο και τρεις χρήστες.

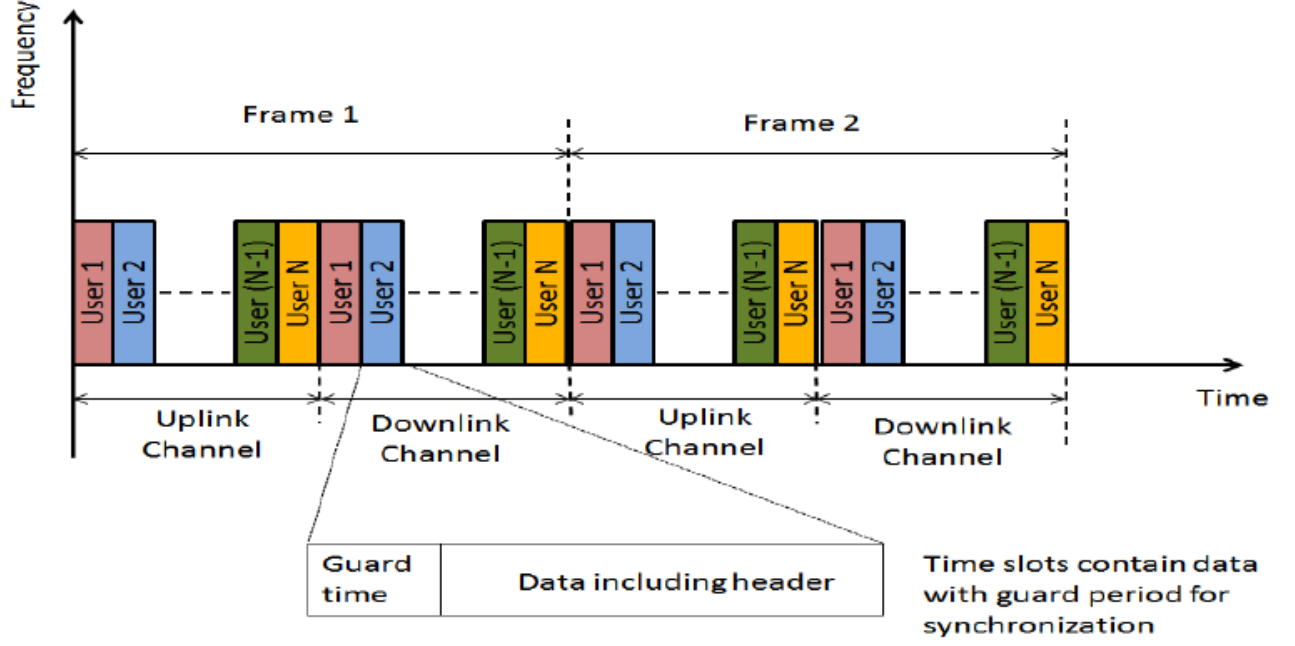


Κεφάλαιο 2

Μοντέλο Συστήματος

Έχουμε ένα Ασύρματο Δίκτυο επικοινωνίας (WPCN) το οποίο αποτελείται από K αριθμό Συσκευών Μηδενικής Ενέργειας (ZED). Οι ZEDs έχουν από μία κεραία και μία κοινόχρηση ζώνη συχνοτήτων. Πέρα από τις ZED, το δίκτυο συσκευών μηδενικής ενέργειας (ZEDN) περιέχει ένα BS, το οποίο λειτουργεί ως φάρος ισχύος. Στο 2 αποτυπώνεται το ZEDN. Το σήμα θα πρέπει είτε να χωριστεί στα δύο είτε να χρησιμοποιήσουμε δύο κεραίες καθώς, όπως είδαμε στο SWIPT, στο σήμα η ΕΗ καταστρέφει το περιεχόμενο της πληροφορίας. Επιλέγουμε να χωρίσουμε το σήμα στα δύο. Ένα για την ασύρματη μεταφορά ισχύος κάτω ζεύξης και ένα για να λαμβάνει την μεταφορά πληροφορίας άνω ζεύξης από τους χρήστες. Η κάθε ZED συσκευή δεν έχει κάποια άλλη πηγή ενέργειας πέρα από αυτή που μεταφέρεται στον χρήστη, ούτε κάποια μπαταρία αποθήκευσης της λαμβανόμενης ισχύος. Έτσι, θα χρησιμοποιήσουμε το πρωτόκολλο επικοινωνίας "harvest and then transmit", όπου ο κάθε χρήστης πρώτα λαμβάνει ισχύ από το BS για να μπορέσει να λάβει ενέργεια η συσκευή και να λειτουργήσει και στην συνέχεια να μεταφέρει δεδομένα μέσω του καναλιού επικοινωνίας άνω ζεύξης. Θεωρούμε ότι ο μηχανισμός επαναφόρτισης της κάθε ZED έχει απεριόριστη χωρητικότητα αποθήκευσης και διαμορφώνεται ως μία ουρά ενέργειας[14]. Για την επικοινωνία των συσκευών με τον φάρο ισχύος θα χρησιμοποιήσουμε την ψηφιακή διαμόρφωση πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης χρόνου(TDMA). Στο [15] συγκρίνεται η τεχνολογία TDMA με την NOMA όσον αφορά την ενεργειακή αποδοτικότητα των ασύρματων δικτύων. Ενώ, στο [16] μελετάτε η βελτιστοποίηση των ενεργειακών πόρων ενός ZEDN με τεχνολογία ALOHA. Στην TDMA ο συνολικός χρόνος επικοινωνίας χωρίζεται σε k θέσεις χρόνου οι οποίες έχουν διάρκεια περιόδου T . Κάθε θέση χρόνου





αντιστοιχεί στον καθένα χρήστη και χωρίζεται σε δύο ξεχωριστές φάσεις. Μία φάση συλλογής ισχύος και μία μεταφοράς πληροφορίας. Έτσι, η διάρκεια χρόνου της πρώτης φάσης είναι ίση με

$$t = (1 - t_0) T$$

και της δεύτερης φάσης από τον εναπομείναντα χρόνο:

$$T - t = T - (1 - t_0) T = t_0 \cdot T$$

t_0 : η παράμετρος χρονομερισμού και οι τιμές του είναι στο διάστημα $[0, 1]$

Θα προχωρήσουμε τώρα στην ανάλυση της κάθε φάσης χρόνου.

Η μέση τιμή ισχύος, που λαμβάνεται από τον κάθε χρήστη στην ουρά ενέργειας, την ορίζουμε ως την $P_{har,k}$. Για την απλότητα των πράξεων και χωρίς απώλεια γενικότητας θεωρούμε ότι στην τιμή $P_{har,k}$ συμπεριλαμβάνονται τόσο η λαμβανόμενη ισχύ της k συσκευής όσο και οι απώλειες ισχύος που πραγματοποιούνται από την λειτουργία των ZED κατά την φάση συλλογής. Η ισχύς μπορεί να υπολογιστεί από οποιοδήποτε μοντέλο συλλογής είτε αυτό είναι γραμμικό είτε όχι [17]. Η ισχύς που μεταδίδεται από τους χρήστες είναι πολύ μικρότερη από την ισχύ εκπομπής του BS κι έτσι θεωρούμε αμελητέα την ισχύ παρεμβολών.

Επομένως, η μέση λαμβανόμενη ενέργεια για τον χρήστη k είναι ίση με:

$$E_{har,k} = P_{har,k} \cdot t \quad \forall k \in 1, 2, \dots, K$$

$$t = (1 - t_0) T$$

$$\Rightarrow E_{har,k} = T (1 - t_0) P_{har,k} \quad (2.1)$$

Για την φάση μεταφοράς δεδομένων χρησιμοποιείται για την επικοινωνία το πρωτόκολλο SA και ο χρόνος είναι ίσος με t_0T . Θεωρούμε t_k ως τον χρόνο μεταφοράς, δηλαδή τον χρόνο κατά τον οποίο το κάθε ZED θα μεταφέρει τα δεδομένα κατά την φάση μεταφοράς και P_k είναι η ισχύς μεταφοράς του k-th ZED. Πέρα από την ισχύ μεταφοράς, κάθε συσκευή χρειάζεται επιπλέον την ισχύ σταθερού κυκλώματος $P_{c,k}$ για την λειτουργία της. Η ισχύς σταθερού κυκλώματος καταναλώνεται στα διάφορα εξαρτήματα της συσκευής, όπως είναι το φίλτρο μετάδοσης, ο μίκτης, το συνθεσάιζερ συχνότητας, κλπ και έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η συνολική ισχύς που χρησιμοποιείται για την μεταφορά πληροφοριών. Επομένως, η συνολική ισχύς που καταναλώνεται θα είναι:

$$P_{ol} = P_k + P_{c,k}$$

και η μέση ενέργεια ποσοστού αναχώρησης από την ουρά ενέργειας θα είναι:

$$E_{con,k} = Tt_0 \cdot P_{ol}t_k$$

Άρα

$$E_{con,k} = Tt_0 (P_k + P_{c,k}) t_k \quad (2.2)$$

Στο κανάλι επικοινωνίας άνω ζεύξης ανάμεσα στα ZEDs και στον φάρο ισχύος BS θεωρείται ότι είναι οιονειστατικό και οι στιγμιαίες του τιμές ακολουθούν μία κατανομή Rayleigh. Έχοντας αυτό υπόψη και με βάση την ανάλυση στο [18] η μέση απόδοση του κάθε ZED είναι

$$\bar{R}_k = Tt_0 e^{-\frac{(2^{\bar{R}_k} - 1) N_0}{L_k P_k}} t_k \quad (2.3)$$

όπου

$t_0 R_k$ (bps/Hz): ο σταθερός ρυθμός μετάδοσης της k-ιστής ZED.

N_0 : η φασματική πυκνότητα του πρόσθετου λευκού Gaussian θορύβου

L_k : η απώλεια διαδρομής του k-ιστής ZED και το BS. Θεωτούμε το $L_k=1$ για ευκολία των πράξεων

t_k : ο χρόνος μετάδοσης δεδομένων του κάθε χρήστη Στο [18] αναλύεται το δυναμικό-TDMA στο WPCN.

Κεφάλαιο 3

Βέλτιστη κατανομή πόρων για ελαχιστοποίηση της ενέργειας

3.1 Διαμόρφωση προβλήματος ελαχιστοποίησης

Ο στοχός της ανάλυσης μας είναι να ελαχιστοποιήσουμε την μέση κατανάλωση ενέργειας των χρηστών, ενώ ικανοποιούνται οι QoS απαιτήσεις για την ομαλή λειτουργία των ZED. Στο δικό μας μοντέλο συστήματος η κάθε ZED λειτουργεί χρησιμοποιώντας μόνο την λαμβανόμενη ισχύ που μεταφέρεται, ασύρματα, από τον φάρο ισχύος. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι ένα δίκτυο WPT μπορεί να παρέχει μόνο περιορισμένη ποσότητα ενέργεια στις ZEDs κι έτσι είναι απαραίτητο να σχεδιάσουμε ενεργειακά αποδοτικά συστήματα. Το διαμορφωμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης για την κατανομή πόρων εξετάζεται για μία χρονική θυρίδα. Όμως, το πρόβλημα βελτιστοποίησης δεν θα το επιλύσουμε θυρίδα ανα θυρίδα καθώς δεν είναι απαραίτητο και θα ήταν αρκετά χρονοβόρα η ανάλυση του προβλήματος. Επομένως, θα μελετήσουμε την μεση απόδοση των ZEDs, όπου το BS υποθέτει μόνο τις γνωστές στατιστικές ιδιότητες του καναλιού, ανεξάρτητα από την μικρή κλίμακα εξασθένισης του συστήματος. Η μόνη απαραίτητη παράμετρος για την επίλυση του προβλήματος είναι η μεγάλης κλίμακας εξασθένιση. Εφόσον, η κάθε ZED έχει χαμηλή αν όχι καθόλου κινητικότητα η επίδραση της μεγάλης κλίμακας εξασθένισης μπορούμε να θεωρήσουμε ότι μένει σταθερή για διάρκεια μεγαλύτερη από πολλές χρονοθυρίδες. Τέλος, θεωρούμε ότι η $P_{har,k}$ είναι γνωστή και ότι η περίοδος $T=1$. Η συνολική μέση ενέργεια που καταναλώνεται στο σύστημα ισοδυναμεί με το σύνολο της μέσης ενέργειας που συλλέγεται σε κάθε ZED:

$$E_{syst} = \sum_{k=1}^K E_{har,k}$$
$$(2.1) \Rightarrow E_{syst} = \sum_{k=1}^K P_{har,k} (1 - t_0) T$$

Επομένως, για το πρόβλημα βελτιστοποίησης αρκεί να ελαχιστοποιήσουμε την μέση ενέργεια που καταναλώνεται σε κάθε ZED.

$$\begin{aligned} \min \sum_{k=1}^K E_{har,k} \\ \Rightarrow \min \sum_{k=1}^K P_{har,k} (1 - \tau_0) T \end{aligned}$$

Όπου το $P_{har,k}$ είναι γνωστό και το $T=1$ άρα η μόνη μεταβλητή που έχουμε είναι η παράμετρος χρονομερισμού από την $E_{syst} t_0$

Αρκεί τώρα να διαμορφώσουμε τους περιορισμούς του προβλήματος. Όπως προαναφέραμε, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι QoS απαιτήσεις των ZED. Χαρακτηρίζουμε την απαίτηση QoS ως τον ελάχιστο μέσο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων R_{th} . Έτσι, θα πρέπει ο μέσος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων όλων των συσκευών θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος ή ίσος από το R_{th} .

$$\begin{aligned} C1 : \bar{R}_k &\geq R_{th,k} \\ \Rightarrow T t_0 e^{-\frac{(2^R - 1) N_0}{L_k P_k}} t_k &\geq R_{th,k} \end{aligned}$$

Επιπλέον, ο κύκλος εργασιών των ZED μπορεί να προκαλέσουν διακυμάνσεις στην ενέργεια που συλλέγεται κατά τη διάρκεια μιας χρονικής θυρίδας κι έτσι η ενέργεια που συλλέγεται κατά την διάρκεια προηγούμενων χρονοθυρίδων μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη φάση μετάδοσης των μελλοντικών. Για να διασφαλιστεί, λοιπόν, ότι η ουρά ενέργειας είναι σταθερή θα πρέπει ο μέσος ρυθμός αναχώρησης ενέργειας να είναι μικρότερος ή ίσος με τον μέσο ρυθμο της λαμβανόμενης ενέργειας. Δηλαδή:

$$\begin{aligned} E_{con} &\leq E_{har,k} \\ \Rightarrow T t_0 \cdot P_{ol} t_k &\leq T (1 - t_0) P_{har,k} \end{aligned}$$

Άρα ο δεύτερος περιορισμός διαμορφώνεται ως:

$$C2 : T t_0 (P_k + P_{c,k}) t_k \leq T (1 - t_0) P_{har,k} \quad (3.1)$$

Τέλος, ο τελευταίος περιορισμός μας διαμορφώνεται από το διαστημα τιμών της παραμετρου χρονομερισμού και του χρόνου μετάδοσης δεδομένων του κάθε χρήστη.

Άρα:

$$C3 : 0 \leq t_0 \leq 1, \quad 0 \leq t_k \leq 1 \quad (3.2)$$

Επομένως, το πρόβλημα ελαχιστοποίησης διαμορφώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \min_{t_k, R, P, t_0} \sum_{k=1}^K P_{har,k} (1 - t_0) \\ \text{s.t } C1 : \bar{R}_k &\geq R_{th,k}, \\ C2 : \tau_0 (P_k + P_{c,k}) t_k &\leq (1 - \tau_0) P_{har,k}, \\ C3 : 0 \leq t_0 \leq 1, \quad 0 \leq t_k &\leq 1. \end{aligned} \quad (4)$$

3.2 Μετατροπή από non-convex σε convex πρόβλημα

Προηγουμένως διαμορφώσαμε το ενεργειακό πρόβλημα ελαχιστοποιήσεις που πρέπει να επιλύσουμε το οποίο είναι το παρακάτω:

$$\begin{aligned} & \min_{t_k, R, P, t_0} \sum_{k=1}^k P_{har,k} (1 - t_0) \\ & C_1 : R_k e^{-\frac{(2^{R_k} - 1) N_0}{L_k P_k}} T t_0 t_k \geq R_{th,k} \\ & C_2 : t_0 (P_k + P_{c,k}) t_k \leq (1 - t_0) P_{har,k} \\ & C_3 : 0 \leq t_0 \leq 1, 0 \leq t_k \leq 1 \end{aligned}$$

Ωστόσο, πριν προχωρήσουμε την αναλύσή του προβλήματος θα πρέπει να εξετάσουμε αν οι περιορισμοί C1, C2, C3 είναι convex.

Όσον αφορά τον περιορισμό C3 καταλαβαίνουμε χωρίς πράξεις ότι είναι convex καθώς και στις δύο ανισότητες έχουμε τα t_0, t_k τα οποία είναι πολυονομικές συναρτήσεις και αποτελούν εξ' ορισμού κυρτές. Όσον αφορά τους περιορισμούς C1, C2 θα πρέπει να λογαριθμίσουμε και τα δύο μέρη των ανισοτήτων για να τα εμφανίσουμε σε πολυονομική και σε λογαριθμική μορφή. Να σημειώσουμε, επίσης, ότι όταν λογαριθμίζουμε δεν αλλάζει η φορά των ανισοτήτων. Ξεκινάμε, λοιπόν, με την C1

$$\log R_k e^{-\frac{(2^{R_k} - 1) N_0}{L_k P_k}} T t_0 t_k \geq R_{th,k} \quad (3.3)$$

$$\log R_k - \frac{(2^{R_k} - 1) N_0}{L_k P_k} + \log T + \log t_0 + \log t_k \geq \log R_{th,k} \quad (3.4)$$

Στην συνέχεια πολλαπλασιάζουμε με (-1) και μεταφέρουμε τα πάντα από την αριστερή πλευρά

$$\frac{(2^{R_k} - 1) N_0}{L_k P_k} - \log R_k - \log T - \log t_0 - \log t_k + \log R_{th,k} \leq 0$$

Τώρα που έχουμε χωρίσει την κάθε μεταβλητή θα τις εξετάσουμε ξεχωριστά.

Οι λογαριθμικές συναρτήσεις $-\log R_k, -\log t_0, -\log t_k$ είναι convex αφού από την θεωρία ότι οι συναρτήσεις της μορφής $-\log x$ με ανισότητα ≤ 0 είναι εξ' ορισμού convex. Οι $\log T, \log R_{th,k}$ είναι σταθερά πολυώνυμα και εξ' ορισμού είναι convex συναρτήσεις. Η συνάρτηση $\frac{(2^{R_k} - 1) N_0}{-L_k P_k}$ έχει δύο μεταβλητές άρα θα χρησιμοποιήσω τον Εισιανό πίνακα. Το γινόμενο $\frac{N_0}{P_k}$ το αφαιρούμε καθώς είναι σταθερά και δεν επηρεάζει με κάποιο τρόπο την κυρτότητα της συνάρτησης.

$$\text{Θέτω } f(x,y) = \frac{(2^x - 1)}{y}$$

Ο εσσιανός πίνακας έχει την μορφή:

$$Hf = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \end{bmatrix}$$

Επομένως για να βρω τις τιμές του εσσιανού πίνακα θα πρέπει να βρω της παραγώγους της συνάρτησης $f(x,y)$.

Για την Hf_1 θα πρέπει να παραγωγίσω δύο φορές ως προς x .

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x} = \frac{x 2^{x-1}}{y} \quad (3.5)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{2^{x-1}}{y} + \frac{(x^2 - x) 2^{(x-1)}}{y} \quad (3.6)$$

$$\text{Άρα} \quad (3.7)$$

$$Hf_1 = \frac{2^{x-1}}{y} (1 + x^2 - x) \quad (3.8)$$

Αντίστοιχα, για την Hf_4 θα πρέπει να παραγωγίσω δύο φορές ως προς y .

$$\frac{\partial^2 f}{\partial y} = \frac{2^x - 1}{-y^2} \quad (3.9)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = \frac{2 2^x - 2}{y^3} \quad (3.10)$$

$$\Rightarrow Hf_4 = \frac{2 2^x - 2}{y^3} \quad (3.11)$$

Τέλος, για να βρω τις θέσεις 2 και 3 του Εσσιαννού πίνακα παραγωγίζω ως προς x και ως προς y την συνάρτηση $f(x,y)$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{x 2^{x-1}}{y} \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = \frac{-x 2^{x-1}}{y^2} \quad (3.13)$$

$$Hf_2 = \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \text{ και } Hf_3 = \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x} \quad (3.14)$$

$$\Rightarrow Hf_2 = Hf_3 = \frac{-x 2^{x-1}}{y^2} \quad (3.15)$$

Από τις 1.13, 1.16 και 1.20 ο Εσσιαννός Πίνακας είναι:

$$Hf = \begin{bmatrix} \frac{2^{x-1}}{y} (1 + x^2 - x) & \frac{-x 2^{x-1}}{y^2} \\ \frac{-x 2^{x-1}}{y^2} & \frac{2 2^x - 2}{y^3} \end{bmatrix}$$

Για να είναι η συνάρτηση convex θα πρέπει να έχει ημιθετική διακρίνουσα του εσσιαννού πίνακα

$$\begin{aligned} |Hf| &= Hf_1 \cdot Hf_2 - Hf_3 \cdot Hf_4 \\ \Rightarrow |Hf| &= \frac{2^{x-1}}{y} (1 + x^2 - x) \cdot \frac{2 2^x - 2}{y^3} - \frac{-x^2 2^{2x-1}}{4y^4} = \\ &= \frac{2^x}{y^4} \left[2^x + x^2 2^x - x 2^x - 1 - x^2 + x - \frac{x^2 2^x}{4} \right] = \\ &= -\frac{2^x}{y^4} (-x 2^x + 2^x - x^2 + x - 1) = \\ &= -\frac{2^x}{y^4} \left[2^x (x - 1) + \left(x - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} \right] \end{aligned}$$

$$\text{Θέτω } g(x) = 2^x (x - 1) + \left(x - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} \quad (3.16)$$

$$-\frac{2^x}{y^4} < 0 \nabla y \neq 0 \text{ και } \nabla x \quad (3.17)$$

Άρα η συνάρτηση $g(x)$ θα πρέπει να είναι μικρότερη του μηδενός. Παίρνω την πρώτη και δεύτερη παράγωγο της $g(x)$

$$\begin{aligned} g'(x) &= \frac{dg}{dx} = 2^x + x 2^{x-1} (x - 1) + 2x - 1 \\ &= \frac{2^x}{2} (x^2 - x + 2) + 2x - 1 \geq 0 \forall x \\ \text{όπου } \frac{dg}{dx} &= 0 \text{ για } x = 0 \\ g''(x) &= 2^{x-2} (x^3 - x^2 + 6x - 2) + 2 \end{aligned}$$

$g''(x) > 0 \nabla x \rightarrow$ η πρώτη παράγωγος $g'(x)$ είναι αύξουσα

$g'(0) = 0 \rightarrow$ η $g'(x) > 0 \nabla x > 0$ και $g'(x) < 0 \nabla x < 0$

Άρα για η $g(x)$ θα είναι φθίνουσα και αύξουσα στα αντίστοιχα διαστήματα

$$g(-0.242) = g(0.668) = 0$$

Άρα η $g(x) < 0$ στο διάστημα $[-0.242, 0.668]$ και θετική για τα υπόλοιπα x . Επομένως η $g(x) > 0$ αλλάζει πρόσημο και δεν είναι συνολικά αρνητική. Σε συνδιασμό με την 3.21 συμπεραίνουμε ότι η διακρίνουσα του $H_f < 0$. Άρα η C1 δεν είναι κυρτή

Αντίστοιχα, θα μελετήσουμε και την ανισότητα C2. Αρχικά θα λογαριθμήσουμε και τα δύο μέρη και στην συνέχεια θα τα μεταφέρουμε όλα από την αριστερή πλευρά της ανισότητας

$$C2 : t_0 (P_k + P_c) t_k \leq (1 - t_0) P_{ha,k} \quad (3.18)$$

$$\Rightarrow \log t_0 + \log (P_k + P_c) + \log t_k \leq \log (1 - t_0) + \log P_{ha,k} \quad (3.19)$$

$$\Rightarrow \log t_0 + \log (P_k + P_c) + \log t_k - \log (1 - t_0) - \log P_{ha,k} \leq 0 \quad (3.20)$$

$\log P_{ha,k}$ είναι εξ ορίσμού convex καθώς αποτελεί σταθερό πολυώνυμο

Για τις λογαριθμικές συναρτήσεις θα εξετάσω το πρόσημο των παραγώγων τους

$$\begin{aligned} \frac{-\partial \log (1-x)}{\partial x} &= -\frac{1}{1-x} \\ \frac{-\partial^2 \log (1-x)}{\partial x^2} &= \frac{1}{(x-1)^2} > 0 \end{aligned}$$

η δεύτερη παράγωγος είναι θετική $\nabla t_0 < 1$

Άρα $-\log (1-t_0) \rightarrow$ κυρτή

$$\frac{\partial^2 \log x}{\partial x^2} = -\frac{1}{x^2} < 0$$

Άρα $\log t_0, \log P_k + P_c, \log t_k \rightarrow$ non-convex

Η παραπάνω μελέτη των περιορισμών C1, C2 μας έδειξε ότι δεν είναι convex. Για να μπορέσουμε να ξεπεράσουμε το convex πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε θα θέσουμε λίγο διαφορετικές μεταβλητές ώστε οι non-convex λογαριθμικές συναρτήσεις να μετατραπούν είτε σε πολυώνυμα είτε σε λογαριθμικές συναρτήσεις με θετική δεύτερη παράγωγο. Αφού πραγματοποιήσουμε τις μετατροπές θα ξαναεξετάσουμε τις C1, C2 στην νέα τους μορφή.

$$e^{\tilde{R}} = 2^{R_k} - 1 \Rightarrow R_k = \log_2 e^{\tilde{R}} + 1 \quad (3.21)$$

$$e^{\tilde{P}} = P_k \quad (3.22)$$

$$e^{\tilde{t}_0} = t_0 \quad (3.23)$$

$$e^{\tilde{t}} = t_k \quad (3.24)$$

Αντικαθιστώντας τις μεταβλητές οι C1, C2 γίνονται αντίστοιχα:

$$C1 : e^{\tilde{R}-\tilde{P}} \frac{N_0}{L_k} - \log \left[\log_2 (e^{\tilde{R}} + 1) \right] - \tilde{t}_0 - \tilde{t} + \log R_{th,k} - \log T \leq 0 \quad (3.25)$$

$$C2 : \log (e^{\tilde{P}} + P_c) - \log (1 - e^{\tilde{t}_0}) + \tilde{t} - \log P_{ha,k} \leq 0 \quad (3.26)$$

Για την C1 έχουμε:

$-\tilde{t}_0, -\tilde{t}$ πολυώνυμα της μορφής $a_x \cdot x_1$

$\log R_{th,k} - \log T$ σταθερό πολυώνυμο

$-\log \left[\log_2 (e^{\tilde{R}} + 1) \right]$ είναι αρνητική λογαριθμική συνάρτηση με ανισότητα ≤ 0

Όλες οι παραπάνω είναι γραμμικές affine. Άρα για να είναι η C1 convex αρκεί να εξετάσουμε το πρόσημο της διακρίνουσας του Εισιανού Πίνακα του πρώτου όρου της C1

$$\begin{aligned} \text{Θέτω } f(x, y) &= e^{\tilde{x}-\tilde{y}} \\ H_f &= \begin{bmatrix} e^{x-y} & -e^{x-y} \\ -e^{x-y} & e^{x-y} \end{bmatrix} \\ |H_f| &= e^{2x-2y} - e^{2x-2y} = 0 \implies \text{κυρτή} \\ \text{Άρα } e^{\tilde{R}-\tilde{P}} \frac{N_0}{L_k} &\implies \text{convex} \end{aligned}$$

Άρα η C1 είναι convex. Για την C2 αρκεί να εξετάσουμε τον πρώτο όρο της καθώς:

$$\begin{aligned} \tilde{t}, \tilde{t}_0 &\text{ πολυώνυμα της μορφής } a_x \\ -\log P_{har,k} &\text{ σταθερό πολυώνυμο} \\ -\log(1 - e^{\tilde{t}_0}) &\text{ είναι αρνητική λογαριθμική συνάρτηση με ανισότητα } \leq 0 \\ \text{Οπότε θέτω } f(x) &= \log(e^x + b) \\ \frac{\partial f}{\partial x} &= \frac{e^x}{e^x + b} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} &= \frac{b}{e^x + b} > 0 \quad \forall x \implies \log(e^{\tilde{P}} + P_c) \text{ convex} \end{aligned}$$

Άρα οι C1, C2 όπως εμφανίζονται στις σχέσεις 3.29 και 3.30 είναι convex. Επομένως, το πρόβλημα ελαχιστοποίησης για την βελτιστοποίηση της ενέργειας είναι το παρακάτω:

$$\begin{aligned} \min_{t_k, R, P, t_0} & \sum_1^k P_{har,k} (1 - t_0) \\ C_1 : & e^{\tilde{R}-\tilde{P}} \frac{N_0}{L_k} - \log \left[\log_2(e^{\tilde{R}} + 1) \right] - \tilde{t}_0 - \tilde{t} + \log R_{th,k} - \log T \leq 0 \\ C_2 : & \log(e^{\tilde{P}} + P_c) - \log(1 - e^{\tilde{t}_0}) + \tilde{t} - \log P_{har,k} \leq 0 \\ C_3 : & \tilde{t}_0 \leq 0, \tilde{t}_k \leq 0 \end{aligned}$$

Αφού

$$\begin{aligned} 0 \leq t_0 \leq 1 &\implies 0 \leq e^{\tilde{t}_0} \leq 1 \\ &\implies \log 0 \leq \tilde{t}_0 \leq \log 1 \implies \tilde{t}_0 \leq 0 \end{aligned}$$

Αντίστοιχα βγαίνει και το διάστημα τιμών για το \tilde{t}_k

Στην 3.3 έχουμε τον όρο $\sum_{k=1}^K P_{har,k} (1 - t_0)$ όπου η μοναδική μεταβλητή είναι το t_0 καθώς το $P_{har,k}$ είναι γνωστό και σταθερό. Επομένως, μπορούμε, χωρίς απώλεια της γενικότητας, να αντικαταστήσουμε το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της ενέργειας συλλογής σε πρόβλημα μεγιστοποίησης

του χρόνου που χρειάζεται για να συλλεχθεί η ενέργεια σε κάθε ZED. Άρα το πρόβλημα ισούται με:

$$\begin{aligned} & \max_{t_k, \bar{R}, P, t_0} t_0 \\ & \text{s.t } C_1 : \bar{R}_k \geq R_{th,k}, \\ & C_2 : \tau_0 (P_k + P_{c,k}) t_k \leq (1 - \tau_0) P_{har,k}, \\ & C_3 : 0 \leq t_0 \leq 1, \quad 0 \leq t_k \leq 1 \end{aligned}$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις αντικαταστάσεις και την ανάλυση που κάναμε στο προηγούμενη ενότητα το πρόβλημα μεγιστοποίησης θα ισούται με:

$$\begin{aligned} & \max_{\tilde{t}_k, \tilde{R}, \tilde{P}, \tilde{t}_0} \tilde{t}_0 \\ & C_1 : e^{\tilde{R} - \tilde{P} \frac{N_0}{L_k}} - \log \left[\log_2 \left(e^{\tilde{R}} + 1 \right) \right] - \tilde{t}_0 - \tilde{t}_k + \log R_{th,k} - \log T \leq 0 \\ & C_2 : \log \left(e^{\tilde{P}} + P_c \right) - \log \left(1 - e^{\tilde{t}_0} \right) + \tilde{t} - \log P_{har,k} \leq 0 \\ & C_3 : \tilde{t}_0 \leq 0 \quad \tilde{t}_k \leq 0 \end{aligned}$$

Κεφάλαιο 4

Αποτελέσματα και Συζήτηση

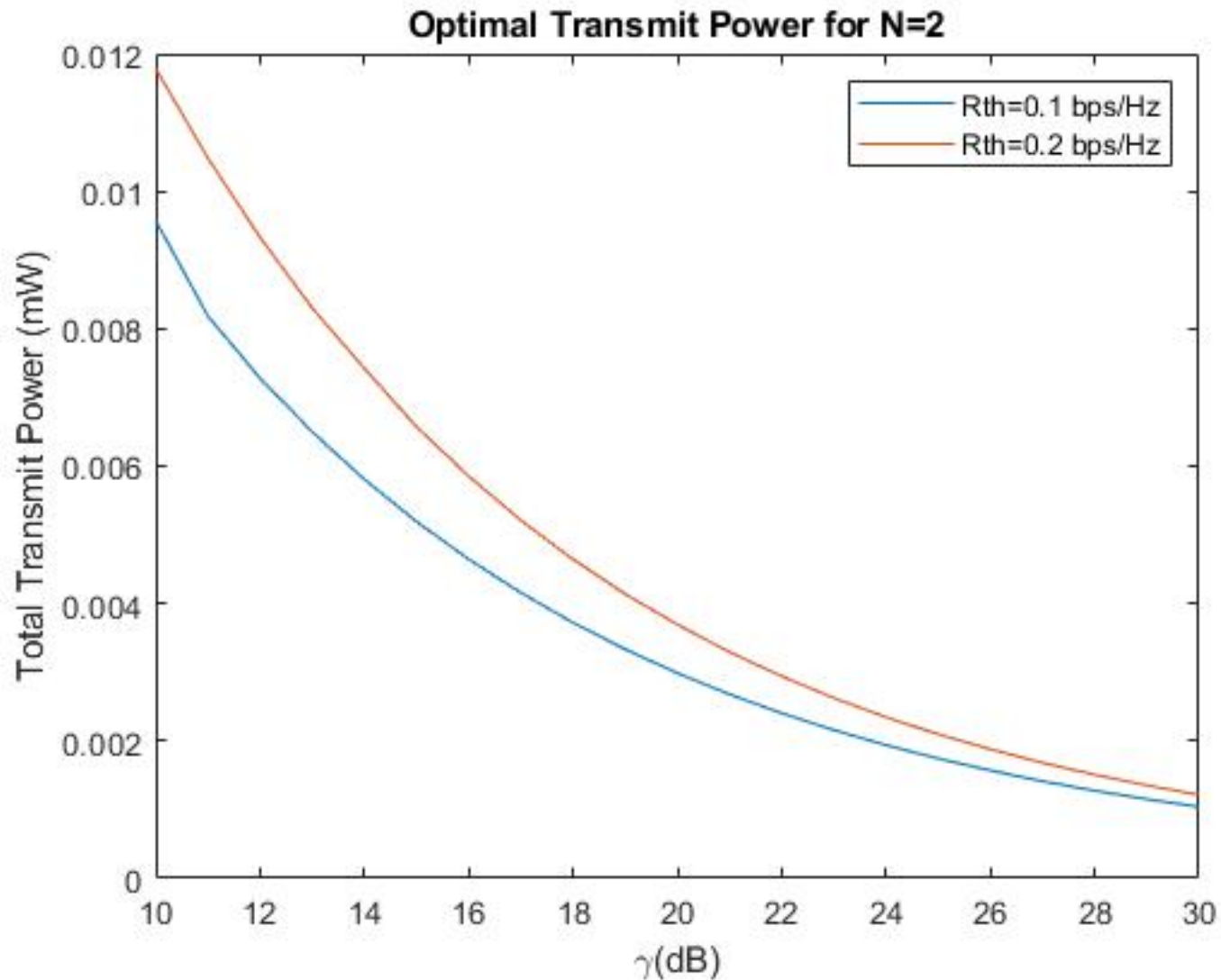
Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των k ZEDs δικτύων σύμφωνα με το πρόβλημα βελτιστοποίησης της ενέργειας που διαμορφώσαμε προηγουμένως. Χωρίς απώλεια της γενικότητας μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η κάθε ισχύς συλλογής είναι $P_{har,k} = P_{har} = 1mW$ και η κατανάλωση ρεύματος κυκλώματος $P_{c,k} = P_c$ είναι ίσες κατά την μετάδοση των δεδομένων. Επιλέξαμε να κάνουμε δύο προσομοιώσεις με διαφορετικό αριθμό χρηστών η κάθε μία. Η πρώτη επιλέξαμε να έχουμε δύο χρήστες και στην δεύτερη τρεις. Άρα και το k είναι στα διαστήματα $[1,2]$ και $[1,3]$ για δύο και τρεις χρήστες αντίστοιχα. Η απώλεια διαδρομή μεταξύ των ZEDs και του BS είναι $L_k = 1$ και περιλαμβάνεται στον τύπο $\gamma_k = \frac{L_k}{N_0}$, ο οποίος είναι μία έκφραση που μετράει την ποιότητα της επικοινωνίας στο κανάλι. Το γ_k είναι τελείως διαφορετική ποσότητα και δεν θα πρέπει να το μπερδεύουμε με την αναλογία προς θόρυβο SNR. Μεγαλύτερες ποσότητες του γ_k σημαίνει πιο αποδοτικό κανάλι επικοινωνίας στην κάτω ζεύξη μεταξύ ZED και BS, είτε λόγω χαμηλότερης εξασθένησης σήματος είτε λόγω λιγότερου θορυβώδους καναλιού ή και των δύο. Παρουσιάστηκε η κατανομή πόρων στα σχήματα αυτής της ενότητας που αφορούν την απόδοση του ενός χρήστη, αλλά ισχύει πολύ παρόμοια κατανομή και για τους υπόλοιπους, έτσι τα αποτελέσματα μπορούν να γενικευθούν και για όλα τα άλλα ZED.

4.1 Διάγραμμα της Ισχύος Μεταφοράς ως προς την ποιότητα επικοινωνίας

Οι δύο προσομοιώσεις που θα μελετήσουμε σε αυτή την ενότητα αφορούν την σχέση μεταξύ της ποιότητας επικοινωνίας και της ποσότητας ισχύος που μεταφέρεται στο σύστημα. Σε κάθε προσομοίωση έχουμε δύο περιπτώσεις: για συσκευές με QoS απαιτήσεις του ρυθμού δεδομένων τους να είναι $R_{th,1} = 0.1bps/Hz$ και $R_{th,2} = 0.2bps/Hz$. Η κατανάλωση ρεύματος κυκλώματος όλων των συσκευών είναι $P_c = 1mW$.

4.1.1 για $N=2$

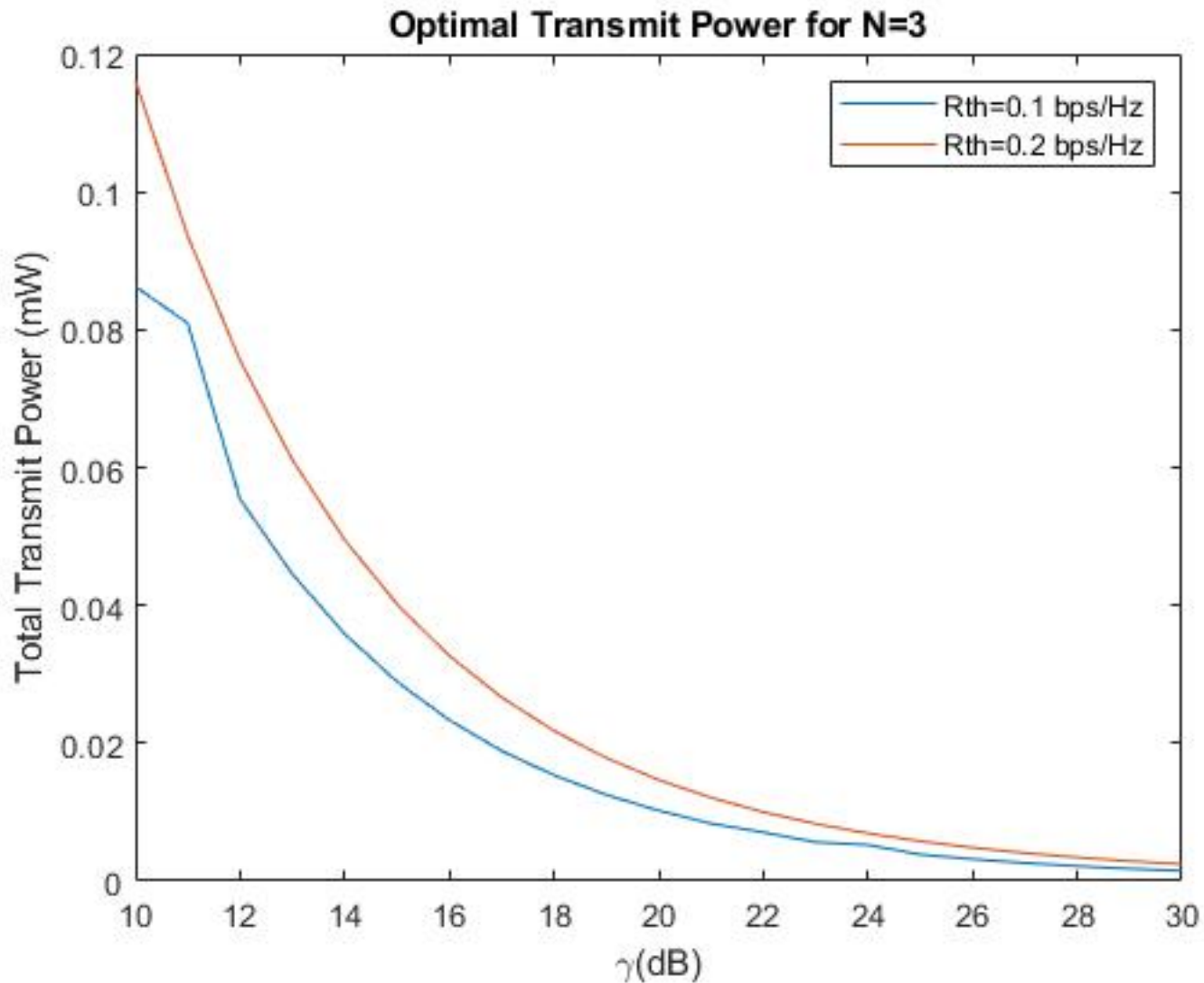
Στο διάγραμμα 4.1.1 βλέπουμε ότι όσο αυξάνεται το $\gamma = [10, 30]dB$, δηλαδή όσο βελτιώνεται η ποιότητα του καναλιού επικοινωνίας, τόσο μειώνεται η συνολική ισχύς που καταναλώνεται στο κανάλι. Έχουμε δύο διαφορετικές περιπτώσεις συσκευών για $R_{th,1} = 0,1bps/Hz$ και $R_{th,2} = 0.2bps/Hz$. Το $R_{th,1}$ έχει για όλα τα γ μικρότερη συνολική ισχύς μεταφοράς από το $R_{th,2}$. Όμως,



όσο αυξάνεται η τιμή του γ τόσο μειώνεται αυτή η διαφορά και όσο το γ πλησιάζει την τιμή 30 βλέπουμε τόσο οι δύο γραφικές παραστάσεις τείνουν να ταυτιστούν.

4.1.2 για N=3

Αντίστοιχα, στο διάγραμμα 4.1.2 βλέπουμε ότι και στους τρεις χρήστες η συνολική ισχύ μεταφοράς μειώνεται όσο βελτιώνεται η ποιότητα καναλιού επικοινωνίας. Η μεγάλη διαφορά μεταξύ των δύο προσομοιώσεων είναι στα μεγέθη της ισχύς που μεταφέρεται. Συγκεκριμένα στους τρεις χρήστες η συνολική ισχύς μεταφοράς είναι 10 φορές μεγαλύτερη από αυτή των δύο χρηστών.

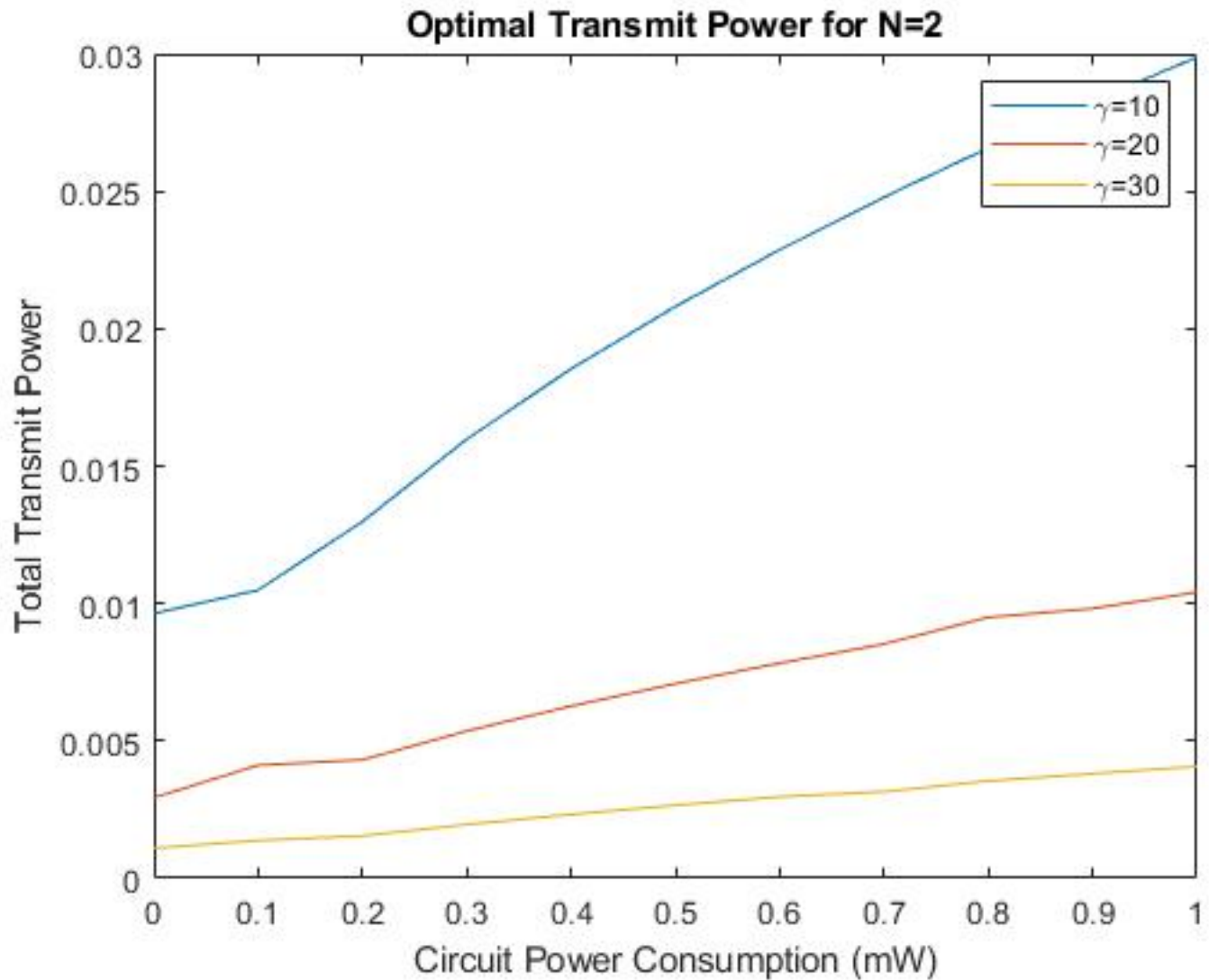


4.2 Διάγραμμα της Ισχύος Μεταφοράς ως προς την κυκλωματική κατανάλωση ισχύος

Στα διαγράμματα 4.2.1 και 4.2.2 μελετάμε με λεπτομέρεια την επιρροή της κυκλωματικής κατανάλωσης ισχύος. Παρατηρούμε σε αυτά τα διαγράμματα ότι όσο αυξάνεται η κυκλωματική κατανάλωση ισχύος τόσο αυξάνεται η ισχύς μεταφοράς.

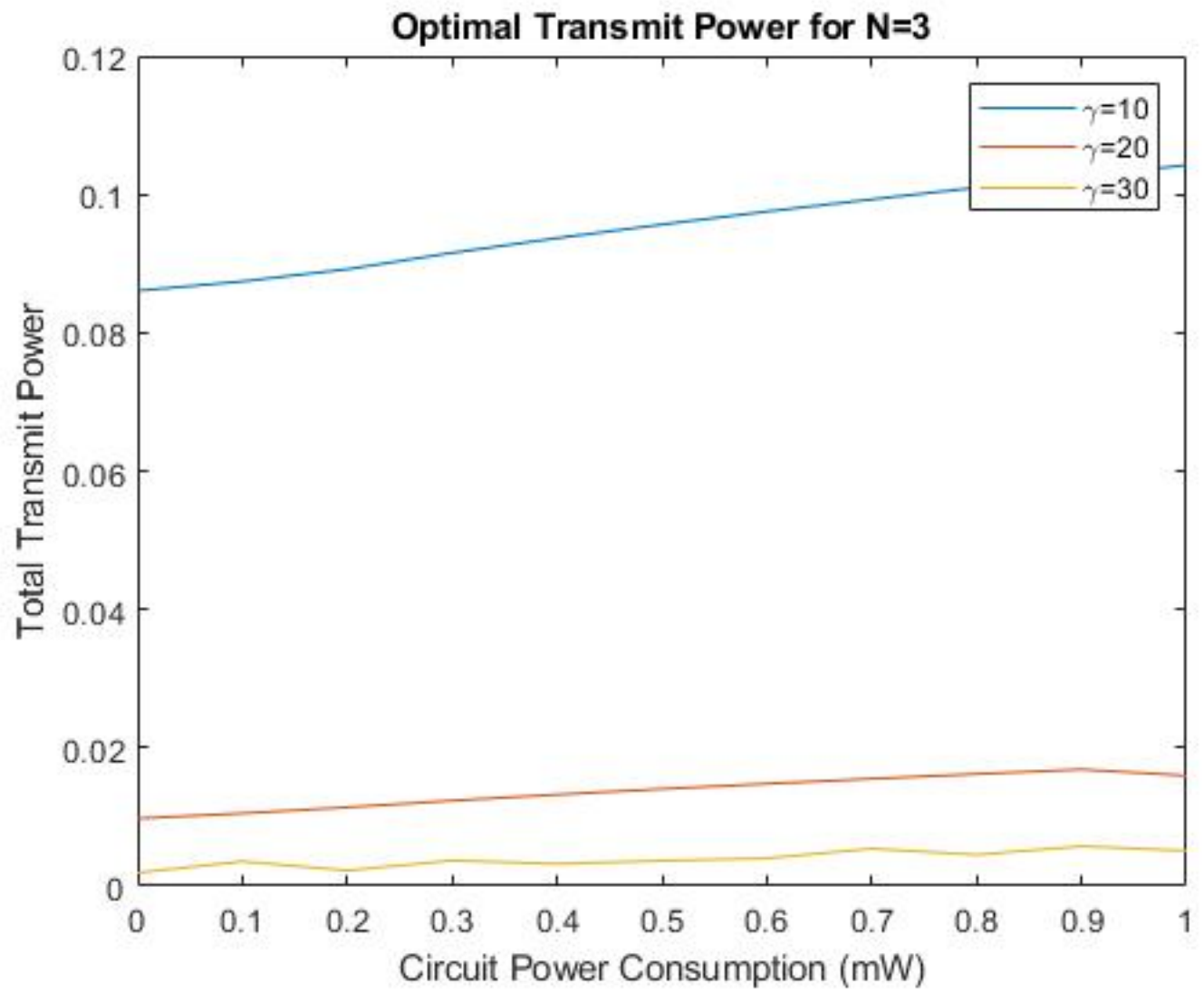
4.2.1 για $N=2$

Στο διάγραμμα 4.2.1 παρατηρούμε ότι για $\gamma = 10$ η κυκλωματική κατανάλωση ισχύος επηρεάζει πολύ παραπάνω την αύξηση της ισχύς μεταφοράς σε σύγκριση με τα $\gamma = 20, 30$, ενώ για $\gamma = 30$ βλέπουμε η τιμή να παραμένει σχεδόν σταθερή. Επομένως, όσο πέφτει η ποιότητα του καναλιού επικοινωνίας τόσο αυξάνεται η ισχύς μεταφοράς σε σχέση με την κυκλωματική κατανάλωση ισχύος.



4.2.2 για N=3

Στο διάγραμμα 4.2.2 βλέπουμε και εδώ ότι η μεταφορά σχύος με τρεις χρήστες είναι σχεδόν δεκαπλάσια σε σχέση με τους δύο χρήστες. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι και σε αυτή την περίπτωση η αύξηση της κυκλωματικής κατανάλωσης ισχύος επηρεάζει την ισχύ μεταφοράς αρκετά περισσότερο στην χαμηλότερη ποιότητα καναλιού σε σχέση με τις άλλες δύο, οι οποίες φαίνονται σχεδόν σταθερές. Τέλος, για $\gamma = 10$ βλέπουμε μια μεγάλη αύξηση της ισχύος μεταφοράς σε σχέση με τις άλλες δύο ποιότητες καναλιού.



Κεφάλαιο 5

Επίλογος

Σε αυτή τη μελέτη, προτείναμε ένα νέο σχέδιο κατανομής πόρων, το οποίο στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας των ZEDs. Η διαθέσιμη ενέργειά τους είναι εξαιρετικά περιορισμένη, αφού λειτουργούν χρησιμοποιώντας μόνο την ενέργεια που συλλέγεται από ένα ειδικό φάρος ισχύος. Ως εκ τούτου, η κατανάλωση ισχύος του κυκλώματος πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη αφού η επιρρόή της είναι ένα συγκρίσιμο μέγεθος με την μεταφορά ισχύος των ZED. Το διαμορφωμένο πρόβλημα ελαχιστοποίηση ενέργειας ήταν non-convex, έτσι μετατράπηκε σε ένα ισοδύναμο convex, προκειμένου να προκύψει η βέλτιστη λύση του. Το προτεινόμενο σχέδιο ενεργειακής απόδοσης μπορεί, επίσης, να χρησιμοποιηθεί ως σημείο αναφοράς και για απλούστερα σχήματα RA. Τέλος, παρουσιάστηκαν τα αριθμητικά αποτελέσματα, που επαληθεύουν τον μη τετριμμένο αντίκτυπο της ισχύς κυκλώματος κι έτσι θα πρέπει να το λαμβάνουμε υπόψη.

Βιβλιογραφία

- [1] L. R. Varshney, “Transporting information and energy simultaneously,” in *2008 IEEE International Symposium on Information Theory*, 2008, pp. 1612–1616.
- [2] I.-J. Yoon, “Wireless power transfer in the radiating near-field region,” in *2015 USNC-URSI Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium)*, 2015, pp. 344–344.
- [3] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, “Wireless networks with rf energy harvesting: A contemporary survey,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp. 757–789, 2015.
- [4] H. Nishimoto, Y. Kawahara, and T. Asami, “Prototype implementation of ambient rf energy harvesting wireless sensor networks,” in *SENSORS, 2010 IEEE*, 2010, pp. 1282–1287.
- [5] R. W. Y. Habash, J. M. Elwood, D. Krewski, W. G. Lotz, J. P. McNamee, and F. S. Prato, “Recent advances in research on radiofrequency fields and health: 2004–2007,” *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, vol. 12, no. 4, pp. 250–288, 2009, pMID: 20183523. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/10937400903094125>
- [6] J. Park, Y. Tak, Y. Kim, Y. Kim, and S. Nam, “Investigation of adaptive matching methods for near-field wireless power transfer,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 5, pp. 1769–1773, 2011.
- [7] A. Massa, G. Oliveri, F. Viani, and P. Rocca, “Array designs for long-distance wireless power transmission: State-of-the-art and innovative solutions,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1464–1481, 2013.
- [8] G. A. Landis, “Applications for space power by laser transmission,” in *Laser Power Beaming*, J. V. Walker and E. E. M. IV, Eds., vol. 2121, International Society for Optics and Photonics. SPIE, 1994, pp. 252 – 255. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1117/12.174188>
- [9] —, “Re-evaluating satellite solar power systems for earth,” in *2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference*, vol. 2, 2006, pp. 1939–1942.
- [10] R. Zhang and C. K. Ho, “Mimo broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 5, pp. 1989–2001, 2013.

- [11] Z. Ding, C. Zhong, D. Wing Kwan Ng, M. Peng, H. A. Suraweera, R. Schober, and H. V. Poor, “Application of smart antenna technologies in simultaneous wireless information and power transfer,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 4, pp. 86–93, 2015.
- [12] T. D. Ponnimbaduge Perera, D. N. K. Jayakody, S. K. Sharma, S. Chatzinotas, and J. Li, “Simultaneous wireless information and power transfer (swipt): Recent advances and future challenges,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 20, no. 1, pp. 264–302, 2018.
- [13] S. Bi, Y. Zeng, and R. Zhang, “Wireless powered communication networks: an overview,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 10–18, 2016.
- [14] Z. Hadzi-Velkov, S. Pejoski, N. Zlatanov, and R. Schober, “Proportional fairness in aloha networks with rf energy harvesting,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 1, pp. 277–280, 2019.
- [15] Q. Wu, W. Chen, D. W. K. Ng, and R. Schober, “Spectral and energy-efficient wireless powered iot networks: Noma or tdma?” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 7, pp. 6663–6667, 2018.
- [16] N. A. Mitsiou, V. K. Papanikolaou, P. D. Diamantoulakis, and G. K. Karagiannidis, “Energy-aware optimization of zero-energy device networks,” *IEEE Communications Letters*, vol. 26, no. 4, pp. 858–862, April 2022.
- [17] S. A. Tegos, G. K. Karagiannidis, P. D. Diamantoulakis, and N. D. Chatzidiamantis, “New results for pearson type iii family of distributions and application in wireless power transfer,” *IEEE Internet of Things Journal*, pp. 1–1, 2022.
- [18] X. Kang, C. K. Ho, and S. Sun, “Optimal time allocation for dynamic-tdma-based wireless powered communication networks,” in *2014 IEEE Global Communications Conference*, Dec 2014, pp. 3157–3161.