

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου
Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακή Διατριβή
Στα Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας



Τεχνικές Συλλογής Ενέργειας (Energy Harvesting) και
Εφαρμογές τους σε Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα

Εφραίμ Παναγιώτου

Επιβλέπων Καθηγητής
Δρ. Δημοσθένης Βουγιούκας

Δεκέμβριος 2017

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

**Τεχνικές Συλλογής Ενέργειας (Energy Harvesting) και
Εφαρμογές τους σε Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα**

Εφραίμ Παναγιώτου

**Επιβλέπων Καθηγητής
Δρ. Δημοσθένης Βουγιούκας**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε
προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση

μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών
στα Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας

από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών
του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου.

Δεκέμβριος 2017

ΛΕΥΚΗ ΣΕΛΙΔΑ

Περίληψη

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια προσπάθειά για ανάλυση και κατανόηση των σύγχρονων τεχνολογιών οι οποίες χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη τεχνικών συλλογής ενέργειας και επιχειρεί να κάνει μια συνοπτική επισκόπηση της πρόσφατης βιβλιογραφίας όσο αφορά τις τεχνολογίες, τις υλοποιήσεις και τα παράγωγα της σε συστήματα επικοινωνίας με πομπούς συγκομιδής ενέργειας.

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ειδικά των τεχνικών συλλογής ενέργειας σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Συγκεκριμένα αυτό το ενδιαφέρον επικεντρώνεται όλο και περισσότερο γύρω από τον τομέα των πράσινων επικοινωνιών και ειδικά στο εξελισσόμενο πεδίο των ασύρματων δικτύων συλλογής ενέργειας μέσω ραδιοσυχνοτήτων (RF).

Η πτυχιακή αναλύει τις πηγές ενέργειας, παρουσιάζει τις τεχνολογίες συλλογής - αποθήκευσης ενέργειας και τους τρόπους μοντελοποίησης των διαδικασιών συγκομιδής ενέργειας. Μια από τις κύριες διαφορές των δικτύων συλλογής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες σε σχέση με τα παραδοσιακά δίκτυα είναι ότι η συγκομιδή ενέργειας εξαρτάται από τον χρόνο και τον χώρο. Άρα υπάρχει έντονη ανάγκη μελέτης των αρχών της συλλογής ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα με σκοπό την κατανόηση τους και την βελτιστοποίηση χρήσης ενέργειας στους διαδικτυακούς κόμβους.

Η παρούσα διατριβή μελετά τις πρόσφατες τεχνολογίες δικτύων (όπως δίκτυα 5ης γενιάς, δίκτυα IoT, κ.λπ.) και αναλύει τις διαδικασίες και αρχιτεκτονικές συλλογής ενέργειας. Παρουσιάζουμε τον σχεδιασμό και τις προκλήσεις ασυρμάτων δικτύων για τα συστήματα συλλογής ενέργειας μέσω ραδιοσυχνοτήτων καθώς και τις τεχνολογίες SWIPT (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer) που παρέχουν ενοποίηση μετάδοσης πληροφοριών και συγκομιδής ενέργειας. Γι' αυτό το λόγο παρουσιάζονται οι αρχιτεκτονικές, οι τρόποι μετάδοσης της ενέργειας, οι τεχνικές διαχωρισμού και η κατανομή πόρων σε συστήματα SWIPT. Ακόμη, εξετάσουμε τη χρησιμότητα αυτών των τεχνολογιών στις ασύρματες επικοινωνίες μέσω των δικτύων συλλογής ενέργειας. Τέλος, αναφέρουμε τις προκλήσεις σχετικά με τον σχεδιασμό, την μοντελοποίηση, την ανάπτυξη και τις εφαρμογές δικτύων συλλογής ενέργειας και τις συγκρίνουμε βάσει των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων τους. Κλείνουμε αυτή την έρευνα με σύγκριση των δικτύων συλλογής ενεργείας SWIPT, συμπεράσματα και μελλοντικές προεκτάσεις.

Summary

The present study is an attempt to understand and analyse the modern technologies used for the development of energy collection techniques and attempts to make a brief overview of the latest bibliography regarding the technologies, implementations and derivatives in communication systems with energy harvesters.

In recent years, there has been strong research interest in the field of renewable energy sources and especially energy collection techniques in telecommunication systems. In particular, this interest is increasingly centred around radio networks for radio frequency (RF) energy collection. This dissertation analyses the energy sources, presents the energy collection and storage technologies and the ways of modeling the energy harvesting processes. One of the main types of radio frequency energy networks with traditional networks is that the energy harvest depends on time and space. Therefore, there is a strong need to study the principles of energy collection in wireless networks in order to understand and optimize the use of energy at the internet nodes. The dissertation studies recent network technologies (such as 5th generation networks, IOT networks, etc.) and analyses energy collection processes and architectures. We also present SWITT (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer) technologies that provide unified information transmission and energy harvesting. For this reason, architectures, energy transmission modes, separation techniques, and resource allocation in SWIPT systems are presented. We still look at the utility of these technologies in wireless communications through energy collection networks. Finally, we report on the challenges of design, modeling, development and applications of energy collection networks and compare them on the basis of their advantages and disadvantages. We close this research effort by comparing traditional energy harvesting networks with SWIPT networks, conclusions and future expansions.

Ευχαριστίες

Η συγκεκριμένη διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια της φοίτησης μου στη Σχολή Θετικών και εφαρμοσμένων επιστημών του Ανοικτό Πανεπιστήμιου Κύπρου.

Η μεταπτυχιακή διατριβή αποτελεί την ολοκλήρωση της προσπάθειάς μου για απόκτηση ενός εξειδικευμένου πανεπιστημιακού τίτλου.

Με το παρόν θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου, λέγοντας ένα μεγάλο ευχαριστώ, σε όλους εκείνους τους ανθρώπους, καθηγητές, συναδέλφους, φίλους και μέλη της οικογένειάς μου, που με στήριξαν σε όλη τη διάρκεια της πορείας μου και με βοήθησαν με τον επαγγελματισμό, την φιλία και την αγάπη τους να φτάσω έως εδώ. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω το ακαδημαϊκό και διοικητικό προσωπικό του Ανοικτού Πανεπιστήμιου Κύπρου και συγκεκριμένα τον κ. Στάθη Μαυροθέρη, για την στήριξη και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε όταν εργαζόμουν στον τομέα υποστήριξης φοιτητών. Θεωρώ εξαιρετική τύχη το γεγονός της συνεργασίας μου μαζί του. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σταύρου Σταύρο, νυν ακαδημαϊκό υπεύθυνο και αναπληρωτή καθηγητή στα προγράμματα σπουδών ΣΑΕ για την καθοδήγηση και τις συμβουλές του. Δεν θα μπορούσα να παραλείψω να αναφερθώ στον Παπαϊακώβου Ελπιδοφόρο και Ιωάννου Κυριακό από τον τομέα κεντρικών εφαρμογών, τον κ Μιχάλη Ροδοσθένους, τον Μιχάλη Επιφανείου από τον τομέα τηλε-εκπαίδευσης. Σημαντική ήταν η στήριξη από την Τσολακή Γεωργία του τομέα εξυπηρέτησης χρηστών με την οποία συνεργάστηκα αρμόνικα και ουσιαστικά το μικρό διάστημα που εργοδοτήθηκα στο Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ακαδημαϊκούς μου αυτά τα χρόνια στο πανεπιστήμιο για την άριστη συνεργασία και ειδικά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Δημοσθένη Βουγιούκα που με καθοδήγησε στην ολοκλήρωση αυτής της διατριβής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την κατανόηση και συμπαράσταση κατά την συγγραφή της παρούσας διατριβής.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Πρόλογος	2
1.2	Σκοπός	4
1.3	Αναγκαιότητα	5
2	Ανασκόπηση Τεχνικών Συλλογής Ενέργειας	6
2.1	Εισαγωγή	7
2.2	Επισκόπηση Τεχνολογιών Συγκομιδής Ενέργειας	8
2.3	Πηγές Ενέργειας	9
2.3.1	Ηλιακή Ενέργεια	10
2.3.2	Θερμική - Θερμοηλεκτρική Ενέργεια	11
2.3.3	Ενέργεια από ραδιοσυχνότητες	12
2.3.4	Αιολική Ενέργεια	13
2.3.5	Ενέργεια από Δόνηση	14
2.4	Σύγκριση τεχνολογιών συλλογής ενέργειας	15
2.5	Αρχιτεκτονικές Συγκομιδής και χρήσης Ενέργειας	16
2.6	Αποθήκευση Ενέργειας	17
2.7	Τέλος επισκόπησης	18
3	Γενικές αρχές και συστατικά συστημάτων ΣΕ	19
3.1	Εισαγωγή	20
3.2	Επεξεργαστές Soc και Αισθητήρες συλλογής ενέργειας	20
3.2.2	Αισθητήρες συλλογής ενέργειας	22
3.2.3	Πλεονεκτήματα χρήσης αισθητήρων συλλογής ενέργειας	23
3.3	Internet of Things (IoT)	24
3.3.1	Σημαντικότητα του IoT	25
3.3.2	Εφαρμογές του IoT	27
3.3.3	Συγκομιδή ασύρματης ενέργειας σε IoT	29
3.4	Γενικές αρχές σχεδίασης συλλογής RF	31
3.4.1	Μοντέλα διάδοσης ενέργειας (RF Energy Propagation Models)	33
3.5	Σύνοψη	35
4	Ασύρματα Δίκτυα 5ης Γενιάς	36
4.1	Εισαγωγή	37
4.2	Εξέλιξη δικτύων	38
4.3	Τεχνολογίες δικτύων 5ης γενιάς	39
4.3.1	Millimeter waves (κύματα χιλιοστού)	39
4.3.2	Small cells (μικροκυψέλες)	40
4.3.3	Massive MIMO	40
4.3.4	Beamforming	41
4.3.5	Full duplex	42
4.4	Φάσμα (Spectrum)	43
4.5	Συλλογή ενέργειας από δίκτυα κινητής τηλεφωνίας	43
4.6	Σύνοψη	46
5	Σχεδιασμός και προκλήσεις συστημάτων συλλογής ενέργειας RF	49
5.1	Εισαγωγή	50
5.2	Αρχιτεκτονική δικτύων συλλογής ενέργειας	51
	5.1.3	

5.2.1	Γενικές κατηγορίες πηγών	523
5.2.2	Αρχιτεκτονικές συγκομιδής ενέργειας	554
5.2.3	Ασύρματη συγκομιδή ενέργειας	56
5.2.4	Απόδοση συγκομιδή ενέργειας	57
5.2.5	Μοντέλα διάδοσης ενέργειας	578
5.2.6	Εξισώσεις υπολογισμού απόδοσης	578
5.2.7	Εξισώσεις για αποτελεσματική μεταφορά ενεργείας	59
5.3	Σχεδιασμός κυκλωμάτων συγκομιδής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες	604
5.4	Σχεδιασμός κυκλωμάτων δέκτη	62
5.5	Αρχιτεκτονικές και Τεχνικές SWIPT	66
5.5.1	Αρχιτεκτονικές δέκτη	667
5.5.2	Τεχνικές SWIPT	67
5.5.3	Κατανομή πόρων στα συστήματα SWIPT	689
5.5.4	Δίκτυα MIMO SWIPT	704
5.5.5	SWIPT σε ασύρματα συνεργατικά δίκτυα συγκομιδής ενέργειας	723
5.6	Μοντελοποίηση συλλογής ενέργειας	745
5.6.1	Γενικές Μοντελοποιήσεις	7574
5.6.2	Μοντελοποίηση SWIPT	756
5.6.3	Μοντέλο συστήματος	756
5.6.4	Δέκτης πληροφοριών	767
5.6.5	Συλλογή Ενέργειας	789
5.6.6	Ρυθμός μετάδοσης πληροφοριών	804
5.7	Διαχείριση ενέργειας και πρόβλεψη διάρκειας ζωής	834
5.7.1	Μονάδα διαχείρισης ενεργείας	835
5.7.2	Πρόβλεψη διάρκειας ζωής	865
5.8	Περιορισμοί και προκλήσεις	878
5.8.1	Μελλοντικές τάσεις	887
5.9	Εφαρμογές συστημάτων συλλογής ενέργειας	934
5.10	Σύνοψη	945

6	Ασύρματα δίκτυα και αναμεταδότες	
	978	
6.1	Εισαγωγή	
	989	
6.2	Γενικά	
	989	
6.3	Ειδή δικτύων συλλογής ενέργειας	
	1004	
6.3.1	Συνεργατικά δίκτυα συλλογής ενέργειας	
	1004	
6.3.2	Γνωσιακά δίκτυα CRN	
	1012	
6.3.3	Δίκτυα συλλογής ενέργειας πολλαπλών χρηστών.....	
	1023	
6.3.4	Συλλογής ενέργειας από κυψελωτά δίκτυα	
	1034	
6.4	Αναμεταδότες (Relays)	
	1054	
6.4.1	Συστήματα SWIPT με αναμεταδότες	
	1056	
6.4.2	Επιλογή αναμεταδοτών σε ασύρματα δίκτυα	
	1067	
6.5	Σύγκριση SWIPT με παραδοσιακά δίκτυα ΣΕ	
	10940	
6.6	Σύνοψη	
	1112	
6.6.1	Γενικές προκλήσεις δικτύων συλλογής ενέργειας	
	1123	
6.6.2	Προκλήσεις δικτύων συλλογής ενέργειας	
	1134	
6.6.3	Προκλήσεις δικτύων συλλογής ενέργειας με τεχνολογίες SWIPT	
	1134	
6.6.4	Προκλήσεις δικτύων συλλογής ενέργειας από Γνωσιακά δίκτυα	
	1145	
6.6.5	Σύνοψη γενικών προκλήσεων σε συστήματα συλλογής ενέργειας	
	1156	
7	Επίλογος	117
7.1	Σχετικά	118
7.2	Συμβολή τις διατριβής	118
7.3	Συμπεράσματα και μελλοντικές προεκτάσεις	119
	Βιβλιογραφία	120

Πίνακας Συντομογραφιών

AC - Alternating Current : Εναλλασσόμενο ρεύμα,

DC - Direct current : συνεχές ρεύμα

CRN - cognitive radio network : γνωσιακά δίκτυα ραδιοεπικοινωνιών

CMOS - complementary metal-oxide-semiconductor : Ημιαγωγός μεταλλικού οξειδίου

ΣΕ - Συλλογή Ενέργειας

ERP - Effective radiated power : Ισοδύναμη ακτινοβολούμενη ισχύς

EIRP - Isotropic radiated power: Ισοδύναμη ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς

EH - Energy Harvesting : Συλλογή ενέργειας

RF - Radio frequency : ηλεκτρομαγνητικές συχνότητες κυμάτων

RF -EHNs : Δίκτυα συγκομιδής ενέργειας μέσω ραδιοσυχνοτήτων

RFID - Radio-frequency identification : Αναγνώριση ραδιοσυχνοτήτων

QoS - Quality of Service : Ποιότητα υπηρεσιών

IoT - Internet of things : Διαδίκτυο των πραγμάτων

SoC - System on a chip : Σύστημα σε τσιπ ή αλλιώς μικροελεγκτές

MIMO - Multiple-Input Multiple-Output : Σύστημα πολλαπλών έξοδών/πολλαπλών εισόδων

PMU – Power management unit: Μονάδα διαχείρισης ενέργειας

MAC - Medium Access Control : πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο

RSSI - received signal strength indicator : ένδειξη ισχύος λαμβανομένου σήματος

LTE - Long-Term Evolution : Πρωτόκολλο υψηλής ταχύτητας για ασύρματη επικοινωνία

SWIPT - Simultaneous Wireless Information and Power Transfer : Ταυτόχρονη ασύρματη μεταφορά πληροφοριών και ενέργειας

PCE - Power conversion efficiency: απόδοση μετατροπής ισχύος

WEH - Wireless Energy Harvesting: Συλλογή ασύρματης ενέργειας

WSN – Wireless Sensor Networks: Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

WPT - Wireless power transfer : Ασύρματη μεταφοράς ισχύος

SNR - signal-to-noise ratio : λόγος σήματος-προς-θόρυβο

RSRP – Reference Signal Received Power: τύπος μέτρησης RSSI ισχύς σημάτων αναφοράς

RSRQ – Reference Signal Received Quality: Μέτρηση ποιότητας λαμβανομένου σήματος

RRS - random relay selection : Τυχαία επιλογή αναμεταδοτών

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Πρόλογος

Η συλλογή ενέργειας είναι μια διαδικασία με την οποία η ενέργεια, η οποία προέρχεται από εξωτερικές πηγές, (π.χ. ηλιακή ενέργεια, θερμική ενέργεια, αιολική ενέργεια, κινητική ενέργεια κ.λπ.) συλλέγεται και αποθηκεύεται για μικρές ασύρματες αυτόνομες συσκευές, όπως αυτές που χρησιμοποιούνται σε φορητές wearable συσκευές και σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Οι συσκευές που μαζεύουν ενέργεια συνήθως παρέχουν μια πολύ μικρές ποσότητες ενέργειας για ηλεκτρονικά χαμηλής κατανάλωσης.

Σε αντίθεση με τις συνηθισμένες πηγές ενέργειας, όπως είναι το πετρέλαιο, ο άνθρακας, κ.λπ., που έχει κόστος παραγωγής, η πηγή ενέργειας στο συγκεκριμένο τομέα είναι παρούσα στο περιβάλλον και είναι δωρεάν. Για παράδειγμα, σε αστικές περιοχές υπάρχουν μεγάλα ποσοστά ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στο περιβάλλον, λόγω των ραδιοφωνικών και τηλεοπτικών εκπομπών. Μία από τις πρώτες εφαρμογές της συλλογής ενέργειας από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του περιβάλλοντος, που έχει εφευρεθεί είναι το κρυσταλλικό ραδιόφωνο (Crystal radio) από τις αρχές του προηγούμενου αιώνα. [4]

Οι συσκευές συλλογής (συγκομιδής) ενέργειας που μετατρέπουν την ενέργεια του περιβάλλοντος σε ηλεκτρική ενέργεια έχουν προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον του ερευνητικού και εμπορικού τομέα. Μερικά συστήματα μετατρέπουν την κίνηση, όπως αυτή των κυμάτων του ωκεανού, σε ηλεκτρική ενέργεια για να χρησιμοποιηθούν από αισθητήρες παρακολούθησης για αυτόνομη λειτουργία. Άλλες μαζεύουν ενέργεια από το περιβάλλον η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι μελλοντικές εφαρμογές μπορεί να περιλαμβάνουν συσκευές υψηλής ισχύος (ή συστοιχίες των εν λόγω συσκευών) για να αναπτυχθούν σε απομακρυσμένες περιοχές έτσι, ώστε να χρησιμοποιηθούν ως σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Μια άλλη εφαρμογή τους μπορεί να είναι σε φορητές ηλεκτρονικές συσκευές όπου οι μέθοδοι συγκομιδής ενέργειας μπορούν να τροφοδοτήσουν ή να επαναφορτίσουν κινητά τηλέφωνα, φορητούς υπολογιστές, εξοπλισμό ραδιοεπικοινωνίας, κ.λπ. Όλες αυτές οι συσκευές πρέπει όμως να είναι επαρκώς ισχυρές για να αντέξουν μακροχρόνια έκθεση σε εχθρικά περιβάλλοντα και έχουν ένα ευρύ φάσμα ευαισθησίας έτσι ώστε να μπορούν να εκμεταλλευτούν όλο το φάσμα των εκάστοτε πηγών.

Υπάρχει άφθονη ενέργεια στο περιβάλλον μας. Μερικά παραδείγματα πηγών ενέργειας είναι το φως (ηλιακή ενέργεια), η κίνηση, η θερμότητα του σώματος, και οι ηλεκτρομαγνητικές συχνότητες κυμάτων (RF). Η πρόκληση είναι να καταφέρουμε να μετατρέψουμε αυτή την ενέργεια από το περιβάλλον σε ωφέλιμη ηλεκτρική ενέργεια για να μπορούμε να τροφοδοτήσουμε μια υλοποίηση. Η τεχνολογία σήμερα έχει φτάσει στο σημείο όπου μπορούμε να το κάνουμε αυτό πρακτικά, από μεγάλες εφαρμογές έως συστήματα τάξεως milliwatts, όπου σε αυτό το εύρος, καθίσταται δυνατή η συγκομιδή ενέργειας από το περιβάλλον. Η ενεργειακή απόδοση θεωρείται σημαντικό ζήτημα στην αρχιτεκτονική και στον σχεδιασμό δικτύων με έμφαση σε ασύρματους αισθητήρες. Σε δίκτυα με μικρές αυτόνομες μονάδες (με περιορισμένη κατανάλωση ενέργειας) η διάρκεια ζωής του δικτύου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αρχική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στον κόμβο. Οι τεχνολογίες

συγκομιδής ενέργειας επιτρέπουν σε ορισμένες συσκευές να φέρουν την δική τους ενέργεια, έτσι ώστε να μπορεί να διατηρηθεί το δίκτυο. Ένας βασικός τομέας όπου επιθυμούμε την παράταση χρόνου διάρκειας ζωής τους είναι οι φορητές ηλεκτρονικές συσκευές. Αυτές μπορούσαν να είναι τα κινητά τηλέφωνα, οι συσκευές αναπαραγωγής πολυμέσων, τα φορητά ραδιόφωνα, οι φορητές ιατρικές συσκευές, διάφορα εργαλεία, φορητά συστήματα GPS κλπ. Σε περιπτώσεις που ταξιδεύουμε και δεν έχουμε κάποια κοντινή πηγή ενέργειας για να φορτίσουμε το κινητό μας τηλέφωνο μπορεί να μας φανεί ως ένα μεγάλο πρόβλημα. Έτσι, η συγκομιδή ενέργειας γίνεται απαραίτητη και είναι φθηνότερη από την εγκατάσταση ενός ολοκληρωμένου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας [15].

Με τη συνεχή ανάπτυξη ασύρματων δικτύων και συσκευών, η σωστή διαχείριση κατανάλωσης ενέργειας σε φορητές ασύρματες συσκευές έχει γίνει πρόσφατα ενδιαφέρον θέμα. Ορισμένες συσκευές που χρησιμοποιούν ασύρματα δίκτυα, όπως τα κινητά τηλέφωνα, μπορούν να διατηρήσουν τη λειτουργία τους απλά φορτίζοντας ή αλλάζοντας τις μπαταρίες τους, μια διαδικασία που μπορεί να είναι πολύ δύσκολη για άλλες διαδικτυακές συσκευές. Για παράδειγμα, σε συστήματα ασύρματων εφαρμογών δικτύου με αισθητήρες, η αλλαγή μπαταριών ή φόρτιση τους σε μεγάλες περιοχές μπορεί να αδύνατη ή ασύμφορη, έτσι προσεγγίζουμε σε λύσεις συγκομιδής ενέργειας (EH) όπου σε τέτοιες περιπτώσεις, ο χρόνος ζωής των ασύρματων συσκευών μπορεί να επεκταθεί μέσω της συγκομιδή ενέργειας από το περιβάλλον. Οι συσκευές συγκομιδής ενέργειας μπορούν να 'μαζέψουν' ενέργεια από το περιβάλλον. Η ενέργεια αυτή προέρχεται από πηγές, όπως ο ήλιος, ηλεκτρομαγνητικά κύματα, κραδασμούς κλπ. και μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό για χρήση ή αποθήκευση. Με την ανάπτυξη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (κεφ.3) και άλλων ηλεκτρονικών συσκευών χαμηλής ισχύος, οι τεχνολογίες συγκομιδής ενέργειας είναι απολύτως εφικτές. Πρακτικές εφαρμογές συλλογής ενέργειας εκτός από συστήματα τηλεπικοινωνιών μπορούν να βρουν εφαρμογές σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, όπως σε εργοστάσια για να παρακολουθούν εξ αποστάσεως συστήματα ή να ελέγχουν διαδικασίες. Έτσι, αυτά τα αυτοτροφοδοτούμενα ασύρματα δίκτυα μπορούν να έχουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, από γενικές υλοποιήσεις σε βιομηχανίες, καθώς και σε κυβέρνηση – στρατό.

1.2 Σκοπός

Η παρούσα διατριβή έχει ως στόχο την ανασκόπηση του ερευνητικού πεδίου στη ασύρματη συγκομιδή ενέργειας, των λύσεων, άλλα και των προβλημάτων που υπάρχουν αναφορικά με ζητήματα στη συλλογής ενέργειας (Energy Harvesting). Πρώτα θα παρουσιάσουμε μια επισκόπηση των συστημάτων συγκομιδής ενέργειας συμπεριλαμβανομένης και της αρχιτεκτονικής τους. Θα αναλυθούν οι διάφορες τεχνικές συλλογής ενέργειας, καθώς και οι πιθανές εφαρμογές τους σε συστήματα τηλεπικοινωνιών. Θα παρουσιάσουμε πώς οι τεχνικές συγκομιδής ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων μπορούν να επηρεάσουν υφιστάμενες εφαρμογές, το υπόβαθρο των κυκλωμάτων και ζητήματα σχεδιασμού στην ανάπτυξη δικτύων συγκομιδής ραδιοσυχνοτήτων. Ακόμη, θα εξετάσουμε διάφορα ζητήματα σχεδιασμού σύμφωνα με τον τύπο των δικτύων. Στόχος είναι να παρέχουμε μια ολοκληρωμένη έρευνα στον τομέα τις συλλογής ενέργειας και τις εφαρμογές του σε ασύρματα συστήματα. Η παρούσα μελέτη καλύπτει το σχεδιασμό κυκλώματος, πρωτόκολλα επικοινωνίας καθώς και σχέδια λειτουργίας σε διάφορους τύπους RF-EHNs.

Θα αναλύσουμε και θα εξηγήσουμε πρακτικά παραδείγματα όσο αφορά τις τεχνικές συλλογής ενέργειας για να :

- i. Ενημερώσουμε για την εφαρμογή αυτών των συστημάτων και να προσεγγίσει τις εφαρμογές σε συστήματα τηλεπικοινωνιών όπως, Internet of Things.
- ii. Αξιολογήσουμε τις δυνατότητες και αδυναμίες των συστημάτων.
- iii. Επιδείξουμε πώς μπορούν οι σύγχρονες αυτές τεχνικές να χρησιμοποιηθούν για να παρέχουν αντιμετώπιση σε προβλήματα που σχετίζονται με την αυτονομία συσκευών.

Στην προσπάθειά μας να κατανοήσουμε το θέμα της συλλογής ενέργειας, αλλά και να δούμε τη συμπεριφορά τέτοιων συστημάτων, θα εφαρμόσουμε μια διαδικασία μοντελοποίησης τους, όπου θα αναλυθούν τα χαρακτηριστικά καθώς και οι προδιαγραφές λειτουργίας τους. Πιο αναλυτικά :

- Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγή και αναφορά στον σκοπό της παρούσας διατριβής και στην αναγκαιότητα περαιτέρω έρευνας σε αυτό το τομέα.
- Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται μια επισκόπηση των τεχνολογιών Συγκομιδής Ενέργειας, καθώς και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας αυτών των τεχνολογιών.
- Στο 3^ο Κεφάλαιο γίνεται ανάλυση συστημάτων ελέγχου καθώς και σχετικά με το IoT.
- Στο 4^ο Κεφάλαιο γίνεται εκτενή αναφορά στα συστήματα 5ης γενιάς από τη θεωρία στη τεχνολογική δομή αυτών των συστημάτων.
- Στο 5^ο Κεφάλαιο παρατίθεται περιγραφή και ανάλυση κυκλωμάτων συγκομιδής ενεργείας, οι τεχνικές και μοντελοποίηση SWIPT, καθώς και οι γενικές προκλήσεις σε συστήματα συλλογής ενέργειας.
- Στο 6^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα είδη δικτύων, τα ασύρματα δίκτυα αναμεταδοτών, γίνεται σύγκριση μεταξύ των παραδοσιακών δικτύων και SWIPT. Ακόμη, παρουσιάζονται οι προκλήσεις των δικτύων συλλογής ενέργειας.
- Τέλος, στο 7^ο Κεφάλαιο κλείνουμε την παρούσα έρευνα.

1.3 Αναγκαιότητα

Η συγκομιδή ενέργειας από το περιβάλλον έχει γίνει πρόσφατα αντικείμενο μεγάλου ενδιαφέροντος, γιατί προσφέρει μια εναλλακτική μέθοδο για τροφοδότηση ασυρμάτων δικτύων.

Η εκμετάλλευση της προσφερόμενης ενέργειας από το περιβάλλον (όπως για παράδειγμα η ηλιακή ενέργεια, θερμική, αιολική και από μεταδιδόμενα ραδιοκύματα) μπορεί να προσφέρει δυνατότητες τροφοδοσίας σε απομακρυσμένους κόμβους, αισθητήρες και σε συστήματα χαμηλής κατανάλωσης.

Τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα έχουν πλέον καθοριστικό ρολό στην εποχή μας. Εχτός ότι μας προσφέρουν δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας και πληροφόρησης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σκοπούς τροφοδότησης ενέργειας.

Γι' αυτό, ο κλάδος των συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας το τελευταίο διάστημα ασχολείται με το συγκεκριμένο τομέα, που έχει να κάνει κυρίως με τη μεταφορά ενέργειας και τη συγκομιδή ραδιοσυχνοτήτων (RF).

Αυτή η αναδυόμενη τεχνολογία επιτρέπει την 'ανανέωση' ενέργειας σε ασύρματες συσκευές μέσω της εκμετάλλευσης περιβαλλοντικών ή τεχνικών πηγών.

Καθώς οι τεχνικές συγκομιδής ενέργειας θεωρούνται ως ένα ραγδαία εξελισσόμενο πεδίο των Πράσινων Επικοινωνιών (Green Communications), η θεωρητική μελέτη των δικτύων συλλογής ενέργειας μας οδηγεί σε μία ολοκληρωμένη αποτύπωση των ερευνητικών ζητημάτων της περιοχής.

Για να κατανοήσουμε πως μπορεί να μας βοηθήσει η συγκομιδή ενέργειας από το περιβάλλον, θα πρέπει πρώτα να λάβουμε υπόψη τις ιδιαιτερότητες, τα χαρακτηριστικά καθώς και τις απαιτήσεις της κάθε μεθόδου.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζουμε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τα πρόοδο της ερευνάς στα ασύρματα δίκτυα με δυνατότητες συγκομιδής ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων που αναφέρονται συνήθως ως δίκτυα συγκομιδής ενέργειας RF (RF -EHNs).

Η αναγκαιότητα που πηγάζει από την παρούσα μελέτη είναι ουσιαστική, γιατί εξετάζεται η βιωσιμότητα αυτών των τεχνικών.

Κύριος σκοπός αυτής της μελέτης, έχει να κάνει με την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας αυτών των δικτύων. Πρώτον, παρουσιάζουμε μια επισκόπηση των περιβαλλοντικών πηγών ενέργειας και των RF -EHNs, συμπεριλαμβανομένης της αρχιτεκτονικής των συστημάτων, των τεχνικών συγκομιδής ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων και τις υφιστάμενες εφαρμογές. Στη συνέχεια, παρουσιάζουμε το υπόβαθρο σχεδιασμού κυκλωμάτων καθώς και τις εφαρμογές κυκλωμάτων για SWIPT. Εξετάζουμε επίσης διάφορα βασικά ζητήματα σχεδιασμού στην ανάπτυξη δικτύων συλλογής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες, σύμφωνα με τους τύπους δικτύου. Τέλος, βλέπουμε μερικές ανοικτές προκλήσεις και συγκρίνουμε τις τεχνολογίες.

Κεφάλαιο 2

Ανασκόπηση Τεχνικών Συλλογής Ενέργειας

2.1 Εισαγωγή

Οι τεχνικές συλλογής ενέργειας (Energy Harvesting) και εφαρμογές τους σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα αποτελούν πλέον από τους πιο αναπτυσσόμενους και υποσχόμενους τομείς στον κόσμο της σύγχρονης τεχνολογίας. Η ιδέα ενσωμάτωσης διάφορων τεχνικών συλλογής ενέργειας σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα και ιδιαίτερα σε ασύρματα δίκτυα, προκειμένου να επεκταθούν οι δυνατότητες των δικτύων και να ολοκληρωθούν οι υπηρεσίες που προσφέρουν, παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον αλλά απαιτείται ακόμη έρευνα όσο αφορά στον σχεδιασμό και ανάπτυξη αυτών μέσα στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Τα ασύρματα δίκτυα και οι τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας συνιστούν πλέον μηχανισμούς στρατηγικής σημασίας για τους φορείς παροχής ασύρματων υπηρεσιών και δικτύων. Εκμεταλλευόμενοι την άμεση παραγωγή ενέργειας, χωρίς να χρειάζεται υφιστάμενο ηλεκτρικό δίκτυο, οι πάροχοι υπηρεσιών κοινής ωφέλειας μπορούν να προσφέρουν τις υπηρεσίες τους σε απομακρυσμένες περιοχές επιτρέποντας έτσι στους χρήστες να απολαμβάνουν τις υπηρεσίες τους αλλά και παράλληλα να επεκτείνονται και οι ίδιοι τα κέρδη τους. Τόσο η βελτίωση της απόδοσης όσο και η σταθερότητα των ασύρματων δικτύων αποτελούν βασικές έννοιες για τηλεπικοινωνιακά συστήματα και ιδιαίτερα για τους παρόχους δικτύων και υπηρεσιών. Με ενσωμάτωση αυτών των τεχνικών και τεχνολογιών μπορούν να διασφαλίσουν ομαλή λειτουργία σε δίκτυα και παράλληλα να επιτύχουν περαιτέρω οικονομικά οφέλη. Έτσι, οι τεχνολογίες Energy harvesting (EH) θεωρούνται ως σημαντικό συστατικό σε μελλοντικά ασύρματα δίκτυα και συσκευές, με σκοπό να μειωθεί η συχνή αλλαγή μπαταριών για μεγάλο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών, να περιοριστούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς και να εξαλειφθεί η εξάρτηση των ασύρματων τερματικών από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας [7].

Τα τελευταία χρόνια, αυτές οι τεχνολογίες αναπτύσσονται ιδιαίτερα κυρίως λόγω της συνεχώς αυξανόμενης προόδου των ηλεκτρονικών συσκευών και η ιδέα της αξιοποίησης τους λαμβάνεται σημαντικά υπόψη από τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους για τον καλύτερο σχεδιασμό των δικτύων και την επίτευξη μέσω αυτών υψηλότερων ποσοστών σταθερότητας και απόδοσης [8]. Η συγκομιδή της ενέργειας από το περιβάλλον μπορεί να προσφέρει ελκυστικές δυνατότητες για τους κόμβους σε ασύρματα δίκτυα. Επιπλέον, για να είναι φιλικά προς το περιβάλλον, τα δίκτυα συγκομιδής ενέργειας υπόσχονται σχεδόν συνεχή λειτουργία που είναι σημαντικό συστατικό για αυτόνομα δίκτυα, όπως τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Με την εφαρμογή αυτών των συγχρόνων μέσων και μηχανισμών, βασιζόμενοι σε βιβλιογραφία και μελέτες, θα παρουσιάσουμε πώς μπορούν να αξιοποιηθούν οι δυνατότητες τους, ως προς τη βιωσιμότητα τους και τις πιθανές υλοποιήσεις τέτοιων συστημάτων.

2.2 Επισκόπηση Τεχνολογιών Συγκομιδής Ενέργειας

Πώς μπορούμε να τροφοδοτήσουμε συστήματα ή απομακρυσμένες συσκευές για να μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα μόλις εγκατασταθούν σε μια τοποθεσία ;

Τη λύση μας την δίνουν τα συστήματα συγκομιδής ενέργειας, που μπορούν να βοηθήσουν ώστε να παρέχουν μέρος της λύσης στο πρόβλημα αυτό [14]. Σχεδόν όλες οι διαδικασίες που αφορούν τη μετατροπή ενέργειας είναι σε κάποιο βαθμό αναποτελεσματικές. Οι κινητήρες και οι ηλεκτροκινητήρες ζεσταίνονται, όπως κάνουν και τα τρανζίστορ ισχύος, οι λάμπες κ.λπ. Σε κάθε περίπτωση η ενέργεια χάνεται ως θερμότητα. Οι ραδιοφωνικοί σταθμοί μεταδίδουν ραδιοσυχνότητες (RF), αλλά τα σήματα μέχρι να φτάσουν στις κεραίες λαμβάνονται ως microwatts. Οι συσκευές συγκομιδής ενέργειας μπορούν να 'μαζέψουν' μέρος από αυτή την σπατάλη ενέργειας, να τη μετατρέψουν σε ηλεκτρική ενέργεια, 'βάζοντας τη' πίσω να δουλέψει. Οι πιο γνωστές μέθοδοι συλλογής ενέργειας είναι οι μεγάλοι ηλιακοί συλλέκτες και οι ανεμογεννήτριες, οι οποίες έχουν γίνει σημαντικές εναλλακτικές πηγές ενέργειας για τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αντίθεση, οι μικρές φορητές συσκευές πρέπει να βασίζονται σε ενεργειακά συστήματα συγκομιδής που μπορούν να 'μαζέψουν' milliwatts ενέργειας από το φως, τις δονήσεις, θερμικές, ή βιολογικές πηγές. Ενώ οι μακροπρόθεσμες πηγές καυσίμου, όπως το φως του ήλιου, η θερμότητα ή δονήσεις είναι όντως δωρεάν, αυτές οι πηγές είναι εγγενώς αναξιόπιστες και πολύ ευμετάβλητες. Σε αντίθεση με το ηλεκτρικό δίκτυο AC, η διαθεσιμότητα της πηγής ενέργειας πιθανόν να μην είναι εγγυημένη σε όλες τις περιοχές. Έτσι, εξακολουθεί να απαιτείται κάποιου είδους επένδυσης από πλευράς παροχών του συστήματος.

Υπάρχουν δύο βασικά βήματα που πρέπει να ακολουθήσουμε για τον καθορισμό της λύσης σε συστήματα συγκομιδής ενέργειας. Πρώτον, χρειαζόμαστε κύκλωμα μετατροπής ισχύος που μπορεί να μετατρέψει το σήμα χαμηλής τάσης από ένα μετατροπέα (όπως ηλιακά πάνελ ή θερμοηλεκτρική γεννήτρια), σε μια σταθερή, ρυθμιζόμενη έξοδο (όπως μικροελεγκτή, κ.λπ.) για να λειτουργήσει το υπόλοιπο σύστημα. Δεύτερον, χρειαζόμαστε στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας, όπως μπαταρίες ή μεγάλους πυκνωτές, που παρέχουν μια σταθερή πηγή ενέργειας στο σύστημα, όταν το περιβάλλον δεν το επιτρέπει (π.χ. είναι βραδύ και δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ενέργεια από τα ηλιακά πάνελ). Αυτά τα στοιχεία αποθήκευσης πρέπει να επιλέγονται για να παρέχουν αρκετή χωρητικότητα για να κρατήσουν τα συστήματα σε λειτουργία μέσα στην χρονική περίοδο που οι «δωρεάν» πηγές ενέργειας δεν μπορούν να παρέχουν έξοδο. Κατά την άποψη μου, θα ήταν καλό είναι μη χρησιμοποιούμε τέτοιου είδους συστήματα για κρίσιμες εφαρμογές, γιατί ενδέχεται να χρειαστούν πολλά στοιχεία αποθήκευσης για να είναι αξιόπιστα. Χάρης όμως σε εξαιρετικά χαμηλής ισχύος μικροελεγκτές η SoCs, οι συσκευές που μπορούν να μαζέψουν μικροϊσχύ ενέργειας μπορούν να παρατείνουν σημαντικά τη διάρκεια ζωής των μπαταριών σε καταναλωτικές, βιομηχανικές, και ιατρικές εφαρμογές όπου η αντικατάσταση της μπαταρίας μπορεί να είναι δύσκολη, ακριβή ή ακόμα και αδύνατη. Με προσεκτικό σχεδιασμό, συσκευές συγκομιδής ενέργειας μπορεί να αντικαταστήσουν ακόμα και μπαταρίες εντελώς σε ορισμένες εφαρμογές. Δεδομένου ότι η έξοδος από αυτές τις συσκευές συγκομιδής ενέργειας είναι συνήθως μικρή και διαλείπουσα,

τέτοια συστήματα πρέπει να σχεδιαστούν προσεκτικά και μπορεί να περιλαμβάνουν μετατροπέα τάσης, ρυθμιστής φόρτισης για τις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες Li-Ion, ρυθμιστή φορτίων, έναν μικροελεγκτή, αισθητήρες, και μια ασύρματη μονάδα σύνδεσης. Όσο πιο 'συμπαγής' μια συσκευή συγκομιδής ενέργειας μπορεί να γίνει (περικλείοντας την επεξεργασία και την παραγωγή) για να προμηθεύει τις συνολικές απαιτήσεις ενός ενσωματωμένου συστήματος, τόσο πιο εύκολα το σύστημα μπορεί να γίνει ελεύθερο από μπαταρίες.

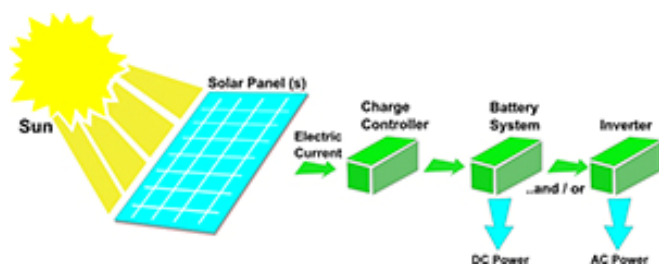
2.3 Πηγές Ενέργειας

Ας εξετάσουμε τις διάφορες πηγές ενέργειας για συλλογή, όπως είναι η ηλιακή, η θερμοηλεκτρική και οι κραδασμοί. Θα εξετάσουμε επίσης τις διαφορετικές αρχιτεκτονικές συστήματος για τις εφαρμογές, αν αυτό το σύστημα απαιτεί μόνο μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία ή ένα στοιχείο αποθήκευσης, ή ένα υβριδικό σύστημα με ένα επαναφορτιζόμενο στοιχείο, στην περίπτωση που δεν μπορεί να γίνει καμία συγκομιδή ενέργειας. Στη συνέχεια, θα εξετάσουμε τα ιδανικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος διαχείρισης – συλλογής ενέργειας. Τέλος, θα ρίξουμε μια ματιά στα διάφορα στοιχεία αποθήκευσης και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του καθενός [15]. Για να αποφασίσουμε ποιες τεχνολογίες συλλογής ενέργειας θα χρησιμοποιήσουμε, πρέπει να επανεξετάσουμε τις διάφορες πιθανές διαθέσιμες πηγές ενέργειας, η οποίες περιλαμβάνουν την ηλιακή, την θερμική, την δόνηση (κραδασμούς) και τις ραδιοσυχνότητες (RF). Από τις διάφορες διαθέσιμες τεχνολογίες για την ενεργειακή συλλογή, η ηλιακή ενέργεια είναι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη, γιατί έχει την υψηλότερη εκτιμώμενη δυνατότητα συλλογής ενέργειας, από 100 milliwatts ανά τετραγωνικό εκατοστό σε εξωτερικούς χώρους ενώ σε εσωτερικούς χώρους είναι περίπου (με εκτίμηση) 0,1 milliwatt ανά τετραγωνικό εκατοστό. Η θερμική ενέργεια είναι η επόμενη υψηλότερη ενδεχόμενη πηγή για παραγωγή ενέργειας, και μπορεί να αποκτηθεί από θερμικές πηγές πχ από το σώμα μας ή την παραγωγή θερμότητας από συσκευές ή μηχανές. Η ενέργεια μέσω κραδασμών (δονήσεων) είναι ακόμη μια πιθανή πηγή, αλλά το δυναμικό παραγωγής ενέργειας της είναι μικρότερη από το φως και θερμικές πηγές. Παρόλο που μπορούμε να ανακτήσουμε ενέργεια και από τα ηλεκτρικά σήματα που μεταδίδονται ασύρματα, οι εκτιμήσεις που δίνονται για συγκομιδή ενέργειας είναι χαμηλές και δεν είναι πιθανό να τις δούμε ως μια βιώσιμη πηγή συγκομιδής ενέργειας προς το παρόν. Ας μιλήσουμε λίγο για τις λεπτομέρειες των στοιχείων συλλογής ενέργειας, ξεκινώντας με ηλιακά κύτταρα.

2.3.1 Ηλιακή Ενέργεια

Τα ηλιακά κύτταρα αποτελούνται από μια σειρά από κόμβους P-N, και η λειτουργία τους βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Όταν το φως προσπίπτει στη διασταύρωση τους, τα φωτόνια με διάφορα ενέργειας μεγαλύτερη από την ενεργειακή ζώνη του υλικού απορροφούνται και δημιουργούν ζεύγη ηλεκτρονίων. Αυτοί οι κόμβοι διαχωρίζονται από την παρουσία του ηλεκτρικού πεδίου στη διασταύρωση τους και δημιουργούν ρεύμα που είναι

ανάλογο με την συχνότητα εμφάνισης της ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι, ένα ηλιακό κύτταρο (solar cell) μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια πηγή ρεύματος παράλληλα με μια δίοδο. Αύξηση φωτισμού σημαίνει αύξηση της παραγωγής, όμως έχει μικρή επίδραση επί της συνολικής τάσης του κυττάρου. Έτσι, μέσα από αυτές τις πληροφορίες, μπορούμε να 'σχεδιάσουμε' την ισχύ (power) ως μια συνάρτηση της τάσης (voltage). Μπορούμε επίσης να δούμε ποτέ η ισχύς είναι σε μέγιστη τιμή σε μια δεδομένη τάση και ρεύμα (current). Έχοντας ηλεκτρονικά κυκλώματα, τα οποία είναι σε θέση να μας δώσουν πληροφορίες πώς λειτουργεί το κύτταρο και σε τι ισχύ, είναι σημαντικό προτέρημα. Αξίζει να σημειώσουμε ότι το μέγιστο σημείο ισχύος από τα ηλιακά κύτταρα κυμαίνονται μεταξύ 70% και 80% της τάσης στο ανοικτό κύκλωμα, καθώς μπορούμε να συνδέσουμε τα ηλιακά κύτταρα είτε σε σειρά ή παράλληλα. Σε σειρά, θα καταλήξουμε με μια υψηλότερη τάση, αλλά η σκίαση ενός κυττάρου θα μειώσει την απόδοση του συνόλου της συστοιχίας, ενώ αν τα συνδέουμε μεταξύ τους παράλληλα αυτό θα οδηγήσει σε χαμηλότερη τάση, η οποία το πιο πιθανόν θα πρέπει να τύχει ενίσχυσης, ούτως ώστε να έχει αρκετή ισχύ για να μπορεί να τροφοδοτήσει τα τρέχουσα ηλεκτρονικά κυκλώματα, αλλά τυχόν σκίαση θα επηρεάσει μόνο ένα κελί. Το ηλιακό πάνελ αντιδρά σε διαφορετικά επίπεδα της ακτινοβολίας, με το μέγιστο σημείο της ισχύς του πάνελ να ποικίλει ανάλογα με την θερμοκρασία και παραμένει περίπου το ίδιο μέχρι η πηγή φωτός να είναι πολύ χαμηλή.



Σχήμα 2.1: Συλλογή ηλιακής ενέργειας

Πλεονεκτήματα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων	Μειονεκτήματα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων
Λειτουργούν αθόρυβα, καθαρά, χωρίς κατάλοιπα, αποφεύγοντας τη μόλυνση του περιβάλλοντος.	Το σχετικά υψηλό κόστος αγοράς και η έλλειψη επιδοτήσεων για οικιακούς καταναλωτές.
Λειτουργούν χωρίς κινητά μέρη, με ελάχιστη συντήρηση. Λειτουργούν χωρίς καύσιμα. Λειτουργούν και με νεφελώδη ουρανό (διάχυτη ακτινοβολία). Δεν χρησιμοποιούν υγρά ή αέρια σε αντίθεση με τα θερμικά συστήματα.	Τα φωτοβολταϊκά, όπως άλλωστε και όλες οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), έχουν υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης και ασήμαντο λειτουργικό κόστος, αντίθετα με τις συμβατικές ενεργειακές τεχνολογίες που συνήθως έχουν σχετικά μικρότερο αρχικό επενδυτικό κόστος και υψηλά λειτουργικά κόστη.

Κατασκευάζονται από πυρίτιο, ένα από τα πλέον εν αφθονία στοιχεία. Πλέον αποδοτικά σε χαμηλές θερμοκρασίες. Έχουν γρήγορη απόκριση σε ξαφνικές μεταβολές της ηλιοφάνειας.	Απαραίτητος ο περιοδικός καθαρισμός της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών πλαισίων για να αποφευχθεί η μείωση της απόδοσης από τη ρύπανση (αιθάλη, σκόνη, αλάτι θάλασσας κτλ).
Αν ένα κομμάτι πάθει βλάβη, το σύστημα συνεχίζει τη λειτουργία του μέχρι την αντικατάστασή του. Μεγάλες δυνατότητες σε μια ευρεία περιοχή ισχύων (από mW μέχρι MW).	Υπάρχει ανάγκη αποθήκευσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας των φωτοβολταϊκών λόγω ετεροχρονισμού φορτίου και παραγωγής.
Έχουν μεγάλο λόγο ισχύος/βάρους επομένως κατάλληλα για εγκατάσταση σε στέγες. Είναι κατάλληλα για επιτόπιες εφαρμογές όπου δεν υπάρχει ή δε συμφέρει η επέκταση του ηλεκτρικού δικτύου. Είναι δυνατόν να συναρμολογηθούν τυποποιημένα στοιχεία μαζικής παραγωγής σε σύστημα οποιουδήποτε μεγέθους για να καλύψουν μικρές, μέσες και μεγάλες ενεργειακές ανάγκες.	Έχουν μεγάλο λόγο ισχύος/βάρους επομένως μπορεί να μην είναι κατάλληλα για εγκατάσταση σε δύσβατες περιοχές.

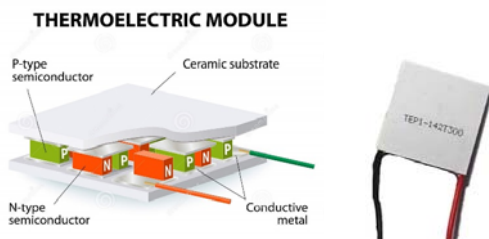
Πίνακας 2.1: Σύγκριση Φωτοβολταϊκών Συστημάτων Ηλιακής Ενέργειας [27]

2.3.2 Θερμική Ενέργεια (Θερμοηλεκτρική)

Θερμική ενέργεια ονομάζουμε την κινητική ενέργεια των μορίων λόγω των συνεχών και τυχαίων κινήσεών τους. Η θερμική ενέργεια είναι η μορφή ενέργειας που παράγεται από την τυχαία κίνηση των ατόμων και μορίων των ουσιών. Όσο πιο έντονη είναι η κίνηση αυτών, τόσο πιο θερμό γίνεται το σώμα. Πρόκειται ουσιαστικά για εσωτερική ενέργεια ενός συστήματος που βρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. Αυτή η θερμική ενέργεια που μεταφέρεται από ένα σώμα υψηλής θερμοκρασίας σε άλλο με χαμηλότερη θερμοκρασία, και ποτέ αντίστροφα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η κινητική ενέργεια των σωματιδίων του δεύτερου. Συνεπώς θερμική ενέργεια διαθέτουν όλα τα σώματα είτε αυτά είναι ζεστά είτε είναι κρύα. Απλά το θερμό σώμα έχει περισσότερη θερμική ενέργεια η οποία και διαδίδεται με διάφορους τρόπους όπως είναι η θερμική ακτινοβολία [20].

Η θερμοηλεκτρική τεχνολογία, μια τεχνολογία φιλική στο περιβάλλον, προσελκύει όλο και περισσότερο το ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, λόγω των πλεονεκτημάτων της και των πολλαπλών εφαρμογών της. Οι θερμοηλεκτρικές διατάξεις είναι διατάξεις στερεάς κατάστασης που χρησιμοποιούνται σε ολόένα και μεγαλύτερο αριθμό εφαρμογών, κυρίως σε εξειδικευμένες εφαρμογές ψύξης, αλλά και σε γεννήτριες παραγωγής ρεύματος, λόγω της ικανότητάς τους να μετατρέπουν την θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική και το αντίστροφο. Με δεδομένη την επιτακτική ανάγκη για εναλλακτικές μορφές ενέργειας, οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες παραγωγής ισχύος υπόσχονται σημαντικές εφαρμογές όσον αφορά την μετατροπή της συνήθως χαμένης θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια [24]. Θερμοηλεκτρικά στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συγκομιδή θερμικής ενέργειας από το

περιβάλλον. Όταν μια διάφορα θερμοκρασίας εφαρμόζεται κατά μήκος των δύο άκρων μιας θερμοηλεκτρικής συσκευής, μια ηλεκτρική τάση παράγεται μέσω του φαινομένου Seebeck. Η βασική μονάδα κατασκευής ενός θερμικού συλλέκτη είναι ένα θερμοστοιχείο. Το θερμοστοιχείο αποτελείται από ένα N-τύπου ηλεκτρικό υλικό σε σειρά με ένα υλικό τύπου P. Όταν μια διάφορα θερμοκρασίας εφαρμόζεται κατά πλάτος του υλικού, η θερμότητα αρχίζει να ρέει από τη θερμότερη προς τη ψυχρότερη πλευρά. Κατά τη διαδικασία, η ενέργεια από την εφαρμοζόμενη θερμότητα επιτρέπει στα ελεύθερα ηλεκτρόνια να κυκλοφορούν και να σχηματίσουν ηλεκτρικό δυναμικό και ροή ρεύματος αν υπάρχει κλειστό κύκλωμα. Μέρος της θερμότητας αντλείται από την μια πλευρά του ζεύγους και αποβάλλεται από την άλλη. Έτσι δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα ανάλογο της θερμικής ροής μεταξύ θερμών και ψυχρών επαφών.



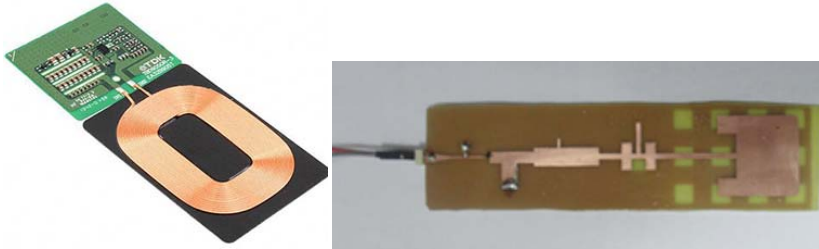
Σχήμα 2.2: Συλλογή θερμοηλεκτρικής ενέργειας, στοιχείο τύπου Peltier / TEC

2.3.3 Ενέργεια από ραδιοσυχνότητες

Η επικοινωνία μέσω ραδιοσυχνοτήτων (RF) χρησιμοποιείται εδώ και πάνω από εκατό χρόνια, ενώ οι τεχνολογίες μικροεπεξεργασιών εδώ και δεκαετίες. Κατά τα τελευταία χρόνια τα χαμηλής ισχύος κυκλώματα RF σε συνδυασμό με εξαιρετικά χαμηλής ισχύος κυκλώματα όπως μικροελεγκτές και αισθητήρες (ενότητα 3.3.2), επέτρεψαν πολλές νέες εφαρμογές και χρήσεις στα ασύρματα συστήματα [14].

Η συγκομιδή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας χρησιμοποιεί ένα μαγνητικό πεδίο για να μετατρέψει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα πηνίο επισυνάπτεται στην ταλαντευόμενη μάζα, όπου ένα μαγνητικό πεδίο την διαπερνά μέσα από έναν μόνιμο μαγνήτη. Το πηνίο ταξιδεύει μέσα από ένα διαφορετικό ποσό μαγνητικής ροής και επάγει τάση σύμφωνα με τον Νόμο του Faraday. Η επαγόμενη τάση από τέτοια κυκλώματα είναι εγγενώς μικρή και ως εκ τούτου πρέπει να αυξηθεί με την χρήση πηγής βιώσιμης ενέργειας. Μέθοδοι για την αύξηση της επαγόμενης τάσης περιλαμβάνουν τη χρήση ενός μετασχηματιστή, αύξηση του αριθμού των σπειρών του πηνίου ή και την αύξηση του μόνιμου μαγνητικού πεδίου. Ωστόσο, αυτό περιορίζεται από τους περιορισμούς μεγέθους των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Επιπρόσθετα κυκλώματα χρειάζονται, λόγω του ότι η συλλογή ενέργειας από ηλεκτρομαγνητικές πηγές δίνει στην έξοδο της εναλλασσόμενο ρεύμα και προκειμένου να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, χρειάζεται να προστεθεί ένας ανορθωτής γέφυρας (full bridge rectifier) προκειμένου να διορθωθεί η τάση που βγαίνει. Χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα κυκλώματα όπως διόδους, ανορθωτή, μικροελεγκτές κ.λπ.

μπορεί να επιτύχουμε μεγαλύτερες απολαβές (gain) για να βελτιωθεί η μέγιστη ισχύς από την πηγή [15]. Τυπικά, τα στοιχεία συλλογής ενέργειας μπορεί να είναι μια κεραία, μια συστοιχία κεραιών ή ένα επαγωγικό πηνίο (Σχήμα 2.3). Όταν ένα πηνίο είναι σωστά ρυθμισμένο, μπορεί να μεταφέρει πολύ αποτελεσματικά την ενέργεια ασύρματα, κάνοντας δυνατή τη χρήση ραδιοσυχνοτήτων RF για παραγωγή ενέργειας [25].



Σχήμα 2.3: Πηνίο λήψης - συλλογής για ασύρματες εφαρμογές ισχύος - rectenna [25]

2.3.4 Αιολική Ενέργεια

Αιολική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του ανέμου. Η ενέργεια αυτή, χαρακτηρίζεται "ήπια μορφή ενέργειας" και περιλαμβάνεται στις "καθαρές" πηγές, όπως συνηθίζονται να λέγονται οι πηγές ενέργειας που δεν εκπέμπουν ή δεν προκαλούν ρύπους. Η αιολική ενέργεια αποτελεί σήμερα μια ελκυστική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής. Το «καύσιμο» είναι άφθονο, αποκεντρωμένο και δωρεάν [21]. Σήμερα η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας γίνεται σχεδόν αποκλειστικά με μηχανές που μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική και ονομάζονται ανεμογεννήτριες. Σύμφωνα με μελέτες σχετικής βιβλιογραφίας, βλέπουμε ότι είναι πράγματι δυνατή η συγκομιδή αιολικής ενέργειας για χρήση σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, υπάρχουν όμως ορισμένοι περιορισμοί που αφορούν το μέγεθος – διαστάσεις των ανεμογεννητριών. Η εκμετάλλευση του αιολικής ενέργειας μπορεί να συμβάλει στην αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ταυτόχρονη εξοικονόμηση σημαντικών ποσοτήτων συμβατικών καυσίμων κάτι που συνεπάγεται αρκετά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

Σημαντικά πλεονεκτήματα της εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας είναι τα εξής :

α) Είναι τεχνολογία φιλική στο περιβάλλον: δεν προκαλούνται ρύποι από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

β) Η ηλιακή ενέργεια είναι ανεξάντλητη ενεργειακή πηγή, διατίθεται παντού και δεν στοιχίζει απολύτως τίποτα.

γ) Η λειτουργία του συστήματος είναι σχεδόν αθόρυβη.

δ) Έχουν σχεδόν μηδενικές απαιτήσεις συντήρησης.

ε) Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής: η εγγύηση των κρυστάλλων είναι γύρω στα 20 χρόνια.

στ) Υπάρχει πάντα η δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης, ώστε να ανταποκρίνονται στις αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών.

ζ) Διαθέτουν ευελιξία στις εφαρμογές: τα Φ/Β συστήματα λειτουργούν άριστα τόσο ως

αυτόνομα συστήματα, όσο και ως αυτόνομα υβριδικά συστήματα όταν συνδυάζονται με άλλες πηγές ενέργειας (συμβατικές ή ανανεώσιμες) και συσσωρευτές για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας.

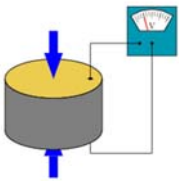
η) Προσφέρουν υψηλή και εγγυημένη απόδοση.



Σχήμα 2.4: Συλλογή αιολικής ενέργειας μέσω Ανεμογεννητριών [28]

2.3.5 Ενέργεια από Δόνηση (πιεζοηλεκτρική - κραδασμοί)

Πολλές πηγές ενέργειας από το περιβάλλον μπορούν να συλλεχθούν και να χρησιμοποιηθούν, όπως για παράδειγμα, η χρήση πιεζοηλεκτρικών συσκευών συγκομιδής που μπορούν να μετατρέψουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο μετατρέπει τη μηχανική καταπόνηση σε ηλεκτρικό ρεύμα ή ως τάση. Αυτή μπορεί να προέρχεται από πολλές διαφορετικές πηγές, όπως η ανθρώπινη κίνηση, οι σεισμικές δονήσεις χαμηλής συχνότητας και ο ακουστικός θόρυβος. Αυτό το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο -εχτός από σπάνιες περιπτώσεις- συνήθως λειτουργεί σε εναλλασσόμενο ρεύμα. Οι περισσότερες πιεζοηλεκτρικές πηγές ηλεκτρικού ρεύματος παράγουν ενέργεια της τάξεως των milliwatts, που είναι πολύ μικρή για την εφαρμογή του σε ένα σύστημα, αλλά είναι αρκετό για μια χειροκίνητη συσκευή όπως π.χ. για ένα ρολοί. Έτσι, τέτοιου είδους συλλέκτες έχουν συνήθως χρησιμότητα για συσκευές μικρής κλίμακας.



Σχήμα 2.5: Δημιουργία ενέργειας από δόνηση: Ένας πιεζοηλεκτρικός δίσκος παράγει μια τάση όταν παραμορφώνεται [4]

Άλλη μια γνωστή μέθοδος συλλογής μηχανικών κραδασμών είναι μέσω των λεγόμενων pickups. Τα pickups (transducer) είναι μια συσκευή τύπου μετατροπέα που μετατρέπει την ενέργεια από μια μορφή σε άλλη. Η διαδικασία μετατροπής μιας μορφής ενέργειας σε άλλη είναι γνωστή ως μεταγωγή. Συνήθως ο μετατροπέας μετατρέπει ένα σήμα από μια μορφή ενέργειας σε άλλη. Οι μετατροπείς - pickups χρησιμοποιούνται για να συλλαμβάνουν και να ανιχνεύσουν μηχανικούς κραδασμούς που παράγονται από μουσικά όργανα, όπως ηλεκτρική κιθάρα, ηλεκτρικό μπάσο, και μετατρέπουν αυτή την μορφή ενέργειας σε ηλεκτρικό σήμα το οποίο στη συνέχεια ενισχύετε για την παραγωγή ήχου. Οι περισσότερες ηλεκτρικές κιθάρες και ηλεκτρικά μπάσα χρησιμοποιούν μαγνητικά pickups, ενώ οι ακουστικές κιθάρες χρησιμοποιούν πιεζοηλεκτρικά pickups.



Σχήμα 2.6: Pickups από ηλεκτρική κιθάρα. Το πηνίο είναι ένα είδος μαγνητικού μετατροπέα που μετατρέπει την ηλεκτρομαγνητική δόνηση των χορδών σε ηλεκτρικό σήμα.

2.4 Σύγκριση τεχνολογιών Συλλογής Ενέργειας

Ο πιο κάτω πίνακας παρουσιάζει συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διαφορετικών πηγών ενέργειας.

Πηγή Ενέργειας	Πυκνότητα ισχύος	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Ηλιακή ενέργεια	15 mW / cm ³	Επαρκής ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας, με υψηλή τάση εξόδου.	Δεν υπάρχει ενέργεια την νύκτα.
Θερμοηλεκτρική	40 uW / cm ²	Μεγάλη διάρκεια ζωής, αξιόπιστη και χαμηλή συντήρηση.	Χαμηλή απόδοση στη μετατροπή ενέργειας.
Ραδιοσυχνότητες	1 uW / cm ²	Αρκετή σε αστικές περιοχές.	Περιορισμένη (λίγη) σε ημιαστικές περιοχές.
Αιολική	1 mW / cm ²	Επαρκής σε ορισμένο χώρο και χρόνο.	Μεγάλο μέγεθος συλλέκτη .
Δόνηση (πιεζοηλεκτρική)	200 uW / cm ³	Χωρίς πηγή τάσης.	Εύθραυστα υλικά.

Πίνακας 2.2: Σύγκριση Τεχνολογιών Συλλογής Ενέργειας

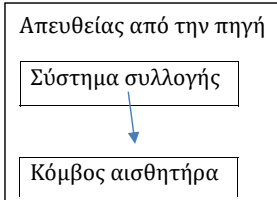
2.5 Αρχιτεκτονικές Συγκομιδής και χρήσης Ενέργειας

Το τρέχον ερευνητικό ενδιαφέρον για τη συγκομιδή ενέργειας εστιάζεται σε ανεξάρτητα δίκτυα αισθητήρων με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Σε τέτοιες εφαρμογές το σύστημα συγκομιδής ενέργειας τοποθετεί την ενέργεια που αποθηκεύεται σε έναν πυκνωτή και κατόπιν αυτή ενισχύεται και ρυθμίζεται από έναν δεύτερο πυκνωτή αποθήκευσης ή μια μπαταρία για χρήση στον μικροεπεξεργαστή (ενότητα 3.2). Η ισχύς χρησιμοποιείται συνήθως σε μια εφαρμογή αισθητήρα και τα δεδομένα μπορούν να αποθηκευτούν ή να μεταδοθούν μέσω ασύρματων δικτύων.

Σε γενικές γραμμές, η συγκομιδή ενέργειας μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες :

1. Harvest-Use, Συλλογής-Χρησιμοποίησης: Η ενέργεια συλλέγεται για άμεση χρήση, δηλαδή πραγματοποιείται άμεση κατανάλωση της συλλεγόμενης ενέργειας καθώς δεν υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης της.

Το πιο κάτω σχήμα 2.7 δείχνει την αρχιτεκτονική τύπου Harvest-Use. Σε αυτή την περίπτωση το σύστημα συγκομιδής εξάγει άμεσα την ενέργεια στον κόμβο και έτσι για να είναι λειτουργικό αυτό το σύστημα η ισχύς εξόδου από τη συλλογή πρέπει να είναι συνεχής για να λειτουργήσει. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν δεν υπάρχει ενέργεια, ο κόμβος δεν θα λειτουργεί. Σε περιπτώσεις όπου έχουμε μεταβολή της παρεχόμενης πηγής, ο κόμβος αισθητήρα θα ταλαντεύεται σε ON και OFF κατάσταση. Ένα παράδειγμα αυτών των συστημάτων μπορεί να είναι η δόνηση και πιεζοηλεκτρικά.

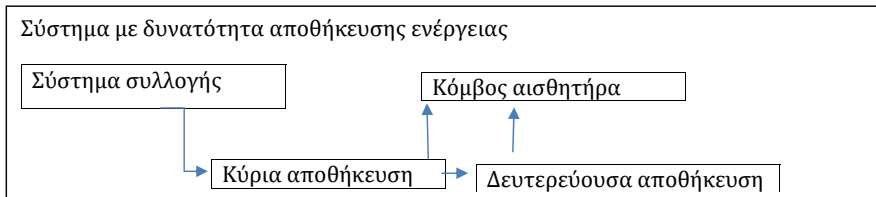


Σχήμα 2.7 Harvest-Use : Συγκομιδή-Χρήση

2. Harvest-Store-Use, Συλλογής-Αποθήκευσης-Χρησιμοποίησης : Είναι δυνατή η αποθήκευση της συλλεγόμενης ενέργειας. Οπότε είναι δυνατόν η ενέργεια να αποθηκεύεται για μελλοντική χρήση.

Το σχήμα 2.8 δείχνει την αρχιτεκτονική τύπου Harvest-Store-Use. Σε αυτή την περίπτωση, το σύστημα αποτελείται από στοιχείο αποθήκευσης που αποθηκεύει την ενέργεια και ενεργοποιεί τον κόμβο του αισθητήρα. Η αποθήκευση ενέργειας είναι χρήσιμη όταν έχει συγκεντρωθεί αρκετή (ή μεγαλύτερη) ενέργεια από την τρέχουσα χρήση σε ικανοποιητικό επίπεδο για τη λειτουργία του συστήματος. Η αποθήκευση ενέργειας είναι χρήσιμη σε περιπτώσεις όταν δεν υπάρχει ευκαιρία συλλογής ενέργειας ή όταν η υπάρχουν αυξημένες ανάγκες κατανάλωσης ενέργειας από τον κόμβο. Ένα παράδειγμα αυτών των συστημάτων

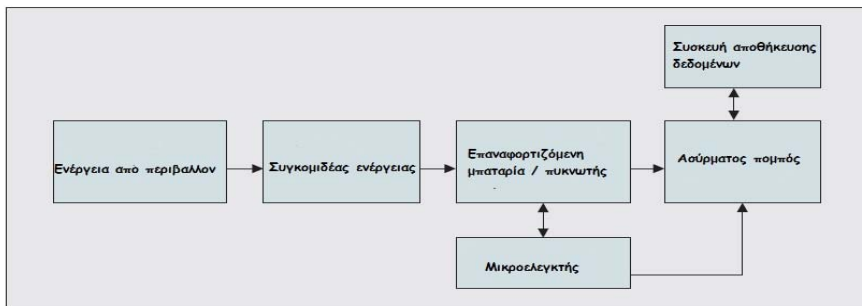
είναι σε συστήματα ηλιακής ενέργειας. Κατά τη διάρκεια της μέρας η ενέργεια χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του συστήματος και επίσης αποθηκεύεται για μελλοντική χρήση. Ενώ κατά την διάρκεια της νύχτας η αποθηκευμένη ενέργεια χρησιμοποιείται για σκοπούς τροφοδοσίας του συστήματος.



Σχήμα 2.8 Harvest-Store-Use : Συλλογή-Αποθήκευση-Χρησιμοποίηση

2.6 Αποθήκευση Ενέργειας

Σε γενικές γραμμές, η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε πυκνωτές ή μπαταρίες. Οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται όταν η εφαρμογή χρειάζεται να προσφέρει αιχμή ενέργειας, ενώ οι μπαταρίες δίνουν λιγότερη ενέργεια και επομένως χρησιμοποιούνται όταν η συσκευή χρειάζεται να παρέχει σταθερή ροή ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια, είναι αποθηκευμένη στην επαναφορτιζόμενη μπαταρία ή στον πυκνωτή, για να μπορεί να παρέχει την απαραίτητη ενέργεια για τον μικροελεγκτή και για τον ασύρματο πομπό.



Σχήμα 2.9: Πρακτικό διάγραμμα μοντέλων συστημάτων Συγκομιδής Ενέργειας .

Ο τρόπος και το μέσο αποθήκευσης ενέργειας κατέχει σημαντικό ρόλο και στα συστήματα συλλογής ενέργειας. Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες με διαφορετικές ιδιότητες όπως είναι η διάρκεια ζωής τους, η πυκνότητα ενέργειας (energy density), η πιθανότητα διαρροής (leakage), ο αριθμός των κύκλων φόρτισης (charge cycle), η πυκνότητα ισχύος κ.λπ. Λόγω αυτών των ιδιοτήτων, είναι σημαντική η μελέτη των διαφορών τους με σκοπό την σωστή

επιλογή του μέσου αποθήκευσης [51].

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο σε ένα σύστημα συγκομιδής ενέργειας και ως εκ τούτου η επιλογή των στοιχείων αποθήκευσης και της τεχνολογίας αποθήκευσης είναι πρωταρχικής σημασίας. Οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες είναι μια κοινή λύση για αποθήκευση ενέργειας και μπορεί να αποτελούνται από διάφορες τεχνολογίες, όπως μόλυβδου - Lead Acid (SLA), νικέλιου καδμίου - Nickel Cadmium (NiCd), Nickel Metal (NiMH) και ιόντων λίθου Lithium Ion (Li-ion). Όπως αναφέραμε προηγουμένως αυτές οι τεχνολογίες μπαταριών μπορούν να χαρακτηριστούν σε διάφορους τομείς, όπως είναι η ενέργεια, η πυκνότητα ισχύος, η απόδοση αποφόρτισης – επαναφόρτισης. Οι κύριες τεχνολογίες μονάδων αποθήκευσης ενέργειας είναι:

- Μπαταρίες : Σε δίκτυα συγκομιδής ενέργειας είναι σύνηθες φαινόμενο να χρησιμοποιούνται επαναφορτιζόμενες μπαταρίες για σκοπούς αποθήκευσης ενέργειας λόγω της υψηλής πυκνότητας ενέργειας που παρέχουν. Μερικά μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι μπαταρίες είναι η χαμηλή διάρκεια ζωής, η χαμηλή πυκνότητα ισχύος και αλλά πιθανά προβλήματα, όπως π.χ. διαρροές κ.λπ.
- Πυκνωτές : Δεν χρησιμοποιούνται πολύ συχνά για αποθήκευση ενέργειας, λόγω της μικρής ποσότητας που μπορούν να αποθηκεύσουν. Μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν όταν χρειαζόμαστε ένα μεγάλο φορτίο.
- Υπερπυκνωτές (supercapacitors) : Οι υπερπυκνωτές έχουν υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας σε σχέση με τους κοινούς πυκνωτές και υψηλή πυκνότητα ισχύος σε σχέση με τις μπαταρίες. Ακόμη, δεν αντιμετωπίζουν μη αναστρέψιμες χημικές αντιδράσεις, όπως οι μπαταρίες, για αυτό έχουν αμέτρητους κύκλους φόρτισης [51].

2.7 Σύνοψη

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάσαμε τις διάφορες πηγές συλλογής ενέργειας και τις βασικές αρχιτεκτονικές των συστημάτων. Η συλλογή και εκμετάλλευση ενέργειας από περιβαλλοντικές πηγές μπορεί να προσφέρει μεγιστοποίηση της αυτονομίας σε τηλεπικοινωνιακές συσκευές. Οι κατηγορίες χρήσης της ενέργειας χωρίζονται σε δυο τεχνικές. Της συλλογής-χρησιμοποίησης (Harvest-Use) όπου πραγματοποιείτε άμεση κατανάλωση τις συλλεγόμενης ενέργειας, καθώς δεν υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης της, και της Συλλογής-Αποθήκευσης-Χρησιμοποίησης (Harvest-Store-Use), όπου είναι δυνατή η αποθήκευση τις συλλεγόμενης ενέργειας. Κλείνοντας αυτό το κεφάλαιο μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι στα συστήματα συλλογής ενέργειας απαιτείται κάποιο αρχικό κόστος για τα προστιθέμενα κυκλώματα (όπως SoCs, μικροελεγκτές), και για τα στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας (όπως μπαταρίες ή πυκνωτές) για να μπορούμε να επωφεληθούμε από την διαθέσιμη περιβαλλοντική ενέργεια. Με την χρήση τεχνικών συγκομιδής ενέργειας SE, μπορούμε ουσιαστικά να τροφοδοτούμε απομακρυσμένους κόμβους - αισθητήρες και άλλο εξοπλισμό,

Commented [DV1]: Προτιμώ «Σύνοψη» ή «Ανακεφαλαίωση» και να υπάρχει ομοιομορφία σε όλα τα υπόλοιπα κεφάλαια.

για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς να χρειαστεί να αλλάζουμε συχνά μπαταρίες ώστε να διατηρηθούν σε λειτουργία.

Κεφάλαιο 3

Γενικές αρχές και συστατικά συστημάτων Συλλογής Ενέργειας

3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναπτύξουμε τον τρόπο λειτουργίας των συστημάτων και πως αυτά μπορούν να επεξεργαστούν και να μεταφέρουν πληροφορίες και δεδομένα στους κόμβους ή σε μονάδες επικοινωνιών. Θα μιλήσουμε για τους μικροελεκτές ή αλλιώς SoC που παίζουν σημαντικό ρόλο στα συστήματα IoT, τις εφαρμογές τους και πώς αυτά υλοποιούνται σε συστήματα IoT για συλλογή ενέργειας. Θα συγκρίνουμε τους αισθητήρες συλλογής ενέργειας που είναι το κύριο συστατικό σε ασύρματες συσκευές. Θα δούμε πώς αυτοί παρέχουν τεχνολογίες ασύρματης τροφοδοσίας ρεύματος μέσω τεχνολογιών συγκομιδής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες και εφαρμογές που χρησιμοποιούν ραδιοκύματα. Στη συνέχεια, θα δούμε πώς όλα μαζί τα συστήματα και οι τεχνολογίες μπορούν να δέσουν μεταξύ τους για να επιτρέψουν συγκομιδή, φόρτιση μπαταριών ασύρματα και τροφοδοσία συσκευών χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Αξίζει να αναφέρουμε ότι η λαμβανόμενη ισχύς από τέτοια συστήματα συγκομιδής ενέργειας συνήθως αναφέρεται στο εύρος των microwatt έως χαμηλών milliwatt.—Γι' αυτό, η ενσωμάτωση κυκλωμάτων συγκομιδής ενέργειας σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα παίζει καθοριστικό ρολό στην αύξηση της διάρκειας ζωής τους. Ακόμη, με ενσωματωμένες δυνατότητες δικτύωσης, οι αισθητήρες που είναι σε θέση να αντληφθούν το περιεχόμενό τους, θα μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους και να έχουν πρόσβαση σε υπηρεσίες IoT (όπως για παράδειγμα για να παρέχουν δυνατότητες απομακρυσμένης παρακολούθησης και διαχείρισης).

3.2 Επεξεργαστές Soc και αΑισθητήρες συλλογής ενέργειας

Είμαστε τώρα σε μια εποχή όπου πολλοί από εμάς προσδοκούν ότι τα κινητά και οι άλλες συσκευές που έχουμε ή κουβαλάμε μαζί μας να κάνουν αρκετά πράγματα, όπως οι υπολογιστές μας. Την τελευταία δεκαετία έχει γίνει τεράστια ανάπτυξη στον τομέα των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, ενώ ένα μεγάλο μέρος της ανάπτυξης έχει οδηγηθεί από τις εξελίξεις στα συστήματα σε ένα τσιπ (SoC). Όταν λεμέ για αυτά τα συστήματα εννοούμε ότι εμπεριέχουν όλες τις κρίσιμες λειτουργίες που μια συσκευή (π.χ. ένα κινητό τηλέφωνο) χρειάζεται για να λειτουργήσει, όπως επεξεργαστή, μνήμη – αποθήκευση και ελεγκτές εισόδου - εξόδου. Σε αντίθεση με έναν τυπικό υπολογιστή είναι ότι το μεγαλύτερο μέρος αυτών των λειτουργιών αντιμετωπίζονται από διαφορετικά εξαρτήματα που θα πρέπει να εγκατασταθούν ξεχωριστά ή είναι ήδη εγκατεστημένα σε μια μητρική πλακέτα. Από την άλλη πλευρά, τα συστήματα SOC ενσωματώνουν πολλαπλές ή ακόμη και όλες αυτές τις λειτουργίες σε ένα κομμάτι πυριτίου, που μπορεί να είναι το ίδιο μέγεθος ή ακόμη μικρότερο από ότι σε ένα συμβατικό επεξεργαστή.

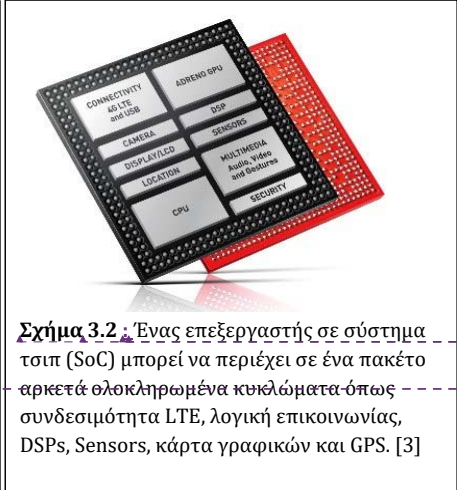
Πώς μπορούν όμως όλα αυτά να χωρέσουν σε ένα μόνο τσιπ; Η απάντηση μπορεί να δοθεί στο ότι οι φορητές συσκευές (όπως κινητά και tablets) λειτουργούν κυρίως από μπαταρία, έτσι πολλά από τα εξαρτήματα στο εσωτερικό μιας συσκευής πρέπει να απορροφούν πολύ λιγότερη ενέργεια για να παράγουν λιγότερη θερμότητα. Αυτό σημαίνει ότι οι κατασκευαστές πρέπει να βρουν τρόπους εξοικονόμησης ενέργειας και αυτό μεταφράζεται σε λιγότερο ενεργοβόρα εξαρτήματα με λιγότερα τρανζίστορ που τα καθιστά φυσικά μικρότερα. Όμως μικρότερο μέγεθος δεν σημαίνει ότι είναι κατ' ανάγκη κακό, αντιθέτως πολλά mid-range και higher-end Systems on a Chip (SoC) μπορούν να έχουν ομαλή απόδοση διότι χρησιμοποιούν την ARM αρχιτεκτονική που τρέχει μικρότερες και πιο απλές οδηγίες έτσι κάνει την επεξεργασία ευκολότερη, αν και ίσως λιγότερο ευέλικτη.

Τα συστήματα Systems on a Chip (SoC) είναι ουσιαστικά ολοκληρωμένα κυκλώματα (integrated circuit IC) που ενσωματώνουν όλα τα στοιχεία ενός υπολογιστή ή άλλου ηλεκτρονικού συστήματος σε ένα ενιαίο τσιπ. Μπορεί να περιέχουν ψηφιακά, αναλογικά, και μικτού σήματος λειτουργίες όλα σε ένα ενιαίο υπόστρωμα τσιπ (chip) ραδιοσυχνοτήτων. Τα SoCs είναι πολύ συνηθισμένα στην αγορά κινητής και ηλεκτρονικών, λόγω της χαμηλής κατανάλωσης ισχύος τους. Μία τυπική εφαρμογή τους είναι στον τομέα των ενσωματωμένων συστημάτων και στις τηλεπικοινωνίες. Αυτή η έννοια της ενσωμάτωσης συστημάτων στην αγορά υπολογιστών δεν είναι καινούργια ιδέα και δεν περιορίζεται μόνο στην αγορά των SoCs. Η τάση αυτή πηγαιίνει πίσω δεκαετίες, κάτι που μπορούμε να το παρατηρήσουμε από την Intel να είναι η πρώτη που μετακίνησε την μνήμη Cache, που η οποία κάποτε ήταν σε εξωτερικό τσιπ και έπρεπε να συνδέσουμε στην μητρική πλακέτα με τον επεξεργαστή. Ακόμη μια πρόσφατη εφαρμογή σε αυτό τον τομέα έρχεται από την AMD που πλέον ενσωματώνει τον εκλεχτή μνήμης εντός του επεξεργαστή, που κάποτε ήταν ακόμη ένα ξεχωριστό chip στην πλακέτα. Αυτό με την πρώτη ματιά μπορούσε να έμοιαζε αρχικά ότι αύξανε την πολυπλοκότητα του επεξεργαστή, αλλά στην πραγματικότητα η μεγάλη μείωση στο χρόνο πρόσβασης στην μνήμη (cache memory access latency), με το να φέρουμε πιο κοντά τα κατασκευαστικά στοιχεία μεταξύ τους, περισσότερο αντισταθμίζει το επιπρόσθετο κόστος και έρευνα που χρειάζεται. Αυτό ισχύει στον τομέα των ηλεκτρονικών όπου τα ολοκληρωμένα κυκλώματα τώρα ωθούνται ως all-in-one λύσεις για διάφορες υπολογιστικές εργασίες. Με την σταδιακή εξέλιξη της τεχνολογίας, παρατηρούμε ότι οι νέοι επεξεργαστές μπορούν να περιέχουν πολλά ολοκληρωμένα κυκλώματα στο μέγεθος ενός γραμματοσήμου. Έτσι, το να είμαστε σε θέση να χωρέσουμε τα εξαρτήματα εκτός από απλώς ένα επεξεργαστή σε ένα τσιπ επιτρέπει τεράστιες προόδους στην κινητή τεχνολογία.

Στα σχήματα 3.1 και 3.2 μπορούμε να παρατηρήσουμε μερικά παραδείγματα. Αυτοί οι μικροελεκτές μπορούν να βρεθούν σε δίκτυα αισθητήρων σε ενσύρματες ή ασύρματες συσκευές. Με την υλοποίηση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε συστήματα συλλογής ενέργειας μπορούμε να έχουμε έλεγχο και παρακολούθηση των συστημάτων αυτών, καθώς και να έχουμε μια πιο πλήρη εικόνα όσο αφορά τις λειτουργίες ενός τέτοιου συστήματος. Ακόμη, μπορούμε να έχουμε έλεγχο όσο αφορά στις παραμέτρους ρυθμίσεις και κατά συνέπεια στην απόδοση της πλατφόρμας.



Σχήμα 3.1 Το Raspberry Pi χρησιμοποιεί ένα σύστημα σε ένα τσιπ (SoC) ως ένα πλήρως ενσωματωμένο μικροϋπολογιστή. [1]



Σχήμα 3.2 Ένας επεξεργαστής σε σύστημα τσιπ (SoC) μπορεί να περιέχει σε ένα πακέτο αρκετά ολοκληρωμένα κυκλώματα όπως συνδεσιμότητα LTE, λογική επικοινωνίας, DSPs, Sensors, κάρτα γραφικών και GPS. [3]

- Formatted: Font: 11 pt, Bold
- Formatted: Font: Bold
- Formatted: Font: Bold, Greek
- Formatted: Greek
- Formatted: Font: Bold
- Formatted: Font: Bold, Greek
- Formatted: Greek

3.2.2 Αισθητήρες συλλογής ενέργειας

Οι δέκτες συλλογής ενέργειας είναι ενσωματωμένο ολοκληρωμένο κύκλωμα που παρέχει ανανεώσιμη ενέργεια από ασύρματες πηγές μετατρέποντας τα ραδιοκύματα σε ισχύ συνεχούς ρεύματος. Αυτό είναι το κύριο συστατικό για την ενεργοποίηση ασύρματων συσκευών. Η τεχνολογία όπως αυτή του Powercast έχει σχεδιαστεί για φόρτιση μπαταριών, άλλων συσκευών αποθήκευσης ενέργειας και για εφαρμογές άμεσης ισχύος. Γενικά οι αισθητήρες συλλογής ενέργειας αυτής της τεχνολογίας, μπορούν να ταξινομηθούν σε 2 κατηγορίες :

- Formatted: Greek
- Formatted: Greek

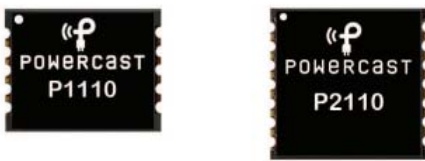
A. Μικρής εμβέλειας - υψηλότερης ισχύς (δέκτης P1110B)

- Είναι σχεδιασμένοι για φόρτιση μπαταριών και άμεση τροφοδοσία συσκευών. Υψηλή απόδοση για φόρτιση μπαταριών σε μικρή εμβέλεια.
- Έχει εύρος συχνομίδης από 850 - 950 MHz και εύρος συχνομίδης RF που φτάνει τα -6dBm ισχύ εισόδου.
- Λειτουργεί με τυπικές κεραίες 50 Ω.
- Παρέχει διαμορφώσιμη προστασία από υπέρταση έως 4.2V.
- Μπορεί να συνδεθεί απευθείας με επαναφορτιζόμενες μπαταρίες συμπεριλαμβανομένων των αλκαλικών, ιόντων λιθίου και Ni-MH.
- Παρέχει μέτρηση - ένδειξη ισχύος λαμβανομένου σήματος (RSSI) και έξοδο δεδομένων.

B. Μακριάς εμβέλειας (δέκτης P2110B)

- Είναι σχεδιασμένοι για φόρτιση πυκνωτών σε συσκευές χωρίς μπαταρίες ή ενεργειακών κυττάρων με μεγάλη αντίσταση εισόδου.
- Παρέχει διακοπτόμενη / παλμική έξοδο ισχύος.

- Εύρος συγκομιδής από 850 - 950 MHz και εύρος συγκομιδής RF που φτάνει μέχρι τα -11dBm ισχύ εισόδου.
- Λειτουργεί με τυπικές κεραίες 50 Ω.
- Διαμορφώσιμη, ρυθμιζόμενη τάση εξόδου έως 5.5V.
- Παρέχει διαχείριση ισχύος και έλεγχο εισόδου – εξόδου για βελτιστοποιημένο σύστημα.
- Έχει χαμηλή είσοδο RF για λειτουργία μεγαλύτερης εμβέλειας.
- Παρέχει ένδειξη ισχύος λαμβανομένου σήματος (RSSI) και έξοδο δεδομένων.
- Προσφέρει Interrupt - διακοπή, παύση υποσυστημάτων σε εξελεγμένα σύστημα.



Σχήμα 3.3 : Δέκτες συλλογής ενέργειας τύπου Powercast [34].

3.2.3 Πλεονεκτήματα χρήσης αισθητήρων συλλογής ενέργειας

Οι συσκευές που τροφοδοτούνται από την τεχνολογία με δέκτες αισθητήρων μπορούν να προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα όπως :

- Ενέργεια από απομακρυσμένες πηγές, απάλειψη σταθερών σταθμών βάσης φόρτισης.
- Επαναφόρτιση συσκευών χωρίς καλώδια.
- Τοποθέτηση συσκευών οπουδήποτε στον χώρο χωρίς περιορισμούς.
- Ταυτόχρονη φόρτιση πολλών μονάδων και πιθανότητα εξάλειψης θυρών φόρτισης.
- Παροχή δυνατοτήτων IoT σε προϊόντα εμπορικής φύσης.
- Βελτιωμένες επιλογές σχεδιασμού που αυξάνουν την απόσβεση του εξοπλισμού.
- Επέκταση διάρκειας ζωής συστημάτων.
- Τεχνολογικά οφέλη όπως υψηλή απόδοση, ευρεία περιοχή απόδοσης.
- Δυνατότητα συγκομιδής ενέργειας από πολλές συχνότητες ταυτόχρονα και ευκολία ανάπτυξης όταν χρησιμοποιούνται αποκλειστικοί πομποί.
- Ευκολία ενσωμάτωσης. Το μικρό μέγεθος επιτρέπει εύκολη ενσωμάτωση σε νέες συσκευές ή τροποποίηση υφιστάμενων συσκευών. Μπορεί να λειτουργήσει από πηγές RF στη σχεδιασμένη περιοχή ή με ειδικούς πομπούς ασύρματης μεταφοράς ενέργειας.
- Ικανότητα προσαρμογής. Η μονάδα μπορεί να προσαρμοστεί να λειτουργεί ανάλογα με την σωστή ζώνη συχνοτήτων που χρειαζόμαστε και ανάλογα με την εφαρμογή μας.

- Σχεδιασμός φιλικός προς το περιβάλλον.

3.3 Internet of Things (IoT)

Καθώς οι τεχνικές Συλλογής Ενέργειας θεωρούνται ως ένα ραγδαίο εξελισσόμενο πεδίο, αξίζει να αναφερθούμε σε μια τεχνολογία που μπορεί να 'δέσει' με αυτά τα συστήματα (EH) και να μας προσφέρει πολλές δυνατότητες όσο αφορά στην εφαρμογή και διαχείριση τους. Το IoT εξελίχθηκε με την γρήγορη διάδοση του ασύρματου Internet και των ενσωματωμένων αισθητήρων και έτσι οι άνθρωποι άρχισαν να αντιλαμβάνονται ότι η τεχνολογία θα μπορούσε να είναι επαγγελματικό εργαλείο αλλά και προσωπικό. Ο όρος "Internet of Things" (ή αλλιώς Διαδίκτυο των Πραγμάτων) επινοήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1990 από τον επιχειρηματία Kevin Ashton. Ο Ashton, ο οποίος είναι ένας από τους ιδρυτές του Auto-ID Center στο MIT, ήταν μέρος μιας ομάδας που ανακάλυψε τον τρόπο να συνδέσει τα αντικείμενα με το διαδίκτυο μέσω μιας ετικέτας RFID. Έχει δηλώσει ότι χρησιμοποίησε πρώτη φορά τη φράση "Internet of Things" σε μια παρουσίαση που έκανε το 1999 - και ο όρος αυτός έχει κολλήσει από τότε.

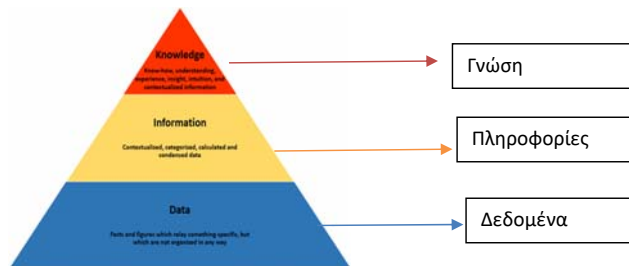
Formatted: Greek

Το Internet of Things είναι μία έννοια που αφορά τα αντικείμενα της καθημερινότητας μας, από βιομηχανικές μηχανές μέχρι φορητές (wearable) συσκευές που χρησιμοποιούν ενσωματωμένους αισθητήρες για τη συλλογή δεδομένων και την ανάληψη κάποιας δράσης σε αυτά, μέσα σε ένα δίκτυο. ΚάπωςΚάπως έτσι λειτουργεί ένα κτίριο που χρησιμοποιεί αισθητήρες (sensors) για την αυτόματη ρύθμιση της θέρμανσης ή του φωτισμού. Άλλο παράδειγμα είναι ο ένας εξοπλισμός παραγωγής που προειδοποιεί το προσωπικό συντήρησης για μία επικείμενη βλάβη. Μία υλοποίηση που μπορεί να χρησιμεύσει αρκετά μέσω IoT είναι σε συστήματα συλλογής ενέργειας όπου όλα θα είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους και μέσα από την γνώση που παίρνουμε με την χρήση αναλυτικών στοιχείων (analytics) θα οδηγή σε καλύτερη απόδοση. Με απλά λόγια το Internet of Things είναι το τεχνολογικό μέλλον που θα κάνει τη ζωή μας πιο εύκολη. Ουσιαστικά, το IoT είναι ένα δίκτυο αντικειμένων τα οποία περιέχουν μικροελεγκτές και αλληλοεπιδρούν με τον φυσικό κόσμο ώστε να δίνουν δεδομένα ή και να ενεργούν με αυτά. Όταν λέμε ενεργούν μπορούμε να αναφέρουμε σαν ένα παράδειγμα ότι ένα σύστημα αισθητήρων μπορεί να βλέπει ότι στο σπίτι έχει 34 βαθμούς κελσίου και να ανοίγει το κλιματιστικό, ώστε να καταφέρει να διατηρήσει 27 βαθμούς μέσα στο σπίτι. Άλλο ένα παράδειγμα που μπορούμε να αναφέρουμε θα ήταν ότι τέτοια συστήματα μπορούν να κλείνουν τις ανοιχτές συσκευές, φούρνους, θερμοσίφωνα, φώτα όταν δεν υπάρχει κανένας σπίτι. Στα συστήματα συλλογής ενέργειας τέτοιου είδους συσκευές θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη μεγιστοποίηση της αυτονομίας των τηλεπικοινωνιακών συσκευών. Το ίδιο μπορεί να ισχύει για διάφορα αλλά συστήματα που βασίζονται σε τεχνολογίες IoT. Το μεγαλύτερο πρόβλημα όμως αυτή την στιγμή στον κλάδο αυτό είναι πώς κάθε σύστημα έχει να επεξεργαστεί δεδομένα. Ο στόχος των δεδομένων είναι να γίνουν πληροφορία και έπειτα γνώση, ώστε να παρθούν αποφάσεις. Πώς διαχειριζόμαστε τα δεδομένα είναι πολύ σημαντικό. Εδώ έρχεται το cloud και η χρήση τεχνητής νοημοσύνης (AI) που διαχειρίζεται τα δεδομένα

Formatted: Greek

Formatted: Greek

και τις συσκευές. Έτσι, μέσω τεχνικών Machine Learning και AI, οι μηχανές μπορούν να μαθαίνουν και να αναλύουν τα δεδομένα παρά να ακολουθούν προγραμματισμένες ιδέες.



Σχήμα 3.4: Διαχείριση δεδομένων σε IoT. Η γνώση μετατρέπεται σε πληροφορία και μετέπειτα σε στοιχεία δεδομένων [15].

3.3.1 Σημαντικότητα του IoT

Το IoT (διαδίκτυο των πραγμάτων) μπορεί να είναι ένα δίκτυο κόμβων που συλλέγει δεδομένα από το περιβάλλον και να αλληλοεπιδρά με τον πραγματικό κόσμο. Το IoT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παρέχει υπηρεσίες ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ κόμβων με στόχο την λήψη δράσεων και αποφάσεων. Όταν λεμέ κόμβους εννοούμε διάφορες συσκευές, όπως την παράδειγμα αναμεταδότες, με ενσωματωμένους αισθητήρες δυνατότητες διασύνδεσης. Όπως θα δούμε στην συνέχεια υπάρχουν πάρα πολλές εφαρμογές του IoT σε διάφορους τομείς όπως της διαχείρισης περιβάλλοντος, των μεταφορών, της υγείας, των μεταφορών και επικοινωνιών [51].

Στις μέρες μας όλο και περισσότερες συσκευές έχουν δυνατότητες για αυτόματη μεταφορά δεδομένων μέσω ενός δικτύου χωρίς να απαιτείται η ανθρώπινη αλληλεπίδραση. Γιατί είναι όμως τόσο σημαντικό το Internet of Things (IoT) σε δίκτυα αισθητήρων; Το Internet of Things (IoT) στηρίζεται στην σταθερή πρόοδο του τομέα των ηλεκτρονικών, των τηλεπικοινωνιών και είναι τα τελευταία χρόνια το μεγαλύτερο 'hype' της τεχνολογικής αγοράς. Έως το 2020 υπολογίζεται ότι θα δαπανηθούν για υποστήριξη IoT υπηρεσιών περί τα εκατοντάδες εκατομμύρια δολάρια. Ενώ την ίδια χρονιά ο τζίρος του IoT θα φτάσει τα 20 τρις δολάρια [19]. Από τεχνική άποψη το IoT δεν είναι το αποτέλεσμα μιας ενιαίας τεχνολογίας, αλλά πρόκειται για πολλές συμπληρωματικές τεχνικές εξελίξεις και παρέχουν δυνατότητες που στο σύνολο τους και βοηθούν να γεφυρωθεί το χάσμα μεταξύ εικονικού και φυσικού κόσμου. _Μέχρι στιγμής οι συσκευές IoT είναι πιο στενά συνδεδεμένες με την επικοινωνία μηχανής σε μηχανής (M2M - Machine to machine), όπως σε δίκτυα αισθητήρων, σε βιομηχανίες, στον τομέα μεταποίησης ενέργειας, σε επιχειρήσεις καθώς και σε άλλους κλάδους. Οι συσκευές που έχουν δυνατότητες επικοινωνίας τύπου Machine to machine συχνά αναφέρονται ως 'έξυπνες συσκευές'. Έτσι εφαρμόζοντας τεχνολογίες IoT η δυνατότητα σύνδεσης στο Internet σε καθημερινά αντικείμενα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εξ αποστάσεως έλεγχο της κατάστασης τους, την συλλογή ενημερωμένων πληροφοριών και τη διαχείρισή τους. Αυτό διανοίγει τεράστιες δυνατότητες εφόσον μπορεί να επιφέρει διάφορες καινοτόμες υπηρεσίες

και σημαντικά οικονομικά οφέλη [29].

Μπορεί να εκπλαγούμε αν μάθουμε πόσα πράγματα είναι συνδεδεμένα με το διαδίκτυο, και πόσα οικονομικά οφέλη που μπορούμε να αποκομίσουμε από την ανάλυση των δεδομένων τους. Πιο κάτω μπορούμε να δούμε μερικά παραδείγματα των επιπτώσεων των τεχνολογιών τύπου Internet of Things σε διάφορους κλάδους:

1. Έξυπνες λύσεις μεταφοράς επιταχύνουν την ροή της κίνησης, μειώνουν την κατανάλωση καυσίμων, τα προγράμματα επισκευής οχημάτων και σώζουν ζωές.
2. Έξυπνα ηλεκτρικά δίκτυα (smart electric grids) συνδέουν πιο αποτελεσματικά ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, βελτιώνουν την αξιοπιστία του συστήματος και χρεώνουν τους καταναλωτές με βάση μικρότερες προσαυξήσεις.
3. Μηχανές αισθητήρων παρακολούθησης κάνουν διαγνώσεις και προβλέπουν θέματα συντήρησης που εκκρεμούν, βραχυπρόθεσμα stock-out αποθεμάτων, και θέτουν ακόμα και προτεραιότητες στα προγράμματα του προσωπικού που είναι υπεύθυνο για τις επισκευές για να καλύψουν αποτελεσματικότερα τις ανάγκες επισκευής εξοπλισμού αλλά και περιφερειακές ανάγκες.
4. Data-driven—συστήματα, χτισμένα στις υποδομές των «έξυπνων πόλεων» καθιστούν—ευκολότερο—για—τους δήμους να «τρέχουν» τις διαδικασίες διαχείρισης αποθεμάτων, την επιβολή του νόμου και άλλα προγράμματα, πιο αποτελεσματικά.
5. Χρήση του IoT όμως και σε προσωπικό επίπεδο. Συνδεδεμένες συσκευές χαράζουν τη δική τους πορεία τόσο στον κόσμο των επιχειρήσεων όσο και στη μαζική αγορά. Για παράδειγμα, ένα σύστημα ασφαλείας στο σπίτιιού σας, μπορεί να επιτρέπει να ελέγχετε από απόσταση τις κλειδαριές και τους θερμοστάτες σας και μπορεί να ρυθμίσει το κλιματιστικό ώστε να «δροσίσει» το σπίτιι σας και να ανοίξει τα παράθυρα [16].

Το Internet of Things στον σημερινό κόσμο φέρνει σημαντικό αντίκτυπο στην κοινωνία και αυτό είναι μόνο η αρχή. Το IoT είναι κάτι περισσότερο από μία ευκολία για τους καταναλωτές. Προσφέρει νέες πηγές δεδομένων και νέα επιχειρηματικά μοντέλα που μπορούν να ενισχύσουν την παραγωγικότητα σε διάφορους κλάδους.

Για παράδειγμα :

1. Υγειονομική Περίθαλψη. Πολλοί άνθρωποι έχουν ήδη υιοθετήσει wearable συσκευές για να παρακολουθούν την φυσική τους άσκηση, τον ύπνο ή άλλες συνήθειες τους – και αυτά είναι το πιο απλό δείγμα του πώς το IoT συνδυάζεται με τον κλάδο της υγείας.—Συσκευές παρακολούθησης ασθενών, ηλεκτρονικά αρχεία και άλλα έξυπνα αξεσουάρ μπορούν να σώσουν ζωές.
2. Βιομηχανική Παραγωγή. Πρόκειται για τον κλάδο που επωφελείται περισσότερο από το IoT. Αισθητήρες συλλογής δεδομένων ενσωματωμένοι σε μηχανήματα εργοστασίων ή στα ράφια των αποθηκών μπορούν να «επικοινωνήσουν» προβλήματα ή να παρακολουθούν τη χρήση των πόρων τους σε πραγματικό χρόνο, καθιστώντας το εύκολο να εργαστούν πιο αποτελεσματικά και να μειώσουν το κόστος.

3. Λιανεμπόριο. Τόσο οι καταναλωτές όσο και τα καταστήματα μπορούν να επωφεληθούν από IoT. Τα καταστήματα, για παράδειγμα, θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν IoT για ~~εφόπυςσκοπούς~~ παρακολούθησης των αποθεμάτων ή της ασφάλειας. Οι καταναλωτές μπορεί να έχουν μία εξατομικευμένη εμπειρία αγορών μέσω των δεδομένων που συλλέγονται από τους αισθητήρες ή τις κάμερες.

4. Τηλεπικοινωνίες.—Ο κλάδος των τηλεπικοινωνιών θα επηρεαστεί σημαντικά από το IoT, αρκεί να σκεφτεί κανείς ότι αυτός θα είναι ο κλάδος που θα διατηρεί όλα τα δεδομένα που χρησιμοποιεί το IoT. Smartphones και άλλες προσωπικές συσκευές πρέπει να είναι σε θέση να διατηρούν μια αξιόπιστη σύνδεση στο Διαδίκτυο για να λειτουργήσει αποτελεσματικά το Internet of Things.

5. Μεταφορές.—Ενώ τα αυτοκίνητα δεν έχουν φτάσει ακόμα στο σημείο να μετακινούνται αυτόνομα, είναι αναμφισβήτητα πιο τεχνολογικά προηγμένα από ποτέ.—Το IoT επηρεάζει επίσης το κλάδο των μεταφορών σε μεγάλη κλίμακα: οι εταιρείες διανομής μπορούν να παρακολουθούν το στόλο τους με τη χρήση GPS λύσεων. Και οι δρόμοι μπορούν να παρακολουθούνται μέσω αισθητήρων για να είναι όσο το δυνατόν ασφαλέστεροι.

6. Ενέργεια. Οι έξυπνοι μετρητές (smart meters), όχι μόνο συλλέγουν δεδομένα αυτόματα, αλλά καθιστούν και δυνατή την εφαρμογή analytics για την παρακολούθηση και τη διαχείριση της χρήσης της ενέργειας. Παρομοίως, αισθητήρες σε συσκευές όπως οι ανεμόμυλοι μπορούν να παρακολουθούν τα δεδομένα και να χρησιμοποιούν προγνωστική ~~μοντελοποίηση~~ ~~μοντελοποίηση~~ ώστε να προγραμματιστεί η διακοπή λειτουργίας για πιο αποδοτική χρήση της ενέργειας. Αυτές οι νέες δυνατότητες που προσφέρουν,—ανοίγουν συναρπαστικές προοπτικές και ενδιαφέρουσες δυνατότητες εφαρμογής αλλά επίσης συνοδεύονται από ουσιαστικές απαιτήσεις σχετικά με την υποκείμενη λειτουργία και υποδομή. Στην πραγματικότητα, η υποδομή για το IoT δεν πρέπει μόνο να είναι αποτελεσματική, επεκτάσιμη, αξιόπιστη και ασφαλής αλλά πρέπει να συμμορφώνεται με τις γενικές προσδοκίες και να είναι ευρέως εφαρμόσιμη [29].

3.3.2 Εφαρμογές του IoT σε Τηλεπικοινωνιακά συστήματα

Μερικά προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι εφαρμογές IoT έχουν να κάνουν με την μετάδοση, επεξεργασία και αποθήκευση μεγάλων όγκων δεδομένων.—Ακόμη ένα πρόβλημα στα συστήματα IoT είναι η τροφοδοσία των κόμβων. Σε αρκετές εφαρμογές οι κόμβοι μπορεί να εγκατασταθούν σε δυσπρόσιτες περιοχές όπου η σύνδεσή τους με κεντρικά συστήματα παροχής ενέργειας μπορεί να μην είναι εφικτή. Ακόμη, όταν οι κόμβοι αυτοί τροφοδοτούνται μέσω μπαταριών η αντικατάστασή τους μπορεί να είναι δύσκολη ή ακριβή. Για αυτό το λόγο οι τεχνικές συγκομιδής ενέργειας μπορεί να είναι μια εναλλακτική λύση για τροφοδότηση και επιμήκυνση της διάρκειας ζωής στους κόμβους.—Για τους κόμβους που απαιτούν αρκετά μικρή ενέργεια είναι πιθανόν να τροφοδοτούνται αποκλειστικά από την συλλογή ενέργειας μέσω πηγών περιβάλλοντος όπως από τα ηλεκτρομαγνητικά σήματα [51].

Κάθε φορά που εμφανίζεται μια νέα υποσχόμενη νέα τεχνολογία, οι ερευνητές ξεκινούν

μελέτες και πιλοτικά έργα βασισμένα σε αυτή. Μέρος αυτών των πρώτων έργων (project) αποτυγχάνει, όπως για παράδειγμα με την αποθήκευση δεδομένων και που σήμερα συμβαίνει με τα μεγάλης κλίμακας έργων (projects) IoT. Το θετικό είναι ότι κάθε αποτυχημένο έργο μπορεί να αποτελέσει ένα μάθημα, το οποίο σταδιακά θα οδηγήσει σε περισσότερα επιτυχημένα έργα IoT. Έτσι με έρευνα και ανάπτυξη νέων τεχνολογιών μπορούμε να φτάσουμε σε ένα σημείο όπου θα έχουμε πιο ισχυρά και ευέλικτα τεχνολογικά εργαλεία και πλατφόρμες, καλύτερες γνώσεις για την αντιμετώπιση εξωτερικών προβλημάτων και πολύ καλύτερη κατανόηση για τον τρόπο που θα πρέπει να τρέχουμε τα έργα IoT [18].



Σχήμα 3.5: Εφαρμογές IoT [26]

Στα συστήματα που 'κτίζονται' γύρω από το IoT, έχουν αναγνωριστεί από την αρχή ότι οι τεχνολογίες αναλυτικών στοιχείων (analytics) είναι ζωτικής σημασίας για τη μετατροπή της ροής δεδομένων σε κατατοπιστική και χρήσιμη γνώση. Αλλά πώς αναλύουμε τα δεδομένα καθώς «ρέουν» ασταμάτητα μέσα από τους αισθητήρες και τις συσκευές; Πώς αυτή η διαδικασία διαφέρει από τις άλλες κοινές μεθόδους ανάλυσης που υπάρχουν σήμερα; Στην παραδοσιακή ανάλυση, τα δεδομένα αποθηκεύονται και μετά αναλύονται. Ωστόσο, στην περίπτωση των δεδομένων συνεχούς ροής (streaming data) όπως αυτή στο IoT, τα μοντέλα και οι αλγόριθμοι είναι αυτοί που αποθηκεύονται και τα δεδομένα περνούν μέσα από αυτά τα συστήματα για ανάλυση. Αυτό το είδος της ανάλυσης καθιστά δυνατό τον εντοπισμό και την εξέταση μοτίβων καθώς τα δεδομένα δημιουργούνται - σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, πριν αποθηκευτούν τα δεδομένα, στο cloud ή σε οποιοδήποτε άλλο χώρο αποθήκευσης, υπόκειται σε επεξεργασία. Έπειτα, χρησιμοποιείται η μέθοδος των αναλυτικών στοιχείων (analytics) ώστε να αποκρυπτογραφούνται τα δεδομένα, ενώ όλοι οι συσκευές συνεχίζουν να εκπέμπουν και να λαμβάνουν δεδομένα. Με τεχνικές αναλυτικών στοιχείων (analytics), η ροή δεδομένων μπορεί να μας οδηγήσει πέρα από την απλή παρακολούθηση των υπαρχουσών συνθηκών και την αξιολόγηση των κατώτατων ορίων, στην πρόβλεψη μελλοντικών σεναρίων και στην εξέταση πολύπλοκων ερωτημάτων. Για να μπορεί όμως να εκτιμηθεί το μέλλον με τη χρήση αυτών των ροών δεδομένων (data streams), θα πρέπει να έχουμε τεχνολογίες υψηλής απόδοσης που μπορούν να προσδιορίζουν μοτίβα στα δεδομένα τη στιγμή που αυτά δημιουργούνται. Μόλις ένα μοτίβο αναγνωρίζεται, μετρήσεις ενσωματωμένες στη ροή δεδομένων, οδηγούν στην αυτόματη προσαρμογή των συνδεδεμένων συστημάτων ή δημιουργούν ειδοποιήσεις για άμεσες δράσεις και λήψη καλύτερων αποφάσεων. Ουσιαστικά,

αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να προχωρήσουμε πέρα από την απλή παρακολούθηση συνθήκων και ορίων στην εκτίμηση πιθανών μελλοντικών γεγονότων και στον προγραμματισμό τους για νέα σενάρια.

Σύμφωνα με βιβλιογραφίες υπάρχουν 2 βασικοί πυλώνες αποτυχίας σε ανάπτυξη νέων έργων σε υλοποιήσεις IoT:

- 1. Πολυπλοκότητα Ολοκλήρωσης.** Τα προγράμματα IoT συνδυάζουν τις υπάρχουσες πλατφόρμες δικτύωσης, τα εργαλεία συλλογής δεδομένων και τους υπολογιστικούς πόρους με νέους τρόπους.—Επιπλέον, ενσωματώνουν εντελώς νέα προϊόντα και υπηρεσίες. Τα νέα αυτά συστήματα πρέπει να “διανείμουν” τα σωστά δεδομένα στα σωστά χέρια, την κατάλληλη στιγμή και πρέπει να το κάνουν αυτό, τόσο στη σωστή κλίμακα όσο και με ταχύτητα.
- 2. Έλλειψη Εξειδίκευσης.**—Για να χρησιμοποιήσουμε αυτή τη νέα τεχνολογία, χρειαζόμαστε νέες δεξιότητες. Απαιτούνται νέα είδη συνεργασίας, για νέα σχέδια που πρέπει να συνδυαστούν με την πληροφορική. Όσο πιο ποικιλόμορφη είναι μια ομάδα που εργάζεται σε ένα έργο υποδομής, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα το αποτέλεσμα να είναι θετικό. Τα προγράμματα IoT σήμερα είναι σύνθετα και δεν πλαισιώνονται από αρκετούς έμπειρους ανθρώπους που να μπορούν να τα υποστηρίξουν. Κάτι τέτοιο, καθιστά τη μετάβαση από τη δημιουργία ενός έργου στην ολοκλήρωσή του, δύσκολη [18].

Στα επόμενα χρόνια τα εργαλεία IoT θα γίνουν πιο ισχυρά και πιο εύκολα στη διαχείριση κι έτσι, περισσότερα έργα που βασίζονται σε αυτά θα έχουν θετικά αποτελέσματα. Οι πάροχοι πληροφορικής με νέες τεχνολογικές λύσεις μπορούν να βοηθήσουν να φτάσουμε σε αυτό το σημείο, ενσωματώνοντας περισσότερη ευφυΐα στο ίδιο το δίκτυο και λανσάροντας εργαλεία που θα ενώνουν τα τεχνολογικά στοιχεία και τις διαδικασίες, με εύχρηστο τρόπο. Αφού βοηθήσουμε τους χρήστες τέτοιων συστημάτων να κατανοήσουν τα δίκτυα των συσκευών τους, θα τους βοηθήσουμε να συλλέξουν, να ταξινομήσουν και να εργαστούν στα δεδομένα που παράγουν αυτά τα συστήματα. Τα κλιμακούμενα εργαλεία φιλτραρίσματος και διανομής, εξασφαλίζουν ότι τα σωστά δεδομένα καταλήγουν στα σωστά δίκτυα, στις σωστές εφαρμογές, στα σωστά καταστήματα δεδομένων και στα σωστά άτομα. Χωρίς όμως ένα συναφές σύνολο εργαλείων και παρακολούθησης, ο πραγματικός κόσμος θα συνεχίσει να εμποδίζει την ανάπτυξη των IoT.—Πολλές φορές δεν υπάρχει ούτε αρκετή χωρητικότητα ή αξιοπιστία στο δίκτυο, για αυτό η πραγματική μετάβαση και περαιτέρω ανάπτυξη του διαδικτύου των πραγμάτων (IoT) θα έρθει με την άφιξη των δικτύων 5ης γενιάς. (κεφ.4)

3.3.3 Συγκομιδή ασύρματης ενέργειας σε IoT

Το διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) ως μια αναδυόμενη υπολογιστική έννοια περιγράφει μια δομή όπου τα καθημερινά αντικείμενα, μπορούν να συνδέονται με το διαδίκτυο χωρίς να απαιτείται ανθρώπινη αλληλεπίδραση.—Η μακροπρόθεσμη και η αυτοδύναμη λειτουργία τέτοιων—συστημάτων, ~~κρίνεται να~~ ως ~~βασικά~~ βασικά συστατικά για την

υλοποίηση ενός τέτοιου δικτύου, έτσι συνεπάγονται συσκευές με ενεργειακή γνώση, που είναι ικανές να μαζέψουν τη δική τους απαιτούμενη ενέργεια από τις πηγές περιβάλλοντος. Όπως αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, ανάμεσα στις διαφορετικές μεθόδους συγκομιδής ενέργειας, όπως π.χ. τη δόνηση, το φως και την εξαγωγή θερμικής ενέργειας, η συλλογή ασύρματης ενέργειας (wireless energy harvesting - WEH) έχει αποδείξει ότι είναι μια από τις πιο ελπιδοφόρες λύσεις δυνάμει της απλότητας, της ευκολίας εφαρμογής και της διαθεσιμότητας. Όπως γνωρίζουμε, το διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) είναι ουσιαστικά μια έξυπνη υποδομή μοναδικά αναγνωρίσιμων συσκευών ικανή να επικοινωνεί ασύρματα με το καθένα αλλά και με άλλες υπηρεσίες σε μεγάλη κλίμακα μέσω του διαδικτύου, και αφού το IoT στοχεύει να κάνει το διαδίκτυο πανταχού παρόν και διάχυτο, μπορεί να επηρεάσει πολλές πτυχές της όσο αφορά την ποιότητας ζωής των χρηστών. Οι δικτυωμένες ετερογενείς συσκευές που συνδέονται σε μια δομή IoT είναι τυπικά εξοπλισμένες με αισθητήρες, επεξεργαστές ελέγχου, ασύρματους πομποδέκτες και πηγή ενέργειας (π.χ. όπως μια μπαταρία) για να παρακολουθεί το περιβάλλον τους και να μπορεί να αποστείλει - λαμβάνει δεδομένα [22]. Ένα από τα κυρίαρχα εμπόδια στην εφαρμογή τέτοιων συστημάτων είναι η τροφοδοσία δηλαδή να μπορεί να παρέχει επαρκή ενέργεια για τη λειτουργία του δικτύου με ένα αυτόνομο τρόπο, χωρίς συμβιβασμούς στην ποιότητας των υπηρεσιών (QoS). Επομένως, είναι επιτακτική-η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης-και της παράτασης ζωής των συσκευών-στο διαδίκτυο. Αν και υπάρχουν πολλές υπάρχουν πολλές μέθοδοι για να επίτευξη ενεργειακής απόδοσης, όπως η χρήση ελαφριών πρωτόκολλων επικοινωνίας ή η ~~χρησιμοποίησης ραδιοφωνικών/ραδιοφωνικών πομποδέκτες/πομποδεκτών~~ χαμηλής ισχύος, οι πρόσφατες τεχνολογικές τάσεις στη συγκομιδή ενέργειας παρέχουν μια θεμελιώδη μέθοδο για την παράταση ζωής των μπαταριών. Έτσι, η συγκομιδή ενέργειας από το περιβάλλον είναι μια ελπιδοφόρα προσέγγιση για τις τεχνολογίες του IoT.

Οι τεχνολογίες συγκομιδής ενέργειας μπορούν να συλλέξουν κατευθυνόμενη ή περιβαλλοντική ενέργεια RF και να την μετατρέψουν σε ρεύμα συνεχής ισχύς (DC) για απομακρυσμένη επαναφόρτιση μπαταριών για χρήση σε συστήματα χωρίς μπαταρίες. Μερικές εφαρμογές των δεκτών συγκομιδής ενέργειας σε διάφορους τομείς όπως:

- Φόρτιση μπαταριών χωρίς επαφή (Contactless battery charging)
- Φόρτιση μπαταριών σε απομακρυσμένα συστήματα (Remote battery charging)
- Συστήματα ασύρματων αισθητήρων χωρίς μπαταρίες (battery free sensors)
- Οθόνες χαμηλής κατανάλωσης (όπως e-ink)
- Καταγραφή δεδομένων (data logging)
- Ενσωματωμένη/σωματωμένη μικρο-τροφοδοσία (embedded micro power)

Σε βιομηχανίες :

- Αυτοματισμοί κτηρίων
- Έλεγχος θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού
- Συστήματα διαχείρισης ενέργειας

- Συστήματα ασφαλείας και ελέγχου πρόσβασης;
- Παρακολούθηση περιουσιακών στοιχείων
- Άμυνα
- Διαρθρωτική παρακολούθηση (Structural Monitoring)

Πηγή ενέργειας	Χαρακτηριστικά	Απόδοση	Συλλεγομένη ισχύς
Ηλιακή	Εξωτερικοί χώροι	10 – 24 %	100 mV/cm ²
	Εσωτερικοί χώροι		100 μV/cm ²
Θερμική	Ανθρώπινη	~0.1%	60 μV/cm ²
	Βιομηχανική	~ 3%	~ 1-10 mV/cm ²
Δόνηση	Ανθρώπινη ~ Hz	25~50%	~ 4 μV/cm ²
	Βιομηχανική ~kHz		~ 800 μV/cm ²
RF Ραδιοσυχνότητες	GSM 900 Mhz	~50%	0,1 μV/cm ²
	WiFi		0,001 μV/cm ²

Formatted: Font color: Auto

Formatted: Font color: Auto

Formatted: Font color: Auto

Formatted: Font color: Auto

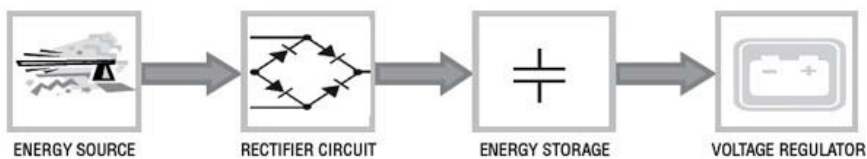
Πίνακας 3.1: Συλλογή ενέργειας σε IoT. Πάρα το γεγονός ότι οι πηγές RF από το περιβάλλον όπως το Wi-Fi και τα κυψελωτά GSM δίκτυα συνήθως απολαμβάνουν υψηλότερη απόδοση από άλλες πηγές, γενικά όμως έχουν χαμηλότερη ισχύ στη συγκομιδή [26].

3.4 Γενικές αρχές σχεδίασης συστημάτων συλλογής από ραδιοκύματα (RF)

Χάρη στην εκτεταμένη ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών, η διαθεσιμότητα της περιβαλλοντικής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες RF φαίνεται ως ελκυστική πηγή ενέργειας για χαμηλής ισχύος συσκευές. Η συγκομιδή ενέργειας από ραδιοσυχνότητες προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα για πολλές εφαρμογές, αλλά απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στα βασικά εξαρτήματα, συμπεριλαμβανομένων των κυκλωμάτων λήψης και των κυκλωμάτων ρύθμισης ισχύος που απαιτούνται για αυτήν την προσέγγιση. Ευτυχώς για τους μηχανικούς, ο αποδοτικός σχεδιασμός παραγωγής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες έχει καταστεί απλούστερος, χάρη σε διαθέσιμα εξαρτήματα και ολοκληρωμένα κυκλώματα από διάφορους κατασκευαστές που κυκλοφορούν ήδη στο εμπόριο ([ενότητα 3 κεφ3.2.23 Επεξεργαστές Soc_αισθητήρες](#)). Οι πηγές ενέργειας RF αφθονούν και υπόσχονται να επεκταθούν, καθώς οι καταναλωτικές και βιομηχανικές αγορές βασίζονται περισσότερο στις ασύρματες τεχνολογίες για κάθε είδους επικοινωνίες. Οι πηγές ενέργειας ραδιοσυχνότητων κυμαίνονται από

τεχνολογίες μικρής εμβέλειας, όπως Bluetooth και Wi-Fi, μέχρι τις τεχνολογίες μεγάλης εμβέλειας, όπως είναι οι υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας. Λόγω της αυξανόμενης διαθεσιμότητάς τους, η συγκομιδή ενέργειας από ραδιοσυχνότητες προσφέρει πολλαπλά οφέλη στο ίδιο το σχεδιασμό του συστήματος. Εκτός από τις μειωμένες απαιτήσεις σε καλωδίωση, ο σχεδιασμός ενός τέτοιου συστήματος που τροφοδοτείται από την ενέργεια περιβάλλοντος RF μπορεί να είναι πλήρως σφραγισμένος και προστατευμένος από περιβαλλοντικές συνθήκες και επικίνδυνα υλικά. Ακόμη, η μειωμένη απαίτηση συντήρησης όχι μόνο προσφέρει τα δικά της πλεονεκτήματα, αλλά επιτρέπει επίσης στους μηχανικούς να τοποθετούν συστήματα σε περιοχές που είναι δύσκολο να προσεγγιστούν ή που υποφέρουν από μειωμένη διαθεσιμότητα άλλων πηγών ενέργειας περιβάλλοντος, όπως το φως, η θερμοκρασία ή οι κραδασμοί.

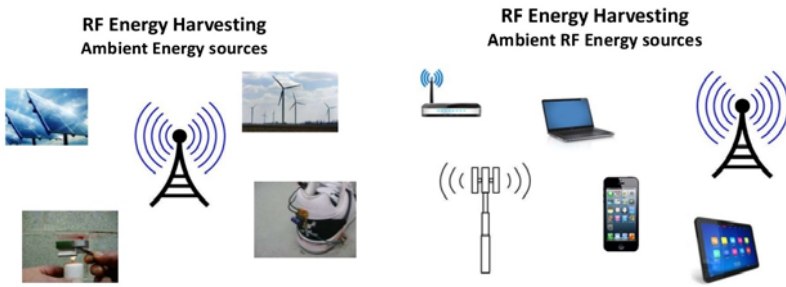
Η συγκομιδή ενέργειας απαιτεί ελάχιστα βασικά στοιχεία, συμπεριλαμβανομένου ενός μετατροπέα πηγής ενέργειας, ανορθωτή, αποθήκευση ενέργειας (όπως μπαταρίες ή πυκνωτές) και ρυθμιστή εξόδου (Σχήμα 3.6). Για τη συλλογή ενέργειας RF, ένα πηνίο λήψης χρησιμεύει ως πηγή ενέργειας, δημιουργώντας μια τάση σε απόκριση της ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης με τον πομπό RF. Όπως και με τη συγκομιδή ενέργειας γενικά, η πρόκληση στη συγκομιδή ενέργειας RF έγκειται στη μεγιστοποίηση της εξόδου από τον μετατροπέα (π.χ. από το πηνίο λήψης) σε οποιαδήποτε στάθμη ενέργειας του περιβάλλοντος.



Σχήμα 3.6: Συλλογή ενέργειας RF σε IoT [26]

Τα συστήματα συγκομιδής ενέργειας μέσω ραδιοσυχνοτήτων αποτελούνται συνήθως από την κεραία, τον πομποδέκτη, τη μονάδα WEH, τη μονάδα διαχείρισης ενέργειας, αισθητήρα, επεξεργαστή και ενδεχομένως τις μπαταρίες. Τα κύρια συστατικά του είναι : η μονάδα WEH που είναι υπεύθυνη για την συγκομιδή ενέργειας μέσω ραδιοσυχνοτήτων για την παραγωγή σταθερής ενέργειας και οι διεπαφές που συνδέονται με την μονάδα διαχείρισης ενέργειας (PMU), όπου είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο του πομποδέκτη και την διαχείριση - κατανάλωση κάθε μονάδας. Ακόμη, η μονάδα PMU εξυπηρετεί στη φόρτιση των μπαταριών. Η συσκευή στην συνέχεια λαμβάνει τα εκπεμπόμενα ραδιοκύματα μέσω κεραίας και μετατρέπει την RF ενέργεια σε σταθερή ενέργεια συνεχούς ρεύματος (DC) για την τροφοδοσία του αισθητήρα [22]. Όπως μπορούμε να δούμε από το Σχήμα 3.6, το κύκλωμα ενέργειας συνήθως διορθώνει την τάση εξόδου της ενέργειας που συλλέγεται μέσω ενός μετατροπέα. Οι περισσότερες εφαρμογές απαιτούν ένα μέσο αποθήκευσης (energy storage) της παραγόμενης ενέργειας και ρύθμιση της παροχής τάσης (voltage regulator).—Με τη συγκομιδή ενέργειας RF, παρουσιάζονται αρκετές προκλήσεις για να εξασφαλιστεί η μέγιστη ενεργειακή απόδοση. Συνήθως, πρέπει να αντιμετωπίσουμε τις αδύναμες περιβαλλοντικές πηγές RF περιβάλλοντος.

Παρόλο που αυτές οι μορφές ενέργειας RF είναι διαθέσιμες στις περισσότερες περιοχές, είναι συνήθως σε χαμηλότερα επίπεδα από ό,τι αναμένουμε να βρούμε σε σύγκριση με άλλες εναλλακτικές πηγές περιβάλλοντος (Πίν.- 3.1).



Σχήμα 3.7: Συλλογή ενέργειας RF σε IoT [23]

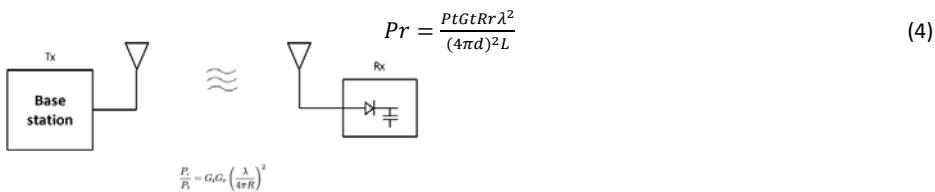
3.4.1 RF μοντέλα διάδοσης ενέργειας

Οι πομποί ραδιοσυχνοτήτων που χρησιμοποιούνται για επικοινωνίες τυπικά περιορίζονται στην ποσότητα ισχύος που μπορούν να εκπέμπουν. Για μια δεδομένη πηγή ραδιοσυχνοτήτων, η ισχύς στην κεραία λήψης πέφτει ανάλογα με την απόσταση κάτι το οποίο προβλέπεται από την εξίσωση μετάδοσης Friis. Στη συλλογή ενέργειας RF, η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να συλλεχθεί εξαρτάται από την ισχύ μετάδοσης, το μήκος κύματος των σημάτων RF και την απόσταση μεταξύ μιας πηγής ενέργειας RF και του κόμβου συγκομιδής. Η συλλεγμένη ισχύς RF από έναν πομπό σε ελεύθερο χώρο μπορεί να υπολογιστεί με βάση την εξίσωση Friis ως εξής:

$$\frac{Pr}{Pt} = GtGr\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \quad (1)$$

$$Pr = \frac{GtGr\lambda^2}{(4\pi)^2 d^n} \quad n = 2 \quad (2)$$

$$Pr = Pt + Gt + Gr + 20 \log_{10}\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right) \quad (3)$$



Σχήμα 3.8: Εξίσωση Friis transmission equation [26]

Όπου

P_T = μεταδιδόμενη ισχύς

P_R = λαμβανόμενη ισχύς

G_T = κέρδος κεραιών πομπού

G_R = κέρδος κεραιών πομπού

L = ο παράγοντας απωλειών διάδοσης

λ = μήκος κύματος που εκπέμπεται

d = απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη

Το μοντέλο απωλειών ελεύθερου χώρου υποθέτει ότι υπάρχει μόνο μία μοναδική διαδρομή μεταξύ ενός πομπού και ενός δέκτη. Ωστόσο, λόγω της διασποράς και της αντανάκλασης των ραδιοσυχνοτήτων, ένας δέκτης μπορεί να συλλέγει σήματα από πολλαπλές διαδρομές. Το μοντέλο δύο γειτονικών ακτινών (two ray ground model) λαμβάνει υπόψη αυτό το φαινόμενο υποθέτοντας ότι ένα ληφθέν σήμα περνά διαμέσου μιας διαδρομής οπτικής επαφής (line-of-sight path) και μιας αντανακλώμενης διαδρομής (reflected path). Η συλλεχθείσα ισχύς ραδιοσυχνοτήτων από ένα πομπό σύμφωνα με το μοντέλο δύο ακτινών δίνεται από αυτή την εξίσωση :

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 r^2}{d^2 L} \quad (5)$$

Όπου h_t είναι το ύψος της κεραίας μετάδοσης και λήψης.

Τα πιο πάνω ντετερμινιστικά μοντέλα χαρακτηρίζουν τη μετάδοση RF με βάση καθορισμένες παραμέτρους. Αντίθετα, τα μοντέλα πιθανοτήτων αντλούν παραμέτρους βάση κατανομών, ενώ επιτρέπουν μια πιο ρεαλιστική μοντελοποίηση. Ένα πρακτικό και ευρέως υιοθετημένο μοντέλο πιθανοτήτων (μη ντετερμινιστικό μοντέλο) είναι το μοντέλο Rayleigh, το οποίο υποδηλώνει την κατάσταση η οποία συμβαίνει όταν δεν υπάρχει διαδρομή – μονοπάτι οπτικής επαφής (line-of-sight path) μεταξύ ενός πομπού και ενός δέκτη. Στο μοντέλο Rayleigh, υπάρχουν οι πιο κάτω υπολογισμοί :

$$P_R = P_R^{\text{det}} * 10^L * \log(1 - \text{unif}(0,1)) \quad (6)$$

$$P_R = P_R^{\text{det}} \times 10^L \times |r|^2 \quad (7)$$

Όπου το P_R^{det} αντιπροσωπεύει την λαμβανόμενη ισχύ RF που υπολογίζεται από το ντετερμινιστικό μοντέλο. Ο συντελεστής απώλειας διάδοσης L ορίζεται ως $L = -\alpha \log_{10}(d / d_0)$, όπου d_0 είναι μια απόσταση αναφοράς. Το r υποδηλώνει έναν τυχαίο αριθμό μετά από κατανομή Gaussian ενώ το $\text{unif}(0, 1)$ δηλώνει έναν τυχαίο αριθμό που παράγεται μετά από ομοιόμορφη κατανομή μεταξύ 0 και 1. Οι πιο πάνω εξισώσεις παρουσιάζουν τα μοντέλα διάδοσης ραδιοσυχνοτήτων [42].

3.5 Σύνοψη

Η ταχεία ανάπτυξη των κινητών συστημάτων και των ασύρματων αισθητήρων συνεχίζει να οδηγεί σε μια μεγάλη ανάπτυξη όλων των μορφών ασύρματων επικοινωνιών, με αποτέλεσμα τη σχεδόν διάχυτη διαθεσιμότητα ενέργειας μέσω ραδιοσυχνοτήτων από το περιβάλλον. Η συλλογή ενέργειας από ραδιοσυχνότητες έρχεται να προσφέρει μια όλο και πιο ευνοϊκή εναλλακτική λύση για την παροχή υλοποιήσεων χαμηλής ισχύος, όπως σε δίκτυα ασύρματων αισθητήρων και άλλων συσκευών που έχουν κατασκευαστεί για το IoT. Με γνώμονα τις βασικές αρχές και διαθέσιμα εξαρτήματα μπορούμε να δημιουργήσουμε κυκλώματα ικανά να είναι σε θέση να συλλέξουν περιβαλλοντική ενέργεια από ραδιοσυχνότητες και χάρις στην αυξανόμενη διαθεσιμότητα των ασύρματων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων είναι εφικτή η ενσωμάτωση της συλλογής ενέργειας RF σχεδόν σε οποιοδήποτε κύκλωμα χαμηλής ισχύος. Σε αντίθεση με τη συγκομιδή ενέργειας από άλλες πηγές, όπως η ηλιακή, η αιολική και οι δονήσεις, η συλλογή ενέργειας RF έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- α) Οι πηγές RF μπορούν να παρέχουν ελεγχόμενη και σταθερή μεταφορά ενέργειας σε απόσταση για συσσωρευτές ραδιοσυχνότητας.
- β) Σε σταθερά δίκτυα συλλογής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες, η ενέργεια από συγκομιδή είναι προβλέψιμη και σχετικά σταθερή με την πάροδο του χρόνου λόγω σταθερής απόστασης.
- γ) Δεδομένου ότι η ποσότητα της ενέργειας από συγκομιδή ραδιοσυχνότητας εξαρτάται από την απόσταση της πηγής RF, οι κόμβοι του δικτύου σε διαφορετικές θέσεις μπορεί να έχουν σημαντικές διαφορές στη συλλεχθείσα ενέργεια RF.

Πλεονεκτήματα RF energy harvesting	Μειονεκτήματα RF energy harvesting
Δωρεάν ενέργεια	Χαμηλή πυκνότητα ισχύος
Ασύρματη μεταφορά ενέργειας	Χαμηλή απόδοση συστήματος
Φορητές συσκευές - συλλέκτες	Για υψηλή απόδοση μετατροπής χρειάζεται περίπλοκο σύστημα

Πίνακας 3.2: Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα συλλογής ενέργειας ραδιοσυχνότητας

Κεφάλαιο 4

Ευρυζωνικές Τεχνολογίες και

Ασύρματα Δίκτυα 5ης Γενιάς

4.1 Εισαγωγή

Η χρήση υψηλών συχνοτήτων για τη μετάδοση των σημάτων, κυρίως των ασύρματων οπισθόζευκτικών επικοινωνιών (backhaul), είναι από τα θέματα που απασχολούν την ερευνητική κοινότητα, ιδίως για την υλοποίηση των δικτύων 5ης γενιάς. Κατά συνέπεια, θεωρούνται ως ένα ραγδαία εξελισσόμενο πεδίο των δικτύων νέας γενιάς, και για αυτό το λόγο θα προχωρήσουμε στην πιο κάτω ανάλυση τους, έτσι ώστε να μας οδηγήσουν σε μία ολοκληρωμένη αποτύπωση των ερευνητικών ζητημάτων τους.

Η συγκομιδή ενέργειας σε ασύρματα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας αποτελεί την βάση για τα ανερχόμενα δίκτυα 5G και επιδιώκει να "Κόψει τα τελευταία καλώδια" από τις υφιστάμενες ασύρματες συσκευές. Συγκεκριμένα η συγκομιδή ενέργειας έχει την δυναμικότητα στο να προσελκύσει συνδρομητές δεδομένου ότι προάγει την κινητικότητα και τη συνδεσιμότητα τα οποία είναι από τα βασικά οράματα στα αναδυόμενα δίκτυα 5G. Τα νέα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5G υπόσχονται να προσφέρουν ευζωνικές υπηρεσίες συμπεριλαμβανομένων βίντεο συνεχούς ροής HD και UltraHD. Η τεχνολογία 5G θα επιτρέψει σε τηλεπικοινωνιακούς παρόχους να εισέλθουν στον κόσμο του Internet of Things (IoT) [ενότητα κεφάλαιο 3.3].

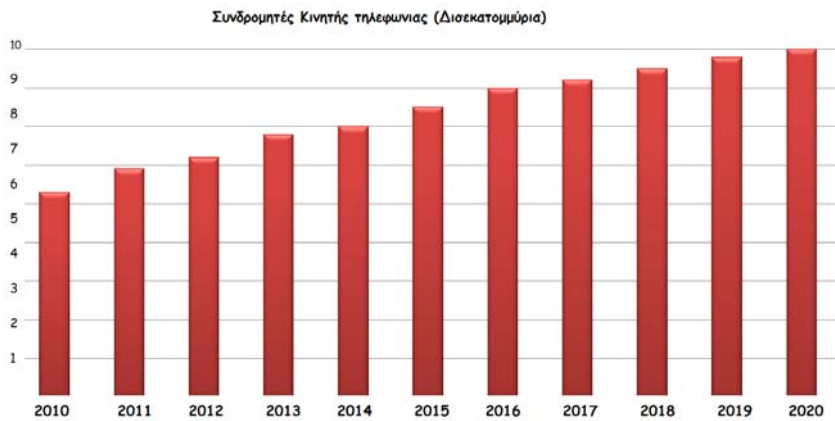
Η εξοικονόμηση ενέργειας είναι πρωταρχικής σημασίας για τα μελλοντικά δίκτυα επικοινωνίας και αποτελεί βασικό σχεδιαστικό στόχο για όλες τις λύσεις ραδιοεπικοινωνιών 5G. Για αυτό η αποτελεσματική αξιοποίηση της διαθέσιμης ενέργειας συνεπώς επεκτείνει τη διάρκεια ζωής των δικτύων και μειώνει το κόστος λειτουργίας. Έτσι η διερεύνηση ενεργειακών αρχιτεκτονικών καθώς και τεχνικών - πρωτοκόλλων μετάδοσης που παρατείνουν τη διάρκεια ζωής των δικτύων ή παρέχουν σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας είναι ένα ανεκμεταλλούμενο ερευνητικό πεδίο στις επικοινωνίες [49].

Οι σημερινοί χρήστες κινητών θέλουν γρηγορότερες ταχύτητες και αξιόπιστες υπηρεσίες. Η επόμενη γενιά των ασύρματων δικτύων-5G-υποσχέται για να παραδώσει αυτά και πολλά άλλα. Με τα επερχόμενα δίκτυα 5G, οι χρήστες θα πρέπει να είναι σε θέση να κατεβάσουν ταινίες υψηλής ευκρίνειας στο ένα εκατοστό του χρόνου που χρειάζεται σε σχέση με το 4G LTE. Αυτά τα δίκτυα έρχονται να δώσουν ώθηση στην ανάπτυξη και άλλων νέων τεχνολογιών, όπως αυτόνομα οχήματα, εικονική πραγματικότητα VR και στο IoT (Internet of Things). Αν όλα πάνε καλά, οι εταιρείες τηλεπικοινωνιών ελπίζουν να κάνουν ντεμπούτο τα πρώτα εμπορικά δίκτυα 5G στις αρχές του 2020. Αυτή τη στιγμή, όμως, τα δίκτυα 5G είναι ακόμα στα στάδια του σχεδιασμού και οι εταιρείες του κλάδου και της βιομηχανίας εργάζονται στα

χαρακτηριστικά και τις προδιαγραφές τους. Ένα από τα σημαντικά ζητήματα που τα καθορίζουν είναι: Καθώς ο αριθμός των χρηστών κινητής τηλεφωνίας και τα αίτημά τους για τα δεδομένα αυξάνεται, τα δίκτυα 5G πρέπει να χειρίζονται πολύ μεγαλύτερη κίνηση (traffic) σε πολύ υψηλότερες ταχύτητες από τους σταθμούς βάσης που συνθέτουν τα σημερινά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Για να επιτευχθεί αυτό, πρέπει να σχεδιαστεί μια σειρά από ολοκαίνουργιες τεχνολογίες. Μαζί, αυτές οι τεχνολογίες θα μπορούν να παραδώσουν δεδομένα με καθυστέρηση λιγότερο από ένα χιλιοστό του δευτερολέπτου της (σε σύγκριση με περίπου 70 ms για τα σημερινά δίκτυα 4G) και να φέρουν ταχύτητες λήψης τάξεως των 20 gigabits ανά δευτερόλεπτο (σε σύγκριση με το 1 Gb/s του 4G) στους χρήστες [9].

4.2 Εξέλιξη δικτύων

Το 1980 καθιερώθηκε το πρώτο ασύρματο δίκτυο αναλογικής φωνής 1G, γύρω στο 1990 εμφανιστήκαν τα πρώτα δίκτυα 2G που επέτρεπαν Ψηφιακή φωνή, SMS + Email. Στη συνέχεια μέσα του 2000 τα δίκτυα 3G επέτρεψαν Mobile Internet και εντοπισμό θέσης. Ενώ τα δίκτυα 4G έκαναν την εμφάνισή τους γύρω στο 2010 προσφέροντας Κινητή ευρυζωνικότητα (Mobile Broadband). Τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς αναμένονται να προσφέρουν προοπτικές όπως 10-100x υψηλότερα δεδομένα χρήστη (μέχρι 20 Gbps), 10-100 φορές μεγαλύτερη συνδεσιμότητα (μαζί με τις συσκευές IoT), 10-100 φορές υψηλότερο όγκο κινητών δεδομένων ανά περιοχή, 10 φορές λιγότερα μειωμένο latency (περίπου 1ms), 10 φορές μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και 10 έως 100 φορές καλύτερη απόδοση στην ενέργεια δικτύου. Σύμφωνα με έρευνες, πάνω από το 67% του παγκόσμιου πληθυσμού, ή αλλιώς πάνω από 5 δισεκατομμύρια άνθρωποι χρησιμοποιούν καθημερινά κινητό ή κάποιο είδος mobile συσκευής [32]. Το 80% των συσκευών που χρησιμοποιούνται είναι φυσικά smartphones. Η ανάπτυξη των συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας είναι σταθερά ανοδική τα τελευταία χρόνια και αναμένεται να φτάσει τα 10 δισεκατομμύρια συνδρομητές το 2020.



Σχήμα 4.1: Αριθμός Συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας

Τα νέα δίκτυα 5ης γενιάς θα μπορούν να προσφέρουν κινητή ευρυζωνικότητα αλλά όμως φέρουν νέες προκλήσεις όπως την μεγάλη ανάπτυξη των συνδεδεμένων συσκευών, την χιονοστιβάδα όγκου πληροφοριών και την ετερογενή συνδεσιμότητα δικτύου. Άλλες προκλήσεις των δικτύων 5ης γενιάς περιλαμβάνουν την εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία και ασφάλεια.

4.3 Τεχνολογίες δικτύων 5ης γενιάς

Η ανάπτυξη των συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας σημαίνει και αύξηση στην κίνηση δεδομένων. Έτσι η αύξηση της κίνησης σε δεδομένα διαδικτύου πιέζει τα όρια της χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων. Πιο κάτω μπορούμε να δούμε μερικές επερχόμενες τεχνολογίες που έρχονται να λύσουν τα προβλήματα χωρητικότητας και διαθεσιμότητας στα δίκτυα 5ης γενιάς. Αυτή τη στιγμή, δεν είναι ακόμη σαφές ποιες τεχνολογίες θα περιλαμβάνονται στα δίκτυα 5G, αλλά μερικές έχουν προκύψει. Αυτές περιλαμβάνουν :

1. **Millimeter waves (χιλιοστομετρικά κύματα)**
2. **Small cells (μικροκυψέλες)**
3. **Massive MIMO (μαζικά συστήματα πολλαπλής εισόδου - πολλαπλή εξόδου)**
4. **Beamforming (μορφοποίηση δέσμης)**
5. **Full duplex (πλήρως αμφίδρομη επικοινωνία)**

Πιο κάτω θα δούμε πώς οι σχεδιαστικές αρχές στα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G) πρέπει να ξεπεράσουν τα δυσμενή χαρακτηριστικά διάδοσης, γιατί τα τμήματα του 5G είναι πιθανόν να

λειτουργούν σε πολύ ψηλότερες συχνότητες από το 4G και γιατί χρειάζεται αλληλεξάρτηση του μηχανολογικού σχεδιασμού και διαχωρισμού στις ραδιοσυχνότητες. Για να καταλάβουμε πώς τα δίκτυα 5G θα διαφέρουν από τα σημερινά δίκτυα 4G, είναι χρήσιμο να εξετάσουμε αυτές τις πέντε τεχνολογίες ξεχωριστά και να δούμε τι θα σημαίνει το καθένα για τους χρήστες ασύρματων δικτύων.

1. Millimeter waves

Τα Millimeter waves καταλαμβάνουν το φάσμα συχνοτήτων από 30 GHz έως 300 GHz. Βρίσκονται στο φάσμα μεταξύ των μικροκυμάτων (1 GHz έως 30 GHz) και υπέρυθρων (IR) κυμάτων, τα οποία είναι μερικές φορές γνωστά ως εξαιρετικής υψηλής συχνότητας (EHF). Το μήκος κύματός τους (λ) είναι στην κλίμακα 1-mm έως 10-mm [10].

Τα σημερινά ασύρματα δίκτυα έχουν να αντιμετωπίσουν το εξής πρόβλημα: Περισσότεροι άνθρωποι και οι συσκευές καταναλώνουν περισσότερα δεδομένα από ό,τι πριν από μερικά χρόνια, αλλά παραμένουν ασφυκτικά στις ίδιες ζώνες φάσματος ραδιοσυχνοτήτων που οι υφιστάμενοι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιούν. Αυτό σημαίνει λιγότερο εύρος ζώνης για όλους, προκαλώντας έτσι αργή εξυπηρέτηση και μειωμένες συνδέσεις. Ένας τρόπος να λύσουμε αυτό το πρόβλημα είναι να μεταδώσουμε τα ασύρματα σήματα σε ένα νέο φάσμα συχνοτήτων το οποίο ποτέ δεν έχει χρησιμοποιηθεί ξανά για κινητά και υπηρεσίες. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι πάροχοι πειραματίζονται με μετάδοση σε χιλιοστομετρικά κύματα (Millimeter waves), τα οποία χρησιμοποιούν υψηλότερες συχνότητες από τα ραδιοκύματα που χρησιμοποιούνται τώρα για τα κινητά τηλέφωνα. Τα χιλιοστομετρικά κύματα, μεταδίδονται σε συχνότητες μεταξύ 30 και 300 GHz, σε σύγκριση με τις ζώνες κάτω από 6 GHz που χρησιμοποιούνται για τις κινητές συσκευές. Ονομάζονται χιλιοστομετρικά κύματα επειδή ποικίλουν σε μήκος κύματος από 1 έως 10 mm, σε σύγκριση με τα ραδιοκύματα που εξυπηρετούν τα σημερινά smartphones, τα οποία μετρούν δεκάδες εκατοστά σε μήκος. Μέχρι τώρα, μόνο σε δορυφορικά συστήματα και συστήματα ραντάρ χρησιμοποιούνται τα χιλιοστομετρικά κύματα, για πραγματικές εφαρμογές. —Τώρα, κάποιοι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας έχουν αρχίσει να τα χρησιμοποιούν για την αποστολή δεδομένων μεταξύ των σταθερών σημείων, όπως σε σταθμούς βάσης. Υπάρχει ένα σημαντικό όμως μειονέκτημα σε χιλιοστομετρικά κύματα, το ότι δεν μπορούν να διαδοθούν εύκολα μέσα από τα κτίρια ή εμπόδια και μπορούν να απορροφήσουν με σχετική ευκολία από το περιβάλλον και τη βροχή. Γι' αυτό τα δίκτυα 5G, θα αυξήσουν πιθανότατα τους παραδοσιακούς σταθμούς βάσης (πύργους) με πιο καινούργιες τεχνολογίες μικροκυψελών. Η χρησιμοποίηση χιλιοστομετρικών κυμάτων για ζεύξη χρηστών κινητής τηλεφωνίας με έναν ή περισσότερους κοντινούς σταθμούς βάσης είναι μια εντελώς νέα προσέγγιση.

2. Small cells

Τα Small cells είναι κόμβοι χαμηλής ισχύος για ασύρματη πρόσβαση που λειτουργούν σε αδειοδοτημένο ή μη φάσμα και έχουν κάλυψη από 10 μέτρα έως 1 ή 2 χιλιόμετρα. Πρόκειται για "μικροκυψέλες" σε σύγκριση με τα παραδοσιακά macrocells κινητής, που μπορεί να έχουν ακτίνα αρκετών χιλιομέτρων [11]. Τα Small cells (μικροκυψέλες) είναι στην ουσία φορητοί

σταθμοί βάσης που απαιτούν ελάχιστη ενέργεια για να λειτουργήσουν και μπορούν να τοποθετηθούν περίπου σε κάθε 250 μέτρα σε μια πόλη. Για να αποτραπούν απώλειες σημάτων, οι πάροχοι τηλεπικοινωνιών μπορούν να εγκαταστήσουν χιλιάδες σταθμούς σε μια πόλη για να σχηματίσουν ένα πυκνό δίκτυο που λειτουργεί ως αναμεταδότη (relay), δηλαδή να λαμβάνει σήματα από άλλους σταθμούς βάσης και να αποστέλλει δεδομένα στους χρήστες σε οποιαδήποτε τοποθεσία. Ενώ τα παραδοσιακά δίκτυα κυψελών βασίζονται επίσης σε έναν αυξανόμενο αριθμό σταθμών βάσης (Base stations), επιτυγχάνοντας απόδοση και ταχύτητες 5G, αυτό θα απαιτήσει ακόμη μεγαλύτερη υποδομή. Ευτυχώς οι κεραιές των μικροκυψελών μπορούν να είναι πολύ μικρότερες από τις παραδοσιακές κεραιές αν μεταδίδουν χιλιοστομετρικά κύματα. Έτσι, αυτή η διάφορα μεγέθους καθιστά ακόμη πιο εύκολη την εγκατάστασή τους π.χ. σε φωτεινούς σηματοδότες ή στις κορυφές των κτιρίων. Αυτή η ριζικά διαφορετική δομή του δικτύου θα πρέπει να παρέχει πιο στοχευμένη και αποτελεσματική χρήση του ραδιοφάσματος.—Έχοντας περισσότερους σταθμούς βάσης σημαίνει ότι οι συχνότητες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από έναν σταθμό για να συνδεθεί με συσκευές σε μια περιοχή μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί από έναν άλλο σταθμό σε μια διαφορετική περιοχή για να εξυπηρετήσει έναν άλλο πελάτη. Υπάρχει όμως ένα πρόβλημα, ο μεγάλος αριθμός των μικροκυψελών που απαιτούνται για την κατασκευή ενός δικτύου 5G μπορεί να είναι δύσκολο να δημιουργηθεί σε αγροτικές περιοχές.—Εκτός από τη μετάδοση μέσω Millimeter waves, οι σταθμοί βάσης σε υλοποίηση δικτύων 5ης γενιάς θα πρέπει να ~~έχουν~~ πολλές περισσότερες κεραιές από τους σημερινούς σταθμούς βάσης κινητής τηλεφωνίας, έτσι ώστε να μπορούν να επωφεληθούν από μια άλλη νέα τεχνολογία : massive MIMO.

3. Massive MIMO

Η τεχνολογία αυτή ονομάζεται μαζική MIMO, που σημαίνει πολλαπλές είσοδοι - πολλαπλές έξοδοι. Το MIMO περιγράφει ασύρματα συστήματα που χρησιμοποιούν δύο ή περισσότερους πομπούς και δέκτες για να αποστέλλει και να λαμβάνει περισσότερα δεδομένα ταυτόχρονα. Τα Massive MIMO δίκτυα παίρνουν αυτή την έννοια σε ένα νέο επίπεδο με δεκάδες κεραιές σε μια ενιαία συστοιχία. Το MIMO Multiple Input - Multiple Output (MIMO) μπορεί να θεωρηθεί ως ένας επιταχυντής μεταφοράς δεδομένων και είναι η ίδια τεχνολογία που κάνει τα δίκτυα 4G και 802.11n τόσο γρήγορα. Θα μπορούσε επίσης να ονομάζετε δίκτυο με περισσότερες από μία κεραιές γιατί με απλά λόγια ότι αυξάνει τον αριθμό των κεραιών στον πομπό και το δέκτη. Οι κεραιές εργάζονται από κοινού για να βελτιώσουν τις επιδόσεις της συσκευής με τη μεταφορά περισσότερων δεδομένων, χωρίς να απαιτείται επιπλέον εύρος ζώνης ή επιπρόσθετη ισχύς. Μια συσκευή με δυνατότητα MIMO μπορεί να διαδίδει την υπάρχουσα ισχύ της και να μεταδίδει σήματα μέσω πολλαπλών κεραιών, δημιουργώντας κέρδος (gain), έτσι μπορεί να μεταδίδει περισσότερα bits ανά κύκλο από ό,τι οι παραδοσιακές SISO (single input/single output) κεραιές.—Ουσιαστικά, ένα σύστημα MIMO διευρύνει την εκπομπή, επιτρέποντας έτσι περισσότερα δεδομένα να ρέουν μέσα σε ένα χρονικό διάστημα. Τα οικιακά Wi-Fi routers έχουν χρησιμοποιήσει αυτή την τεχνολογία τα τελευταία χρόνια για τον εκσυγχρονισμό των συνδέσεων στο σπίτι. Στην πραγματικότητα, ένας καλός τρόπος για να κάνουμε μια συσκευή πιο γρήγορη είναι να προσθέσουμε μια επιπρόσθετη κεραία, που είναι

ουσιαστικά μια σχετικά φθηνή αναβάθμιση, σε σύγκριση με άλλα εξαρτήματα. Το MIMO μπορεί να βρεθεί σήμερα σε διάφορες τεχνολογίες όπως το 4G, το 3GPP, το Long Term Evolution, το WiMAX και σε συστήματα HSPA+, όπου βελτιώνει την ποιότητα της σύνδεσης χωρίς ουσιαστικά η συσκευή να χρειάζεται πιο γρήγορο επεξεργαστή [12].

Οι σημερινοί σταθμοί βάσης 4G έχουν αρκετές θύρες για κεραίες που χειρίζονται όλη την κυψελωτή κίνηση : οκτώ πομπούς (transmitters) και τέσσερις δέκτες (receivers). Οι σταθμοί βάσης 5G μπορεί να υποστηρίξουν περίπου εκατό θύρες, πράγμα που σημαίνει ότι πολλαπλές κεραίες μπορούν να χωρέσουν σε μια ενιαία συστοιχία (single array). Με τέτοια χωρητικότητα σημαίνει ότι ένας σταθμός βάσης θα μπορεί να στέλνει και να λαμβάνει σήματα από πολλούς περισσότερους χρήστες ταυτόχρονα, αυξάνοντας την χωρητικότητα των δικτύων κινητής τηλεφωνίας κατά 22% ή μεγαλύτερη. Τα MIMO βρίσκονται ήδη σε ορισμένους σταθμούς βάσης 4G, αλλά μέχρι στιγμής, τα Massive MIMO έχουν δοκιμαστεί μόνο σε εργαστήρια και σε ορισμένες δοκιμές. Σε εργαστηριακές δοκιμές, έχουν θέσει νέα ρεκόρ για την αποτελεσματική χρήση του ραδιοφάσματος, το οποίο είναι ένα μέτρο του πόσα bits δεδομένων μπορούν να μεταδοθούν σε έναν ορισμένο αριθμό χρηστών ανά δευτερόλεπτο. Τα Massive MIMO κανάλια φαίνονται πολύ υποσχόμενα για το μέλλον των δικτύων 5G. _Ωστόσο, η εγκατάσταση τόσων πολλών κεραιών για να μπορούν να χειρίζονται την κίνηση των κυψελών (cellular traffic) προκαλούν μεγαλύτερες παρεμβολές (interference)_αν αυτά τα σήματα διασταυρώνονται. Γι' αυτό, οι σταθμοί 5G πρέπει να ενσωματώσουν τεχνολογίες τύπου beamforming.

4. Beamforming

Η μορφοποίηση δέσμης είναι μια διαδικασία που επιτρέπει σε ποιο σημείο να επικεντρωθεί το σήμα. Με απλά λόγια, όταν ένας πομπός στέλνει ένα σήμα, το σήμα γίνεται όλο και ευρύτερο, καθώς αφήνει το πομπό μειώνοντας την απώλεια ισχύος σε αντάλλαγμα για την κάλυψη [13]. Το Beamforming είναι ένα σύστημα κίνησης σήματος για τους κυψελώτους σταθμούς βάσης που προσδιορίζει την πιο αποτελεσματική διαδρομή στη λήψη δεδομένων σε ένα συγκεκριμένο χρήστη, μειώνοντας τις παρεμβολές για κοντινούς χρήστες. Ανάλογα με την κατάσταση και την τεχνολογία, υπάρχουν διάφοροι τρόποι εφαρμογής στα δίκτυα 5G. Οι τεχνολογίες Beamforming μπορούν να βοηθήσουν μαζικές συστοιχίες MIMO να κάνουν πιο αποτελεσματική χρήση του φάσματος γύρω τους._Η κύρια πρόκληση για τα Massive MIMO συστήματα είναι να μειώσουν τις παρεμβολές, ενώ μεταδίδουν πληροφορίες από πολλές περισσότερες κεραίες ταυτόχρονα._Σε σταθμούς βάσης MIMO, οι αλγόριθμοι επεξεργασίας σήματος σχεδιάζουν την καλύτερη διαδρομή μετάδοσης σε κάθε χρήστη.

Όσον αφορά τα χιλιοστομετρικά κύματα, τα οποία είναι κύματα υψηλών συχνοτήτων αναμένετε να διαδραματίσουν βασικό ρολό στα δίκτυα 5G και έτσι το beamforming θα χρησιμοποιείται κυρίως για την αντιμετώπιση ενός συνόλου προβλημάτων._Τα σήματα κινητής τηλεφωνίας είναι εύκολο να 'μπλοκαριστούν' από αντικείμενα στο περιβάλλον και τείνουν να εξασθενούν μεγάλες αποστάσεις. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το beamforming μπορεί να βοηθήσει με την εστίαση ενός σήματος σε μια συγκεντρωμένη δέσμη που δείχνει μόνο προς την κατεύθυνση του χρήστη, αντί να μεταδίδει σε πολλές κατευθύνσεις ταυτόχρονα. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να ενισχύσει τις πιθανότητες του σήματος να φτάνει άθικτο και να μειώσει

τις παρεμβολές για όλους τους άλλους χρήστες.—Εκτός από την ενίσχυση ταχυτήτων στα δεδομένα από μετάδοση πάνω από τα χιλιοστομετρικά κύματα και ενίσχυση τις απόδοσης φάσματος μέσω των τεχνικών MIMO, τα νέα δίκτυα προσπαθούν επίσης να επιτύχουν υψηλή απόδοση και χαμηλή καθυστέρηση (low latency) που απαιτείται για το 5G μέσα από μια τεχνολογία που ονομάζεται πλήρως αμφίδρομη (full duplex), η οποία τροποποιεί τον τρόπο που οι κεραιές παρέχουν και να λαμβάνουν δεδομένα.

5. Full duplex

Οι σημερινοί σταθμοί βάσης κινητής τηλεφωνίας καθώς και οι συσκευές βασίζονται σε πομποδέκτες που πρέπει να εναλλάσσονται με σειρά αν εκπέμπουν και αν λαμβάνουν πληροφορίες για την ίδια συχνότητα ή να λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες, αν ο χρήστης επιθυμεί να μεταδίδει και να λαμβάνει πληροφορίες ταυτόχρονα. Με τα δίκτυα 5G, ένας πομποδέκτης θα είναι σε θέση να μεταδίδει και να λαμβάνει δεδομένα ταυτόχρονα, στην ίδια συχνότητα. Η τεχνολογία αυτή είναι γνωστή ως full duplex, και θα μπορούσε να διπλασιάσει τη χωρητικότητα των ασύρματων δικτύων. Για να επιτευχθεί πλήρως αμφίδρομη επικοινωνία (full duplex) σε προσωπικές συσκευές, οι ερευνητές πρέπει να σχεδιάσουν ένα κύκλωμα που μπορεί να δρομολογεί εισερχόμενα και εξερχόμενα σήματα, ώστε να μην συγκρούονται, ενώ η κεραία να μπορεί να μεταδίδει και να λαμβάνει δεδομένα ταυτόχρονα. Αυτό είναι ιδιαίτερα δύσκολο λόγω της τάσης των ραδιοκυμάτων να ταξιδεύουν προς τα εμπρός και προς τα πίσω στην ίδια συχνότητα. Όμως, πρόσφατα, οι ειδικοί έχουν συναρμολογήσει τρανζίστορ πυριτίου που λειτουργούν σαν διακόπτες υψηλής ταχύτητας για να σταματήσουν της προς τα πίσω 'ροή' αυτών των κυμάτων, δίνοντας τους τη δυνατότητα να μεταδίδουν και να λαμβάνουν σήματα στην ίδια συχνότητα ταυτόχρονα. Ένα μειονέκτημα στα full duplex συστήματα είναι ότι δημιουργεί περισσότερες παρεμβολές σήματος, μέσω ηχούς (echo). Όταν ένας πομπός εκπέμπει ένα σήμα, αυτό το σήμα είναι πολύ πιο κοντά στην κεραία της συσκευής και ως εκ τούτου είναι πιο ισχυρό από οποιοδήποτε άλλο σήμα που λαμβάνει. Αναμένοντας μια κεραία τόσο μιλά και να ακούει την ίδια στιγμή είναι δυνατή μόνο με ειδική τεχνολογία echo-canceling.

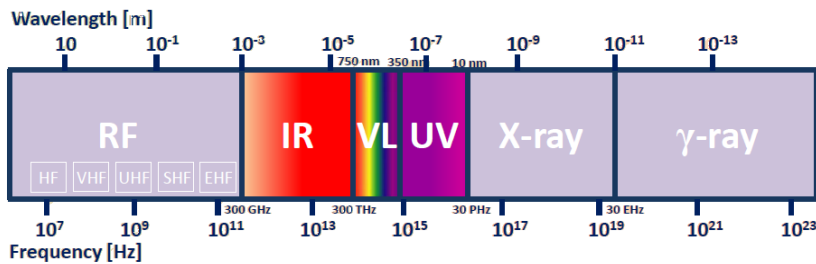
4.4 Φάσμα (Spectrum)

Το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων συνήθως αναφέρεται στην πλήρη περιοχή συχνοτήτων από 3 KHz έως 30 GHz. Η χρήση του ραδιοφάσματος ρυθμίζεται και βελτιστοποιείται από οργανισμούς. Ακόμη το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων είναι ένας εθνικός πόρος που συνήθως θεωρείται ως αποκλειστική ιδιοκτησία του κράτους που κατανέμεται σε διαφορετικές ζώνες και χρησιμοποιείται συνήθως για :

- Ραδιοφωνικές και τηλεοπτικές εκπομπές
- Κυβέρνηση (άμυνα και δημόσια ασφάλεια) και βιομηχανία

- Εμπορικές υπηρεσίες προς το κοινό (φωνή και δεδομένα)

Το εύρος συχνοτήτων μετάδοσής των περιβαλλοντικών πηγών RF είναι από 0.2 έως 2.4 GHz και αυτό περιλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος ακτινοβολίας από οικιακές συσκευές (π.χ. τηλεόραση, Bluetooth, Wi-Fi) [63]. Οι χρησιμοποιούμενες ζώνες συχνοτήτων από τις οποίες επιδιώκουμε συγκομιδή ενέργειας είναι στα 500-600 MHz για τηλεοπτικά σήματα, 800-1000 MHz για σήματα GSM900, 1710-1880 MHz για σήματα GSM1800, 1700-2100 MHz, 2500-2700 MHz για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, και για σήματα τύπου Wi-Fi είναι γύρω στα 2400 MHz.



Σχήμα 4.2: Φάσμα ραδιοσυχνοτήτων (spectrum)

4.5 Συλλογή ενέργειας από δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (RF)

Ως ασύρματα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας χαρακτηρίζουμε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, συνήθως τηλεφωνικό ή δίκτυο υπολογιστών, το οποίο χρησιμοποιεί, ραδιοκύματα ως φορείς πληροφορίας. Τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, με συχνότητα φέροντος η οποία εξαρτάται κάθε φορά από τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που απαιτείται να υποστηρίξει το δίκτυο. Τα σημερινά ασύρματα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας βασίζονται σε ψηφιακή τεχνολογία και επομένως είναι ουσιαστικά δίκτυα υπολογιστών [4]. Στις μέρες μας, η συλλογή ενέργειας από ραδιοκύματα γίνεται όλο και πιο ελκυστική ερευνητικά, λόγω της πληθώρας ραδιοπομπών (κεραίες κινητής τηλεφωνίας, κινητών τηλεφώνων, WiFi κ.λπ.). Ο στόχος είναι να αξιοποιηθεί η ενέργεια ραδιοκυμάτων που υπάρχει στο περιβάλλον έτσι, ώστε να τροφοδοτηθούν μικροί, ενεργειακά αυτόνομοι, αισθητήρες [39].

Οι πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα της συγκομιδής ενέργειας μέσω ραδιοσυχνοτήτων (RF) παρέχουν δυνατότητες μετατροπής των λαμβανομένων RF σημάτων σε ηλεκτρική ενέργεια. Γι' αυτό η συγκομιδή ενέργειας θεωρείται μια πολύ υποσχόμενη τεχνολογία για τροφοδότηση ασύρματων δικτύων χαμηλής κατανάλωσης. Η ενέργεια από την συγκομιδή μπορεί να τροφοδοτήσει ασύρματα δίκτυα, όπως τα δίκτυα αισθητήρων που παραδοσιακά έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής και για αυτό περιορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη συνολική απόδοση του δικτύου. Η χρήση τεχνικών συγκομιδής ενέργειας μέσω δικτύων ραδιοσυχνοτήτων RF, όπως είναι τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, μπορεί να μας προσφέρει αρκετές δυνατότητες ενεργειακής τροφοδότησης. Τα ραδιοσήματα που μπορούν να συλλέγουν μεσω μεθοδων

συγκομιδής ενέργειας έχουν εύρος συχνοτήτων από 300kHz έως 300GHz, ενώ τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας έχουν τυπικά εύρος συχνοτήτων από 850 MHz έως 1900 MHz. Η ενέργεια των ραδιοκυμάτων—που είναι υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι αποτελεσματική στη μεταφορά ενέργειας σε αρκετή απόσταση, ωστόσο έχει χαμηλή απόδοση ενέργειας RF σε DC ειδικά όταν η συλλεγμένη ισχύς RF είναι μικρή [44].

—Τα κύματα ραδιοσυχνοτήτων αποτελούν μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς στη συγκομιδή ενέργειας RF είναι 0.7 μ Watt στα 2.4 GHz και περίπου 1 μ Watt στα 900 MHz. Αυτό θεωρητικά μπορεί να επιτευχθεί σε απόσταση περίπου 40 μέτρων. [68] Για να μετρήσουμε την ισχύ ενός ασύρματου σήματος για τηλεπικοινωνίες_και κυψελωτή τηλεφωνία χρησιμοποιούμε τον όρο RSSI που αντιπροσωπεύει τον δείκτη έντασης σήματος που είναι μια μέτρηση ισχύος σε ένα ληφθέν σήμα. Το RSSI είναι συνήθως μη ορατό στον χρήστη μιας συσκευής λήψης. Ωστόσο, επειδή η ισχύς του σήματος μπορεί να ποικίλει σημαντικά και να επηρεάζει τη λειτουργικότητα της ασύρματης δικτύωσης, οι συσκευές IEEE 802.11 κάνουν συχνά τη μέτρηση διαθέσιμη στους χρήστες [35]. Το RSSI ως ένας όρος Ραδιοσυχνοτήτων (RF), αντιπροσωπεύει την εκλαμβανόμενη ένδειξη ισχύος σήματος και αποτελεί μέτρο του επιπέδου ισχύος που λαμβάνει μια συσκευή RF, όπως είναι μια συσκευή WiFi ή ένας δέκτης 3G/4G, από την υποδομή σε μια δεδομένη τοποθεσία και ώρα. Ποιο όμως το ελάχιστο RSSI που απαιτείται για 3G ή LTE; -Πιο κάτω θα δούμε τις απαιτήσεις σε σήμα εκλαμβανόμενης ενέργειας για τα δίκτυα 3ης και 4ης γενιάς (LTE) [36].

A. Για δίκτυα LTE:

Γενικά, οι όροι RSRP - RSRQ, που αντιπροσωπεύουν μετρήσεις της ισχύος των σημάτων αναφοράς και της ποιότητας λαμβανομένου σήματος,—αντίστοιχα, είναι σχετικοί με την απόδοση του LTE. Εάν έχουμε διαθέσιμο το SINR (που είναι ίδιο με το SNR ή το S/N), είναι ευκολότερο να το χρησιμοποιήσουμε για σκοπούς αναφοράς. Ως μηχανικοί ασυρμάτων δικτύων μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον παρακάτω πίνακα ως ένδειξη.—Εάν—για παράδειγμα το SNR είναι 13 dB, αλλά το RSRP είναι κάτω από -80 ή το RSRQ είναι κάτω από -10 δείχνει ότι υπάρχει πρόβλημα, αλλά αν οι τιμές βρίσκονται στην ίδια κλίμακα με τον πίνακα, τότε είναι ευκολότερο να χρησιμοποιήσουμε μόνο το SNR.

		RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SINR (dB)
Συνθήκες RF	Άριστες	≥ -80	≥ -10	≥ 20
	Καλές	-80 με -90	-10 με -15	13 με 20
	Μέτριες	-90 με -100	-15 με -20	0 με 13
	Οριακές	≤ -100	≤ -20	≤ 0

Πίνακας 4.1: Συνθήκες ραδιοσυχνοτήτων

Το RSSI, αντιπροσωπεύει ολόκληρη τη λαμβανόμενη ισχύ, συμπεριλαμβανομένης της επιθυμητής ισχύος από την κυψέλη εξυπηρέτησης, καθώς και όλη την ισχύ cochannel και από άλλες πηγές θορύβου και σχετίζεται με τις παραπάνω παραμέτρους. Δεν είναι τόσο σημαντικό για το LTE, αλλά μπορεί να υπολογιστεί ως εξής μέσω του ακόλουθου τύπου :

$$RSRQ = N * (RSRP/RSSI) \quad (8)$$

Όπου το N είναι ο αριθμός των μπλοκ πόρων του εύρους ζώνης μέτρησης RSSI του φορέα E-UTRA. Γενικά, είναι δυνατή η αύξηση της ταχύτητας μέχρι 20 φορές όταν συνδυάζεται αυξημένο σήμα με απο-συσχετισμένες κεραίες MIMO. Η βελτίωση της απο-συσχέτισης μεταξύ των κεραιών MIMO συμβάλλει επίσης στην αύξηση της ταχύτητας. Η ισχύς σήματος μπορεί να αυξάνεται με μόνο με μία κεραία ή δύο κεραίες χωρίς μεγάλη απο-συσχέτιση και μπορεί να δώσει περίπου 10 φορές βελτίωση στη ταχύτητα.

B. Για δίκτυα GSM / 3G / HSPA:

Το RSSI μετράτε σε dBm. Η κλίμακα dBm είναι περίπου μεταξύ των -50 και -120dBm, με το -50 να είναι τέλειο σήμα και -120 να είναι όταν δεν υπάρχει σήμα δικτύου. Το RSSI μέτρα τόσο το χρησιμοποιούμενο σήμα όσο και το θόρυβο σε αριθμούς.

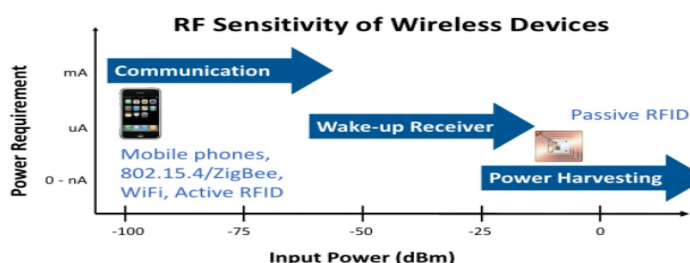
-50 έως -75 dBm - Υψηλό σήμα	> 25 dB - Εξαιρετικό σήμα
-76 έως -90 dBm - Μεσαίο σήμα	18-25 dB - Πολύ καλό
-91 έως -100 dBm - Χαμηλό σήμα	11-18 dB - Μεσαίο
-101db έως -120 dBm - Κακό σήμα	5-10 dB - Χαμηλή
	4 dB - Πολύ κακό

Πίνακας 4.2: Μονάδες σήματος [36]

Γενικά οι ταχύτητες δεδομένων μπορεί να διαφέρουν κατά περίπου 10 φορές από χαμηλές έως πολύ καλές σε δίκτυα τύπου HSPA. Πρέπει επίσης να αναφέρουμε ότι μια εξωτερική κεραία συνήθως αυξάνει το ληφθέν σήμα κατά 15 dB έως 25 dB. Αυτό αυξάνει τις τιμές RSSI, SNR και άλλες παραμέτρους κατά το ίδιο ποσό. Για ακόμη μεγαλύτερες αυξήσεις σήματος μπορούμε να αντικαταστήσουμε υφιστάμενες παλιές κεραίες με νέες κεραίες μεγαλύτερου κέρδους (gain) για μεγαλύτερες αυξήσεις σήματος.

Formatted: Font: Cambria, 12 pt

Formatted: Normal, Justified



Σχήμα 4.5: Ευαισθησία ασύρματων συσκευών στις ραδιοσυχνότητες [41]

4.6 Σύνοψη

Προχωρώντας με σταθερούς ρυθμούς προς ένα αποκλειστικά cloud-based περιβάλλον, η ζήτηση για πρόσβαση και χωρητικότητα, τόσο στο οικιακό όσο και στο επαγγελματικό περιβάλλον, αυξάνεται κατακόρυφα. Η υιοθέτηση τεχνολογικών λύσεων όπως Cloud, M2M και IoT, αλλά και η προώθηση απαιτητικών εφαρμογών, όπως π.χ. το video streaming, θα αρχίσουν να ξεπερνούν τις δυνατότητες των υφιστάμενων δικτύων. Για να στηρίξουν αυτή την έκρηξη δεδομένων, οι πάροχοι δεν έχουν άλλη επιλογή από το να αυξήσουν τη δυναμικότητα των δικτύων τους, πυκνώνοντας την κάλυψη και την χωρητικότητα, καθώς η πρόσβαση σε δίκτυα υψηλών ταχυτήτων, τόσο ενσύρματα όσο και ασύρματα, αποτελεί κεφαλαιώδες ζήτημα για τη λειτουργία του οικοσυστήματος.

Υποστηριζόμενη από την αύξηση της κίνησης και της ζήτησης δεδομένων, η κινητή τεχνολογία κινείται προς την πέμπτη γενιά (5G), όπου όλα θα συνδεθούν μέσω του διαδικτύου και πρόσβασης μέσω του cloud. Οι τεχνικές αναμετάδοσης που χρησιμοποιούνται από το 5G μπορούν να ωφελήσουν την άντληση ενέργειας από ασύρματα δίκτυα μέσω των ραδιοσυχνότητων. Οι καινοτομίες που εισάγουν τα δίκτυα 5ης γενιάς στοχεύουν στην βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και στην μείωση της εξάρτησης από τα συστήματα παροχής ενέργειας. Ενώ στα παραδοσιακά συστήματα τηλεφωνίας το 80% της ενέργειας καταναλώνεται από τους σταθμούς βάσης, στα μελλοντικά δίκτυα 5ης γενιάς μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές πράσινης ενέργειας.

Για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ηλιακά πάνελ για συλλογή ενέργειας την μέρα, ανεμογεννήτριες για συλλογή ενέργειας την νύχτα και άλλες μεθόδους συγκομιδής ενέργειας από το περιβάλλον. Ακόμη, τα έξυπνα τηλέφωνα (γνωστά ως smartphones), λόγω της κινητικότητας τους, μπορούν να λειτουργούν ως κόμβοι, μεταδίδοντας δεδομένα για τους αισθητήρες και μπορεί να γίνουν ακόμη μια πηγή ενέργειας RF για σκοπούς συγκομιδής [22].

Οι σχεδιαστικές αρχές για το 5G στοχεύουν σε υψηλότερη χωρητικότητα από την τρέχουσα γενιά 4G, επιτρέποντας μεγαλύτερη πυκνότητα χρηστών κινητών τηλεφώνων και υποστηρίζοντας εξαιρετικά αξιόπιστες και ευζωνικές επικοινωνίες μεταξύ συσκευών. Η έρευνα και ανάπτυξη του 5G στοχεύει σε χαμηλότερο latency από το 4G και χαμηλότερη

κατανάλωση μπαταρίας, για καλύτερη εφαρμογή του IoT (όπως σε συστήματα ασύρματων αισθητήρων). Προς το παρόν δεν υπάρχει ένα τελικό πρότυπο για τα δίκτυα πέμπτης γενιάς όμως με τις τεχνολογίες που αναφέραμε στο πιο πάνω κεφάλαιο, καθώς και τις γενικές απαιτήσεις που πρέπει να πληροί ένα σύστημα 5G, ξέρουμε ότι μπορεί να προσφέρει :

- Δεκάδες megabits ανά δευτερόλεπτο για δεκάδες χιλιάδες χρήστες
- Εκατοντάδες megabits ανά δευτερόλεπτο για μητροπολιτικές περιοχές
- 1Gb ανά δευτερόλεπτο ταυτόχρονα σε πολλούς εργαζομένους στο ίδιο γραφείο
- Απεριόριστες ταυτόχρονες συνδέσεις σε ασύρματους αισθητήρες
- Καλύτερη φασματική απόδοση σε σύγκριση με τα δίκτυα 4G
- Βελτιωμένη κάλυψη και αποτελεσματικότερη σηματοδότηση (signalling)
- Χαμηλότερο latency σε σύγκριση με το LTE (4G)

Το 5G μπορεί να δρομολογηθεί μέχρι το 2020 για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις των επιχειρήσεων και των καταναλωτών. Εκτός από την παροχή γρήγορων ταχυτήτων, τα δίκτυα 5G θα μπορούν να αντιμετωπίσουν άλλες και νέες συσκευές συνδεδεμένες στο διαδίκτυο, όπως συστήματα IoT (συσκευές συνδεδεμένες στο διαδίκτυο),—καθώς και υπηρεσίες τύπου ευρυεκπομπής (broadcast). Οι κατασκευαστές chip και SoC ([ενότητα κεφ3.2](#)) ήδη προετοιμάζονται για αυτό το ασύρματο πρότυπο νέας γενιάς 5G, καθώς τα κινητά συστήματα και οι σταθμοί βάσης απαιτούν νέους και γρηγορότερους επεξεργαστές και νέες ραδιοσυχνότητες (RF) που αποτελούνται από ένα σύνολο φάσματος 3 ζωνών στα 28, 37 και 39 GHz.

Τα μελλοντικά δίκτυα 5G θα μπορούν να μεταφέρουν δεδομένα μέσω στοχευμένων δεσμών (όπως beamforming) και με προηγμένες επεξεργασίες σήματος θα μπορούν να επιτυγχάνουν μεγάλες ταχύτητες δεδομένων και θα ενισχύουν το εύρος ζώνης [33].

Με [αυτές](#) τις τεχνολογίες 5G, είναι δυνατόν να 'χτίσουμε' ασύρματα δίκτυα που οι μελλοντικοί χρήστες smartphones θα μπορούν να βασίζονται καθημερινά.—Με αυτά τα πρότυπα που παρουσιάστηκαν πιο πάνω, θέτουμε υψηλές προσδοκίες για τα δίκτυα 5G με την υπόσχεση για χαμηλή λανθάνουσα καθυστέρηση (latency) και πολύ υψηλές ταχύτητες δεδομένων, οι οποίες αν όλα πάνε καλά μπορούν να φτάσουν στους καταναλωτές μέσα στα επόμενα πέντε χρόνια.

Κεφάλαιο 5
Σχεδιασμός και προκλήσεις
ασυρμάτων δικτύων και
συστημάτων συλλογής ενέργειας
RF

5.1 Εισαγωγή

Η συλλογή ενέργειας από το περιβάλλον για τηλεπικοινωνιακά συστήματα και σε ασύρματα δίκτυα είναι μια πολύ υποσχόμενη τεχνολογία η οποία επιτρέπει σε τερματικούς σταθμούς να μπορούν να επαναφορτίζουν τις μπαταρίες τους από τις περιβαλλοντικές πηγές ενέργειας. Μπορούμε να πετύχουμε ασύρματη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μέσω συγκομιδής ενέργειας από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η μεταφορά ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων μαζί με την συγκομιδή ασύρματης ενέργειας έχουν γίνει δημοφιλές θέμα διότι μας προσφέρουν μια εναλλακτική μέθοδο τροφοδότησης μελλοντικών ασυρμάτων δικτύων. Αυτή η ενέργεια μπορεί να συλλεχθεί ευκαιριακά από ηλεκτρομαγνητικές πηγές από το περιβάλλον ή από πηγές που εκπέμπουν σκόπιμα και ελεγχόμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα για σκοπούς συγκομιδής ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση η μεταφορά ενέργειας μπορεί να γίνει από ισχυρούς κόμβους (π.χ. σταθμούς βάσης) που εκμεταλλεύονται συμβατικές μορφές πηγών ενέργειας [38]. Αξίζει να αναφέρουμε ότι είναι αρκετά δύσκολο και ίσως ασύμφορο να πετύχουμε ασύρματη μεταφορά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις σε εφαρμογές υψηλής ισχύος λόγω χαμηλής απόδοσής στην διαδικασία μετάδοσης και ανησυχίες που έχουν να κάνουν λόγο με κυρίως θέματα υγείας που προέρχονται από υψηλή (ηλεκτρομαγνητική) ακτινοβολία και έτσι η περαιτέρω ανάπτυξη σε αυτό τον τομέα είναι στάσιμη. Για αυτό το λόγο, οι πρόσφατες έρευνες σε αυτό τον τομέα επικεντρώνονται σε ασύρματη μεταφορά ισχύος σε κοντινές

αποστάσεις μέσω επαγωγικής σύζευξης, καθώς και εκμετάλλευσης της προσφερόμενης ενέργειας από το περιβάλλον.—Επιπλέον οι πρόσφατες τεχνολογίες στον τομέα των μικροεπεξεργαστών (κεφάλαιο 3.2) έχουν μειώσει σημαντικά την ενεργειακή ζήτηση σε απλές ασύρματες συσκευές, έτσι οι τεχνολογίες ασύρματης μεταφοράς ισχύος (WPT) γίνονται όλο και πιο προσιτές. Η συγκομιδή ενέργειας μέσω ραδιοσυχνοτήτων (RF) γίνεται στη ζώνη ISM, με εύρος συχνοτήτων από 3 kHz έως και 300GHz (εφόσον διαφορετικές πηγές μεταδίδουν σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων) και χρησιμοποιείται ως μέσο μεταφοράς ενέργεια σε μια μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Σε αντίθεση με τη συγκομιδή ενέργειας από άλλες πηγές, όπως είναι η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια κλπ., η συγκομιδή ενέργειας RF έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

- 1) Οι πηγές RF μπορούν να παρέχουν ελεγχόμενη και σταθερή μεταφορά ενέργειας σε απόσταση για τους συσσωρευτές ραδιοσυχνοτήτων.

- 2) Σε σταθερά συστήματα συγκομιδής ενέργειας μέσω ραδιοσυχνοτήτων RF, η ενέργεια που συλλέγεται είναι προβλέψιμη και σχετικά σταθερή με την πάροδο του χρόνου λόγω της σταθερής απόστασης.

- 3) Δεδομένου ότι το ποσό της συλλεχθείσας ενέργειας RF εξαρτάται από την απόσταση της πηγής RF, οι κόμβοι δικτύου σε διαφορετικές τοποθεσίες μπορούν να έχουν σημαντική διάφορα στη συλλεχθείσα ενέργεια ραδιοσυχνοτήτων.

~~Μερικά από τα ζητήματα που προκύπτουν στον σχεδιασμό των δικτύων ασύρματης συγκομιδής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες είναι τα ακόλουθα :~~

- ~~1. Επίπεδο κυκλωμάτων: Κεραία, προσαρμογή δικτύου, ανορθωτής, αρχιτεκτονική δέκτη.—~~
- ~~2. Σε δίκτυα single hop με δυνατότητες συγκομιδής ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων: Χρονοπρογραμματισμός πολλαπλών χρηστών και πολιτικές λειτουργίας του δέκτη.—~~
- ~~3. Σε δίκτυα πολλαπλών κεραίων με δυνατότητες συγκομιδής ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων: SWIPT, Βελτιστοποίηση καναλιών, Διαμόρφωση δέσμης ενέργειας (beamforming), ανάδραση πληροφοριών.—~~
- ~~4. Σε δίκτυα αναμεταδοτών (relays) με δυνατότητες συγκομιδής ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων: Πολιτικές λειτουργίας αναμεταδότη, επιλογή αναμεταδοτών και κατανομή ισχύος.—~~
- ~~5. Γνωσιακά δίκτυα ραδιοεπικοινωνιών : ανίχνευση φάσματος, πρόσβαση και διαχείριση φάσματος, μεταβίβαση φάσματος handoff.—~~
- ~~6. Πρωτόκολλα επικοινωνιών : πρωτόκολλα δρομολόγησης και πρωτόκολλα MAC.—~~

~~Η ασύρματη συγκομιδή ενέργειας σε περιπτώσεις πολλαπλών ζωνών περιπλέκει τις απαιτήσεις του συστήματος όσο αφορά τη γεωμετρία των κεραίων και απαιτεί εξελιγμένους μετατροπείς ισχύος. Έτσι, η συγκομιδή ενέργειας σε δίκτυα αισθητήρων γίνεται σε ασύρματες πηγές που μπορούν να προσφέρουν προβλέψιμη ενέργεια, όπως θα δούμε πιο κάτω. Το κλειδί για τη συλλογή ενέργειας βρίσκεται στον αποδοτικό σχεδιασμό του μετατροπέα RF to DC, γι' αυτό η ασύρματη συγκομιδή ενέργειας είναι συνήθως βελτιστοποιημένη για μια πηγή ενέργειας (Dedicated source – sink mode) και επιτρέπει τη συγκομιδή ενέργειας από το περιβάλλον ή από μια βοηθητική πηγή [22].~~

Ακόμη με τη χρήση βοηθητικών πηγών (όπως στην περίπτωση που έχουμε πομπό ισχύος -

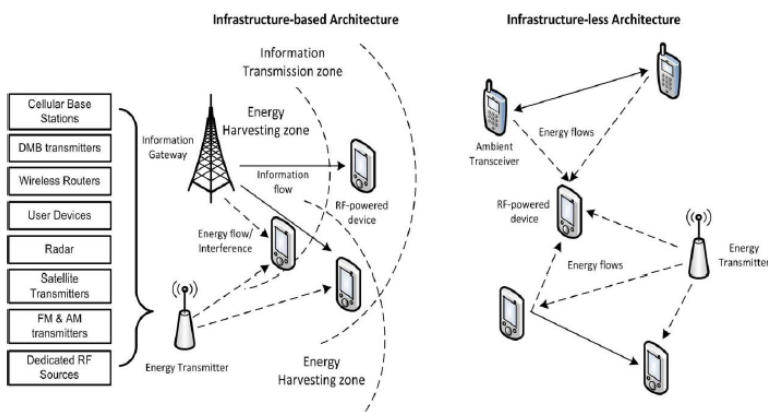
Power transmitter) —είναι δυνατόν να παρέχεται συχνή και διαφανή επαναφόρτιση επιτρέποντας τη χρήση μικρότερης μπαταρίας που επιτρέπει μικρότερες και, λεπτότερες συσκευές. Κάνοντας χρήση ενός πομπού RF χαμηλής ισχύος, παρόμοιος με αυτόν σε ένα κινητό τηλέφωνο σε περιπτώσεις όπου είναι δυνατόν, είναι μια καλή προσέγγιση διότι εάν βασιζόμαστε μόνο σε περιβαλλοντικές πηγές RF αυτές μπορεί να είναι αρκετά απρόβλεπτες. Αυτή η μέθοδος είναι ανεξάρτητη, έτσι ο δέκτης δεν θα πρέπει να εξαρτάται μόνο από τυχαία σήματα RF που βρίσκονται στην περιοχή συχνότητων του. Παρέχοντας μια ανεξάρτητη πηγή ισχύος RF το σύστημα μπορεί να βασίζεται σε μια σταθερή ροή σήματος. Οι πηγές ενέργειας από το περιβάλλον μπορεί να είναι καλύτερες λύσεις σε απομακρυσμένες περιοχές όπου δεν υπάρχει ηλεκτρική ενέργεια, όμως για οικιακή χρήση μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα ανεξάρτητο, αξιόπιστο ασύρματο πομπό ειδικά για περιπτώσεις καθημερινής χρήσης αντικειμένων IoT όπως είναι τα wearables. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να παρέχει αυτόματη φόρτιση μέσω συχνότητων RF με παραμέτρους που μπορούν να ελεγχθούν και να παραμετροποιηθούν ανάλογα με τις ανάγκες σχεδιασμού. Αυτές οι παράμετροι μπορεί να είναι το επίπεδο ισχύος, η συχνότητα, το κέρδος κεραίας μετάδοσης - λήψης και ο αριθμός των πομπών, η απόσταση, ο κύκλος λειτουργίας της συσκευής και το κόστος του συστήματος. Τυπικά, μια τυπική σκόπιμη εκπομπή ισχύος RF μπορεί να κυμαίνεται σε απόσταση μεταξύ κάποιων ιντσών έως μεγαλύτερη από 30 μέτρα και η μεταδιδόμενη ισχύς μπορεί να κυμαίνεται από μερικά microwatts έως milliwatts. Μερικά εμπορικά συστήματα που βρίσκονται ήδη στην αγορά μπορούν να επιτρέψουν συγκομιδή μερικών milliwatt από μια ζώνη ραδιοσυχνοτήτων με απόδοση έως και 50%.

5.2 Αρχιτεκτονική δικτύων συλλογής ενέργειας

Ένα δίκτυο συλλογής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες, έχει μια τυπική κεντρική αρχιτεκτονική, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1 και περιλαμβάνει τρία κύρια συστατικά, όπως τους πυλώνες πληροφοριών, τις πηγές ενέργειας RF και τους κόμβους - συσκευές δικτύου. Οι πυλώνες πληροφοριών, είναι γενικά γνωστοί ως σταθμοί βάσης, και σημεία πρόσβασης μπορεί να είναι οι ασύρματοι δρομολογητές και οι αναμεταδότες (relays). Οι κόμβοι του δικτύου δέχονται πληροφορίες από τον σταθμό πληροφοριών και τις αποκωδικοποιούν. Σε δίκτυα χωρίς κεντρική υποδομή οι κόμβοι μπορούν να συλλέγουν ενέργεια, να δέχονται καθώς και να μεταδίδουν πληροφορίες σε άλλους κόμβους. Οι πηγές ενέργειας όπως θα δούμε πιο κάτω μπορούν να είναι είτε αποκλειστικές πηγές (Dedicated source) όπως είναι οι μεταδότες ενέργειας RF είτε περιβαλλοντικές RF πηγές (Ambient source), όπως για παράδειγμα οι πύργοι τηλεόρασης. Οι σταθμοί βάσης που συνήθως έχουν συνεχή και σταθερή παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, επικοινωνούν με τους κόμβους του δικτύου οι οποίοι συλλέγουν την ενέργεια από τις ραδιοσυχνότητες RF για να υποστηρίξουν τις λειτουργίες τους. Όπως μπορούμε να δούμε στο πιο κάτω σχήμα οι συμπαγείς γραμμές αντιπροσωπεύουν σήματα ροής πληροφοριών ενώ οι διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν σήματα ροής ενέργειας. Οι πύλες πληροφοριών έχουν ζώνες συγκομιδής ενέργειας και ζώνες μετάδοσης πληροφοριών που

αντιπροσωπεύονται από της διακεκομμένες γραμμές στο Σχήμα 5.1. Οι συσκευές μέσα στη ζώνη συγκομιδής ενέργειας είναι ικανές να συλλέγουν ενέργεια από τις πύλες πληροφοριών και οι συσκευές μέσα στη ζώνη μετάδοσης πληροφοριών είναι ικανές να μπορούν να αποκωδικοποιήσουν τα σήματα πληροφοριών που μεταδίδονται. Γενικά μια ζώνη συλλογής ενέργειας είναι μικρότερη από τη ζώνη μετάδοσης πληροφοριών λόγω το ότι η αποκωδικοποίηση πληροφοριών χρειάζεται λιγότερη λειτουργική ισχύ.

Να αναφέρουμε ότι τα δίκτυα αισθητήρων και η αποκεντρωμένη (infrastructure-less) συγκομιδή ενέργειας έχει παρόμοια αρχιτεκτονική με αυτή που φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα, με τη διάφορα ότι οι κόμβοι του δικτύου επικοινωνούν μεταξύ τους κατευθείαν [44].



Σχήμα 5.1: Γενική αρχιτεκτονική ενός δικτύου συλλογής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες [42]

Δεδομένου ότι τα σήματα RF μπορούν να μεταφέρουν ενέργεια καθώς και πληροφορίες, θεωρητικά η συλλογή ενέργειας RF και η λήψη πληροφοριών μπορεί να πραγματοποιηθεί στην ίδια είσοδο σήματος RF. Αυτό συχνά το αναφέρουμε ως ταυτόχρονη ασύρματη ζεύξη πληροφορίας και μεταφοράς ισχύος (SWIPT). Η χρήση τεχνικών SWIPT επιτρέπει στον δέκτη πληροφοριών και στον συλλέκτη ενέργειας RF να μοιραστούν την ίδια κεραία ή τη ίδια συστοιχία κεραίων. Οι αρχιτεκτονικές δέκτη για SWIPT παρουσιάζονται στην ενότητα 5.4 και αναλύονται περαιτέρω στην 6^η ενότητα της διατριβής.

5.2.1 Κατηγορίες πηγών ενέργειας RF και τεχνικές συγκομιδής

Για να αναλύσουμε τις προκλήσεις που εμφανίζονται σε συστήματα συλλογής ενέργειας, θα πρέπει να κάνουμε πρώτα μια ανάλυση των διατάξεων στα συστήματα, έτσι ώστε να δούμε τα μοντέλα και τις κατηγορίες συλλογής ενέργειας. Γενικά μιλώντας, οι ασύρματες πηγές ενέργειας μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο τύπους - κατηγορίες [22] :

A. Dedicated source: (ειδικές ή αποκλειστικές πηγές - intentional)

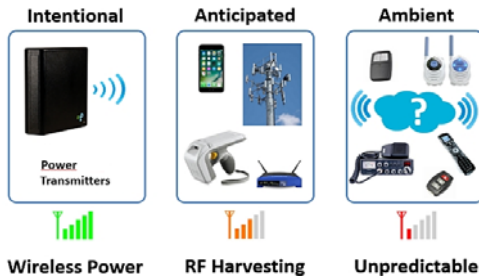
Αναπτύσσονται για να παρέχουν προβλέψιμη πηγή ενέργειας στη συσκευή (όπως παράδειγμα είναι το sink mode) και στους κόμβους του δικτύου όταν απαιτείται - υπάρχει ανάγκη για

ενεργειακό ανεφοδιασμό. Αυτές οι πηγές μπορούν να βελτιστοποιηθούν από την άποψη της συχνότητας και της μέγιστης ισχύος έτσι, ώστε να μπορούν να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του αισθητήρα. Οι ειδικές πηγές RF μπορούν να χρησιμοποιήσουν τις ελεύθερες ζώνες συχνοτήτων ISM για τη μεταφορά ενέργειας RF. Ένα σταθερό σήμα είναι παράδειγμα των Dedicated source, όπως μπορούμε να δούμε στο Σχήμα 5.2 έναν αναμεταδότη ισχύος. Ο αναμεταδότης - πομπός Powercaster της φωτογραφίας λειτουργεί στα 915MHz με ισχύ εκπομπής 1W ή 3W είναι ένα παράδειγμα των ειδικών πηγών RF, η οποία διατίθεται στο εμπόριο [44]. Αξίζει να σημειώσουμε ότι οι αποκλειστικές πηγές RF μπορεί να είναι κινητές, δηλαδή να μπορούν να μετακινούνται περιοδικά για να μεταφέρουν ενέργεια ραδιοσυχνοτήτων σε κόμβους δικτύου.

B. Ambient source : (Περιβαλλοντικές πηγές μπορούν να χωριστούν σε 2 υποκατηγορίες)

Οι περιβαλλοντικές πηγές αναφέρονται στους πομπούς RF που ουσιαστικά δεν προορίζονται για μεταφορά ενέργειας RF όμως αυτή η ενέργεια από ραδιοσυχνότητες είναι ουσιαστικά 'ελεύθερη'. Αυτές οι πηγές ποικίλουν σημαντικά από περίπου 10^6 W για τηλεοπτικούς σταθμούς βάσης (πύργους), έως περίπου 10W για κυψελωτά συστήματα κινητής τηλεφωνίας και συστήματα RFID, σε περίπου 0,1 W για συσκευές κινητής επικοινωνίας και συστήματα WiFi. Οι περιβαλλοντικές πηγές RF μπορούν να ταξινομηθούν σε στατικές και δυναμικές πηγές.

- Στατικές ή προβλεπόμενες πηγές (Static or anticipated) : Οι αναμεταδότες μεταδίδουν σταθερή ισχύ στο πέρασμα του χρόνου (παράδειγμα για αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να είναι ένας σταθμός κινητής τηλεφωνίας, ραδιοφωνικός ή τηλεοπτικός σταθμός βάσης). Αν και οι στατικές πηγές μπορούν να παρέχουν προβλέψιμη ενέργεια RF, μπορούν να υπάρξουν μακροπρόθεσμες και βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις στη λειτουργία τους (π.χ. σε πρόγραμμα υπηρεσιών τηλεόρασης - ραδιοφώνου). Η πυκνότητα ισχύος των περιβαλλοντικών πηγών RF είναι μικρή, γι' αυτό απαιτούνται κεραίες υψηλού κέρδους για όλες τις ζώνες συχνοτήτων. Επιπλέον, ο σχεδιασμός του ανορθωτή πρέπει να σχεδιαστεί για ευζωνικό φάσμα [44].
- Δυναμικές ή άγνωστες πηγές (Dynamic or unknown) : Ορίζονται ως οι πηγές που μεταδίδουν περιοδικά με τέτοιο τρόπο που το σύστημα δεν μπορεί να προβλέψει τη συλλογή ενέργειας. Η συλλογή ενέργειας από τέτοιες πηγές απαιτεί έξυπνη σύνδεση στη μονάδα συλλογής ενέργειας για την παρακολούθηση του καναλιού έτσι ώστε μπορεί να βρει τις κατάλληλες ευκαιρίες για συγκομιδή (όπως για παράδειγμα ένα σημείο πρόσβασης τύπου Wi-Fi, ασύρματοι τύπου Walkie-talkie).



Σχήμα 5.2: Κατηγορίες πηγών RF [37]

Ο πίνακας 5.1 δείχνει τα επίπεδα ενέργειας που εκπέμπουν διαφορετικές πηγές ενέργειας. Οι τιμές αυτές ποικίλουν σύμφωνα με την ισχύ εκπομπής και την απόσταση. Η ενέργεια που εκφράζεται σε μW είναι χρήσιμη για εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης.

Πηγή	Συχνότητα	Απόσταση	Ισχύς πηγής	Ενέργεια από ραδιοσυχνότητες
Σταθμός κυψελωτού δικτύου	902 - 928MHz	15m	4W	5.5 μW
Σταθμός κυψελωτού δικτύου	868MHz	25m	1.78 W	2.3 μW
Σταθμός κυψελωτού δικτύου	868MHz	27m	1.78 W	2 μW
Σταθμός μετάδοσης ενέργειας (TX91501 Powercaster)	915MHz	5m	3 W	189 μW
Σταθμός μετάδοσης ενέργειας (TX91501 Powercaster)	915MHz	11m	3 W	1 μW
Σταθμός τηλεόρασης (KING-TV tower)	674-680MHz	4.1 km	960 kW	60 μW

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα μέτρησης τιμών ενέργειας από ραδιοσυχνότητες [56]

5.2.2 Αρχιτεκτονική συγκομιδής ενέργειας

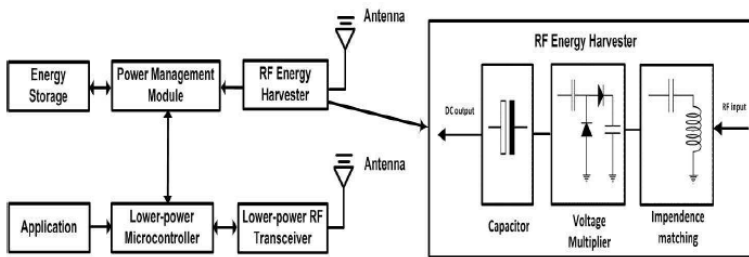
Μια συσκευή αισθητήρων συγκομιδής ενέργειας αποτελείται από την κεραία, τον πομποδέκτη, την μονάδα συλλογής ασύρματης ενέργειας (WEH), τη μονάδα διαχείρισης ισχύος (PMU), την μονάδα αισθητήρα - επεξεργασίας (όπως το σύστημα SoC) και μπαταρία. Η μονάδα συλλογής ενέργειας είναι φυσικά υπεύθυνη για την συγκομιδή της περιβαλλοντικής ενέργειας και για την παραγωγή σταθερής τάσης για τη συσκευή. Αυτή διασυνδέεται με τη μονάδα διαχείρισης ισχύος (PMU), όπου είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο του πομποδέκτη, τη σωστή λειτουργία των αισθητήρων, τη διαχείριση κατανάλωσης ενέργειας και παρέχει λειτουργίες που αφορούν φόρτιση των μπαταριών.

Το Σχήμα 5.3 δείχνει το διάγραμμα ενός κόμβου δικτύου με δυνατότητα συγκομιδής ενέργειας RF. Οι κόμβοι συγκομιδής ενέργειας RF αποτελούνται από τα ακόλουθα κύρια στοιχεία:

α) τη συσκευή - εφαρμογή, β) έναν μικροελεγκτή χαμηλής ισχύος, για την επεξεργασία δεδομένων από την εφαρμογή, (περισσότερα στο κεφ. 3.2 Soc)
 γ) έναν πομποδέκτη χαμηλής ισχύος RF, για μετάδοση ή λήψη πληροφοριών,
 δ) τον συλλέκτη ενέργειας, αποτελούμενος από κεραία RF, με πολλαπλασιαστή τάσης και πυκνωτή, για τη συλλογή σημάτων ραδιοσυχνότητας και τη μετατροπή τους σε ηλεκτρισμό [42].

ε) τη μονάδα διαχείρισης ισχύος, η οποία αποφασίζει εάν θα αποθηκεύσει την ηλεκτρική ενέργεια που λαμβάνεται από τον συλλέκτη RF ή αν θα χρησιμοποιηθεί αμέσως για τη διαβίβαση πληροφοριών και ζ) την αποθήκευση ενέργειας - μπαταρία.

Η μονάδα συλλογής ασύρματης ενέργειας (WEH) λαμβάνει τα εκπεμπόμενα ραδιοκύματα μέσω μιας κεραίας και μετατρέπει την εκλαμβανόμενη ενέργεια από τις ραδιοσυχνότητες σε σταθερό συνεχές ρεύμα (DC) για σκοπούς τροφοδοσίας της συσκευής αισθητήρα. Για τη μετατροπή ραδιοσυχνότητας σε ενέργεια, χρειάζεται κύκλωμα τύπου RF to DC rectifier το οποίο εφαρμόζεται στη συσκευή. Η μετατροπή όμως έρχεται με συγκεκριμένη απώλεια, κάτι που μπορεί όμως να αξιολογηθεί μέσω της απόδοσης μετατροπής ισχύος. Ο πομποδέκτης είναι συνήθως το εξάρτημα που καταναλώνει την περισσότερη ενέργεια. Πιο κάτω μπορούμε να δούμε τις σχηματικές διατάξεις ενός συστήματος δέκτη με αισθητήρα.



Σχήμα 5.3: Γενική αρχιτεκτονική συσκευών συλλογής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες [42]

Σε συστήματα συγκομιδής ενέργειας η κεραία μπορεί να λειτουργεί σε μια συχνότητα ή σε πολλαπλές ζώνες συχνοτήτων στις οποίες ο κόμβος μπορεί να συλλέξει από μια ή από πολλαπλές πηγές ταυτόχρονα. Γενικά όμως η συγκομιδή ενέργειας από ραδιοσυχνότητες γίνεται σε ένα φάσμα συχνοτήτων, δεδομένου ότι η πυκνότητα ενέργειας των σημάτων RF είναι σε διαφορετική ως προς την συχνότητα.

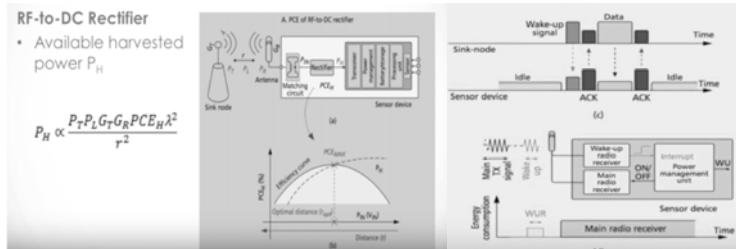
Η προσαρμογή εμπέδησης (impedance matching) είναι ένα κύκλωμα συντονισμού που λειτουργεί στη σχεδιασμένη συχνότητα για να μεγιστοποιήσει τη μεταφορά ισχύος μεταξύ της κεραίας και του πολλαπλασιαστή. Η απόδοση της προσαρμογής εμπέδησης (αλλιώς ως σύνθετης αντίστασης) είναι υψηλή στην σχεδιασμένη συχνότητα. Ως γενική αρχιτεκτονική που παρουσιάσαμε πιο πάνω, ο κόμβος του δικτύου έχει ξεχωριστούς δέκτες για συγκομιδή ενέργειας και για επικοινωνία, επόμενος ο κόμβος μπορεί να πραγματοποιήσει συγκομιδή

ενέργειας και επικοινωνία δεδομένων ταυτόχρονα. Με απλά λόγια, αυτή η αρχιτεκτονική μπορεί να υποστηρίξει στην ίδια ζώνη (in-band) και εκτός ζώνης (out-of-band) συγκομιδή ενέργειας RF. Στην συγκομιδή ενέργειας ίδιας ζώνης, ο κόμβος του δικτύου μπορεί να συλλέξει ενέργεια RF από την ίδια ζώνη συχνοτήτων ενώ στην συγκομιδή ενέργειας εκτός ζώνης, ο κόμβος του δικτύου, συλλέγει ενέργεια RF από διαφορετική ζώνη συχνοτήτων (από αυτή που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία δεδομένων).

5.2.3 Ασύρματη συγκομιδή και διαχείριση ενέργειας

Στη συγκομιδή ενέργειας, η κεραία λήψης μπορεί να σχεδιαστεί έτσι, ώστε να μπορεί να λειτουργεί σε ζώνες απλής συχνότητας ή πολλαπλών συχνοτήτων, στις οποίες ο κόμβος δικτύου μπορεί να συλλέξει ταυτόχρονα από μία ή περισσότερες πηγές. Ωστόσο, η συλλογή ενέργειας RF λειτουργεί συνήθως σε ένα φάσμα συχνοτήτων, δεδομένου ότι η ενεργειακή πυκνότητα των ραδιοσημάτων προέρχεται από διαφορετικές συχνότητες. Με χρήση κυκλώματος συντονισμού μπορεί ο αισθητήρας να λειτουργήσει σε μια σχεδιασμένη συχνότητα για να μεγιστοποιήσει την ισχύ μεταφοράς μεταξύ της κεραίας και του πολλαπλασιαστή. Έτσι η απόδοση του κόμβου θα είναι υψηλή όταν χρησιμοποιείται στην σχεδιασμένη συχνότητα. Ένα από τα κύρια συστατικά του κυκλώματος συγκομιδής (RF energy harvester), όπως μπορούμε να δούμε στο Σχήμα 5.3 ο πολλαπλασιαστής τάσης (voltage multiplier) που περιλαμβάνει διόδους σε διάταξη ανορθωτικού κυκλώματος το οποίο μετατρέπει τα σήματα ραδιοσυχνότητας που εκ φύσεως είναι εναλλασσόμενης τάσης (AC) σε τάση συνεχούς ρεύματος (DC). Υψηλότερη απόδοση μετατροπής γενικά μπορεί να επιτευχθεί με διόδους χαμηλότερης ενσωματωμένης τάσης. Το κύκλωμα συγκομιδής περιλαμβάνει πυκνωτή ο οποίος εξασφαλίζει παροχή ομαλή τάσης. Επιπλέον, όταν η περιβαλλοντική RF ενέργεια δεν είναι διαθέσιμη ο πυκνωτής μπορεί να χρησιμεύσει ως αποθεματικό (διατηρεί ένα μικρό φορτίο) για πολύ σύντομη διάρκεια [42].

Όπως από τα πιο κύρια στοιχεία στα συστήματα συγκομιδής ενέργειας είναι η μονάδα διαχείρισης ενέργειας. Η μονάδα διαχείρισης ισχύος (PMU) μπορεί να υιοθετήσει δύο μεθόδους για τον έλεγχο της εισερχόμενης ροής ενέργειας, όπως την συγκομιδή (harvest-use) και τη συγκομιδή-αποθήκευση-χρήση (harvest-store-use). Στην πρώτη μέθοδο της συγκομιδής χρησιμοποιείται άμεσα η ενέργεια για σκοπούς ενεργοποίησης του κόμβου δικτύου. Επομένως, για να λειτουργήσει κανονικά ο κόμβος του δικτύου, πρέπει να γίνει μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας άμεσα και να μην υπερβαίνει την ελάχιστη ζήτηση ενέργειας, διαφορετικά, ο κόμβος θα απενεργοποιηθεί. Στη δεύτερη περίπτωση όπου χρησιμοποιείται η μέθοδος χρήσης της αποθηκευμένης ενέργειας, ο κόμβος δικτύου είναι εξοπλισμένος με κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας, όπως επαναφορτιζόμενη μπαταρία που αποθηκεύει τη μετατρέπομενη ηλεκτρική ενέργεια. Όταν η ενέργεια από την συγκομιδή είναι μεγαλύτερη από αυτή της κατανάλωσης του κόμβου, τότε η πλεονάζουσα ενέργεια θα αποθηκευτεί στην μπαταρία για μελλοντική χρήση.



Σχήμα 5.4 : Σχηματικό μοντέλο συγκομιδής ενέργειας από πηγές RF

5.2.4 Απόδοση συγκομιδής ενέργειας

Η μετατροπή από τα σήματα ραδιοσυχνοτήτων σε ρεύμα συνεχούς τάσης γίνεται μέσω του ανορθωτή που μετατρέπει την λαμβανόμενη ισχύ RF σε παροχή DC η οποία φτάνει με ορισμένη ποσότητα απώλειας ισχύς στα κύκλωμα προσαρμογής και μετατροπής ισχύος αντίστοιχα. Στην ενότητα 5.3.4 θα δούμε τον ρόλο που διαδραματίζει ο ανορθωτής στην απόδοση μετατροπής ισχύος (Power Conversion Efficiency –PCE) που είναι η αναλογία της παραγόμενης – χρησιμοποιήσιμης ισχύς εξόδου DC σε σχέση με την ισχύ εισόδου από RF. Η απόδοση των τελευταίας γενεάς μετατροπέων RF-to-DC (γνωστοί ως ανορθωτές) μπορούν να επιτύχουν υψηλές τιμές PCE, έως και 70%. Το PCE σε αυτή την περίπτωση αναφέρετε ως ένδειξη της ενέργειας που έχει συλλεχθεί και είναι διαθέσιμη για τη συσκευή αισθητήρα. Η διαθέσιμη τροφοδοτούμενη ισχύς, P_H , δίνεται από την εξίσωση του Friis (Ενότητα 3.4.1) και είναι άμεσα ανάλογη με τη μεταδιδόμενη ισχύ (Σχήμα 5.4).

Σε συστήματα συγκομιδής ενέργειας, η ισχύς μετάδοσης, τα μέσα επικοινωνίας, τα κέρδη των κεραιών και η συχνότητα λειτουργίας είναι συνήθως αυτά που υπαγορεύονται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Έτσι, πρέπει να ακολουθεί σωστός σχεδιασμός και υπολογισμός του PCE για την ενίσχυση της ενέργειας που συλλέγεται P_H και για μεγιστοποίηση της απόστασης επικοινωνίας. Η καμπύλη PCE ως συνάρτηση της απόστασης και επίπεδου ισχύος εισόδου για έναν τυπικό ανορθωτή όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4, βλέπουμε ότι έχει βελτιστοποιηθεί, ώστε να φτάνει στο μέγιστο της σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο εισόδου που αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη απόσταση. Εκτός από τα χαρακτηριστικά της υψηλής απόδοσης μετατροπής ισχύος (PCE), τα χαρακτηριστικά μιας μονάδας συγκομιδής ενέργειας πρέπει να περιλαμβάνουν υψηλή ευαισθησία, ευρεία κλίμακα απόδοσης, λειτουργία πολλαπλών ζωνών και φυσικά ευκολία υλοποίησης. Όπως θα δούμε στην επόμενη ενότητα, υπάρχουν σχεδιαστικές τεχνικές - αρχιτεκτονικές, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ενίσχυση του PCE, όπως είναι οι ανορθωτές που λειτουργούν σε μικρά επίπεδα εισόδου κάνοντας χρήση πολλαπλών συχνοτήτων με μια μόνο μια κεραία κάτι το οποίο διευκολύνει την τη συγκομιδή ενέργειας από περιβαλλοντικές πηγές [22].

Η απόδοση του συλλέκτη ραδιοσυχνοτήτων εξαρτάται από την απόδοση της κεραίας, την ακρίβεια του προσαρμογέα εμπέδησης (impedance matching) μεταξύ της κεραίας και του

πολλαπλασιαστή τάσης και την απόδοση ισχύος στον πολλαπλασιαστή τάσης (voltage multiplier) που μετατρέπει τα λαμβανόμενα σήματα ραδιοσυχνοτήτων σε τάση συνεχούς ρεύματος [42]. Όπως θα δούμε πιο κάτω, ο σχεδιασμός της κεραίας λήψης διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη μεγιστοποίηση της απόδοσης της συλλογής ενέργειας.

5.2.5 Μοντέλα διάδοσης ενέργειας

Τα μοντέλα διάδοσης αναφέρονται στην ενότητα 3.4.1 RF Energy Propagation Models.

5.2.6 Εξισώσεις υπολογισμού απόδοσης

Η εξίσωση μετάδοσης Friis χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ισχύος που λαμβάνεται από μία κεραία με κέρδος G_1 , ενώ όταν μεταδίδεται από άλλη κεραία, με κέρδος G_2 , ενώ διαχωρίζεται με απόσταση r , και συχνότητα λειτουργίας f και μήκος κύματος λ . Συνήθως όλα τα σχέδια σε συστήματα ασυρμάτων επικοινωνιών έχουν να κάνουν με την εξίσωση Friis και σε εξισώσεις συγκομιδής μπορούμε να προσέξουμε ότι η Ισχύς Πυκνότητας (S), σε W/m^2 , είναι ανεξάρτητη από τη συχνότητα:

$$S = \frac{P_T G_T(\theta_T, \Phi_T)}{4\pi r^2} (1 - |\Gamma_T|^2) \quad (9)$$

όπου

P_T είναι η ισχύς μετάδοσης

r είναι η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη

Γ_T είναι ο συντελεστής ανάκλασης του πομπού

Το $G_T(\theta_T, \Phi_T)$ είναι το γωνιακό κέρδος του πομπού

Η Ενεργός Περιοχή (A_e) του τύπου κεραίας μειώνεται ως προς το τετράγωνο της συχνότητας:

$$A_e = \frac{G_R(\theta_R, \Phi_R) \lambda^2}{4\pi} (1 - |\Gamma_R|^2) |\hat{P}_t \cdot \hat{P}_r|^2 \quad (10)$$

Όπου

$G_R(\theta_R, \Phi_R)$ είναι το γωνιακό κέρδος δέκτη

Γ_R είναι ο συντελεστής ανάκλασης του δέκτη

\hat{P}_t είναι το μοναδιαίο διάνυσμα πόλωσης του πομπού

\hat{P}_r είναι το μοναδιαίο διάνυσμα πόλωσης του δέκτη

λ είναι το μήκος κύματος

Έτσι, ένα αυξημένο μέγεθος κεραίας, αν το επιτρέπει η συγκεκριμένη συσκευή, προκαλεί ένα πιο κατευθυντικό σήμα και επιτρέπει λήψη σε υψηλότερες συχνότητες. Αντίθετα, όσο χαμηλότερη είναι η συχνότητα, τόσο πιο ομοιόμορφη είναι η εκπομπή του σήματος που γενικά επιτρέπει μεγαλύτερη απόδοση. Το μέγεθος της κεραίας καθορίζεται φυσικά από το μέγεθος της συσκευής λήψης.

$$P_R = P_T \frac{G_T(\theta_T, \phi_T) G_R(\theta_R, \phi_R) \lambda^2}{(4\pi r)^2} (1 - |\Gamma_T|^2) (1 - |\Gamma_R|^2) |\hat{P}_T \cdot \hat{P}_R|^2 \quad (11)$$

$$P_R = P_T \frac{G_T G_R \lambda^2}{(4\pi r)^2} \quad (12)$$

Οι παρακάτω εξισώσεις βασίζονται στην εξίσωση ραντάρ [37]: Όπου το P_R είναι η ισχύς των λαμβανόμενων δεδομένων και το G_R είναι το μέγιστο κέρδος δέκτη.

5.2.7 Εξισώσεις για αποτελεσματική μεταφορά ενέργειας

Με βάση την εξίσωση μετάδοσης ελευθέρου χώρου Friis, η λαμβανόμενη ισχύς RF στην κεραία εξαρτάτε από την διαθέσιμη πυκνότητα ισχύος και την ενεργό περιοχή των κεραίων $A_e = (\lambda^2 G_R) / (4\pi)$ και δίνεται από:

$$P_R = \cos^2 \varphi \frac{P_T G_T}{4\pi r^2} A_e \quad \text{και} \quad P_T = P_T G_S G_T \left(\frac{\beta \lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad (13)$$

όπου

P_T είναι μεταδιδόμενη ισχύς

P_r είναι η λαμβανόμενη ισχύς

G_T είναι τα κέρδη του πομπού

G_R είναι τα κέρδη του δέκτη

λ είναι το μήκος κύματος

$\cos \varphi$ και β είναι ο συντελεστής απωλειών πόλωσης που αντιπροσωπεύει την κακή ευθυγράμμιση (γωνία φ) του διανύσματος της ληφθείσας μέσης ηλεκτρικής εντάσεως E και της πόλωσης της κεραίας δέκτη. d είναι η απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη.

Από την εξίσωση 13 μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για να εξασφαλιστεί μέγιστη λαμβανόμενη ισχύς, η κεραία του δέκτη πρέπει να έχει υψηλό κέρδος, πρέπει να κατευθύνεται (να βλέπει) προς τον πομπό και πρέπει να ευθυγραμμίζεται με το ληφθέν πεδίο E ($\varphi=0$). Ωστόσο αυτές οι συνθήκες δεν μπορούν να εξασφαλιστούν στην πράξη, γιατί σε περιβάλλοντα διάδοσης πολλαπλών διαδρομών Rayleigh, το ληφθέν σήμα έχει τυχαία πόλωση [38].

Τα μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία παράγουν μαγνητικά πεδία. Η θεωρεία που περιγράφει και ερμηνεύει τα φαινόμενα δημιουργίας και διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, μέσω μεταβολών του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου δίνετε από τις εξισώσεις υπολογισμού Maxwell. Η γενική μορφή των εξισώσεων του Maxwell φαίνονται στον πιο κάτω πίνακα όπου δείχνουμε την διαφορική και την ολοκληρωτική μορφή.

Διαφορική μορφή (Differential form)	Ολοκληρωματική μορφή (Integral form)	Σημειώσεις
$\nabla \cdot D = \rho_v$	$\oint_S D \cdot ds = \int_v \rho_v dv$	Νόμος του Gauss
$\nabla \cdot B = 0$	$\oint_S B \cdot ds = 0$	Μη ύπαρξη απομονωμένου Μαγνητικού φορτίου
$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$	$\oint_L E \cdot dl = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S B \cdot ds$	Νόμος του Faraday
$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$	$\oint_L H \cdot dl = \int_S (J + \frac{\partial D}{\partial t}) \cdot D ds$	Νόμος του Ampere

Πίνακας 5.2 : Εξισώσεις Maxwell [65]

Συνήθως χρειαζόμαστε και τις εξισώσεις :

$$B = \mu H, D = \epsilon E \text{ και } J = \sigma E$$

Οι εξισώσεις του Maxwell είναι σημαντικές, αφού συνοψίζουν όλους τους γνωστούς νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού.

Ορισμοί	Περιγραφή	Μονάδα μέτρησης
H	Ένταση Μαγνητικού πεδίου	A/m
E	Ένταση Ηλεκτρικού πεδίου	V/m
B	Μαγνητική Πυκνότητα ροής	Wb/m ² , Tesla (T)
D	Ηλεκτρική Πυκνότητα ροής	C/m ²
J	Πυκνότητα ρεύματος	A/m ²
σ	Αγωγιμότητα	S/m
P	Πολικότητα	C/m ²
M	Μαγνητική Δίπολη Ροπή	A/m

Πίνακας 5.3 : Ορισμός εξισώσεων Maxwell [65]

5.3. Σχεδιασμός κυκλωμάτων συγκομιδής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες

Αυτή η ενότητα παρουσιάζει μερικό υπόβαθρο που σχετίζεται με τον σχεδιασμό των κυκλωμάτων για τη συγκομιδή ενέργειας μέσω ραδιοσυχνότητων (RF). Ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να εισαχθούν κάποιες βασικές γνώσεις του σχεδιασμού των κυκλωμάτων που απαιτούνται για την κατανόηση των επικοινωνιακών πτυχών στα συστήματα συγκομιδής ενέργειας.

5.3.1 Εφαρμογές κυκλωμάτων

Στο παρελθόν έχουν υπάρξει διάφορες υλοποιήσεις συστημάτων συγκομιδής ενέργειας μέσω ραδιοσυχνότητων RF που βασίζονται σε διάφορες τεχνολογίες, όπως CMOS, HSMS και SMS. Οι περισσότερες από αυτές τις εφαρμογές βασίζονται στην τεχνολογία CMOS. Γενικά, για να επιτευχθεί 1V DC στην έξοδο, απαιτούνται -22 dBm έως -14 dBm συλλεχθείσα ισχύ RF. Λαμβάνοντας υπόψη ότι $1W = 30\text{dBm}$ είναι ο μέγιστος λόγος ισχύος σε ντεσιμπέλ που μπορεί να εκπέμψει ένας σταθμός πρόσβασης τύπου Wi-Fi τότε για να επιτευχθεί απόδοση άνω του 70% η συλλεχθείσα ισχύς θα πρέπει να είναι πάνω από -10 dBm. Για τη συγκομιδή ενέργειας RF σε σχετικά υψηλή ισχύ (π.χ. 40 dBm / 10W), μπορεί να υιοθετηθεί τεχνολογία SMS. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, μια τάση εξόδου 30V επιτυγχάνεται με RF ισχύ εισόδου 40 dBm (10W) με απόδοση μετατροπής 85%. Ωστόσο, όταν η παρεχόμενη ισχύς RF είναι χαμηλή, η απόδοση μετατροπής είναι χαμηλή. Για παράδειγμα στα -10 dBm (0.0001 W) μόνο 10% αποδίδεται σε ισχύ εισόδου [42].

5.3.2 Σχεδίαση κεραίας

Όπως αναφέραμε στην ενότητα 5.2, η κεραία είναι υπεύθυνη για τη λήψη σημάτων ραδιοσυχνότητων. Τόσο το μικρό μέγεθος όσο και το υψηλό κέρδος της κεραίας (high gain) αποτελεί τον κύριο στόχο της κεραίας. Οι συστοιχίες κεραιών είναι αποτελεσματικές στην αύξηση της δυνατότητας για χαμηλή ισχύ εισόδου, εντούτοις υπάρχει συμβιβασμός μεταξύ του μεγέθους της κεραίας και της απόδοσης. Οι κεραίες συγκομιδής ενέργειας τυπικά λειτουργούν σε συχνότητες στενής ζώνης (narrow-band). Στην επόμενη ενότητα θα δούμε μερικές αρχιτεκτονικές συστημάτων με μονές ή δίπλες κεραίες.

5.3.3 Προσαρμογή δικτύου

Το κρίσιμο έργο της προσαρμογής δικτύου (Matching Network) είναι να καταφέρουμε την μείωση της απώλειας μετάδοσης από την κεραία στο κύκλωμα ανορθωτή και να αυξήσουμε την τάσης εισόδου στο κύκλωμα ανόρθωσης. Για το σκοπό αυτό, η προσαρμογή δικτύου συνήθως γίνεται με ενεργά συστατικά, όπως πηνία και πυκνωτές. Η μέγιστη μεταφορά ισχύος μπορεί να πραγματοποιηθεί όταν η σύνθετη αντίσταση στην έξοδο της κεραίας και η σύνθετη αντίσταση του φορτίου είναι συζευγμένες η μία με την άλλη. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως προσαρμογή εμπέδησης. Τα τρία κυριότερα κυκλώματα δικτύου τα οποία έχουν υλοποιούνται σε αυτό το στάδιο για τη συλλογή ενέργειας RF, είναι ο μετασχηματιστής, το πηνίο επαγωγής και κύκλωμα συντονισμού (LC circuit) [42].

5.3.4 Ανορθωτής

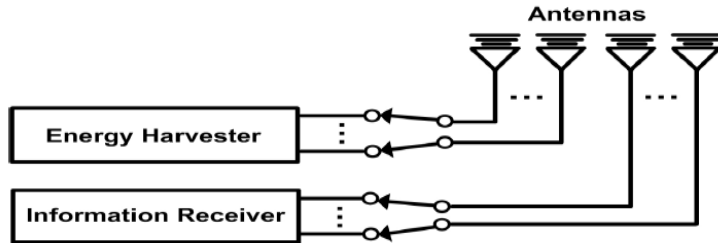
Η λειτουργία ενός ανορθωτή (Rectifier) είναι η μετατροπή των σημάτων RF (τύπου AC), που φτάνουν στην είσοδο του κυκλώματος από την κεραία σε τάση συνεχούς ρεύματος. Μια σημαντική πρόκληση στο σχεδιασμό του ανορθωτή είναι η παραγωγή τάσης (τύπου μπαταρίας) από πολύ χαμηλή ισχύ εισόδου RF. Γενικά, υπάρχουν τρεις κύριες επιλογές για υλοποίηση κυκλώματος ανορθωτή, οι οποίες είναι μια δίοδος ή γέφυρα διόδων και ο πολλαπλασιαστής ανορθωτής τάσης (voltage rectifier multiplier). Η δίοδος είναι το κύριο συστατικό ενός κυκλώματος ανορθωτή. Η απόδοση διόρθωσης ενός ανορθωτή εξαρτάται κυρίως από το ρεύμα κορεσμού, τη χωρητικότητα σύνδεσης και την αντίσταση αγωγιμότητας της διόδου. Το κύκλωμα ενός ανορθωτή, ιδιαίτερα της διόδου, καθορίζει την απόδοση μετατροπής RF-to-DC. Γενικά, μια δίοδος με χαμηλότερη ενσωματωμένη τάση μπορεί να επιτύχει υψηλότερη απόδοση ανόρθωσης. Αυτό συμβαίνει επειδή μια μεγαλύτερη τάση θα έχει ως αποτέλεσμα σημαντικά πιο αρμονικά σήματα λόγω των μη γραμμικών χαρακτηριστικών της διόδου, μειώνοντας έτσι ουσιαστικά την απόδοση της ανόρθωσης [44]. Οι βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις αναφέρουν μοντέλα που μπορούν να αναπτυχθούν για να χαρακτηρίσουν την ανόρθωση με χαμηλή ισχύ εισόδου και να περιγράψουν τη δυναμική φόρτιση του πυκνωτή, όμως τα υλικά ηλεκτρονικών κυκλωμάτων είναι πέρα από το πεδίο εφαρμογής της παρούσας διατριβής.

5.4 Σχεδιασμός κυκλωμάτων δέκτη και αρχιτεκτονικές

Μια τυπική αρχιτεκτονική ενός παραδοσιακού δέκτη πληροφοριών που έχει σχεδιαστεί κατά κύριο λόγο για τη λήψη πληροφοριών ενδέχεται να μην είναι βέλτιστη για την ταυτόχρονη ασύρματη μεταφορά πληροφοριών και μεταφορά ενέργειας τύπου SWIPT. Ο λόγος είναι επειδή η λήψη πληροφοριών και η συλλογή ενέργειας από ραδιοσυχνότητες (RF) λειτουργεί σε εντελώς διαφορετικά επίπεδα ευαισθησίας ισχύος π.χ. -10 dBm για συλλογή ενέργειας έναντι -60 dBm για λήψη πληροφοριών. Για αυτό τον λόγο μπορούμε να συναντήσουμε τέσσερις διαφορετικούς τύπους αρχιτεκτονικών δέκτη. Ας δούμε πιο κάτω συνοπτικά αυτές τις αρχιτεκτονικές.

1. **Αρχιτεκτονική διαχωρισμένου δέκτη (Separated Receiver Architecture):** Αυτή η αρχιτεκτονική διαχωρισμένου δέκτη, γνωστή και ως μεταγωγή (διακόπτης) κεραίας, εξοπλίζει τον συλλέκτη ενέργειας και τον δέκτη πληροφοριών με ανεξάρτητες κεραίες έτσι ώστε να παρατηρούν διαφορετικά κανάλια. Το σχήμα 5.5 δείχνει το μοντέλο της διαχωρισμένης αρχιτεκτονικής στο δέκτη. Η συστοιχία κεραιών χωρίζεται σε δύο ομάδες με το καθένα να συνδέεται με τον συλλέκτη ενέργειας ή τον δέκτη πληροφοριών. Κατά συνέπεια, αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει τη διεξαγωγή της συλλογή ενέργειας και την αποκωδικοποίηση πληροφοριών ανεξάρτητα και ταυτόχρονα. Η εναλλαγή μεταξύ των κεραιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σκοπούς βελτιστοποίησης της απόδοσης στη διαχωρισμένη αρχιτεκτονική δέκτη. Η αντιστάθμιση μεταξύ του επιτεύξιμου ρυθμού πληροφόρησης και της ενέργειας που

συλλέγεται, μπορεί να βελτιστοποιηθεί με βάση τις πληροφορίες κατάστασης καναλιών και την ανατροφοδότηση από τους δύο μεμονωμένους δέκτες στον πομπό [47].



Σχήμα 5.5: Αρχιτεκτονική συγκομιδής από πηγές RF τύπου διαχωρισμένου δέκτη.

2. Συντοπισμένη Αρχιτεκτονική Δέκτη (Co-located Receiver Architecture):

Η αρχιτεκτονική του συντοπισμένου δέκτη επιτρέπει στον συλλέκτη ενέργειας και στον δέκτη πληροφοριών να μοιράζονται την ίδια κεραία, έτσι ώστε να παρατηρούν το ίδιο κανάλι. Κάνοντας χρήση μίας μόνο κεραίας, με αυτή την αρχιτεκτονική, μπορούμε να επιτρέψουμε μικρότερο μέγεθος στον δέκτη σε σύγκριση με τον χωριστό δέκτη. Αυτή η αρχιτεκτονική μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο μοντέλα. α) Χρονικής εναλλαγής (time-switching) και β) διαχωρισμού ισχύος (power-splitting).

A) Δέκτης χρονικής εναλλαγής: Η αρχιτεκτονική χρονικής εναλλαγής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6 επιτρέπει στον κόμβο δικτύου να εναλλάσσει και να χρησιμοποιεί είτε τον δέκτη πληροφοριών είτε τον συλλέκτη ενέργειας RF έτσι, ώστε να λαμβάνει σήματα ραδιοσυχνότητας, αντίστοιχα. Ο δέκτης αποτελείται από κύκλωμα αποκωδικοποίησης πληροφοριών, μια συσκευή συγκομιδής ενέργειας και έναν διακόπτη σε κάθε κεραία. Συγκεκριμένα, η κάθε κεραία μπορεί να μεταβαίνει ανάμεσα στα κυκλώματα των πληροφοριών και της συγκομιδής περιοδικά, βασισμένη σε μια αλληλουχία αλλαγής χρόνου. Λαμβάνοντας υπόψη τα στατιστικά στοιχεία του καναλιού και την ποιότητα της υπηρεσίας (QoS) όσον αφορά την μεταφορά ενέργειας, η μεταβίβαση χρονικής εναλλαγής, μπορεί να βελτιστοποιήσει το σήμα μετάδοσης για διαφορετικούς στόχους του συστήματος.

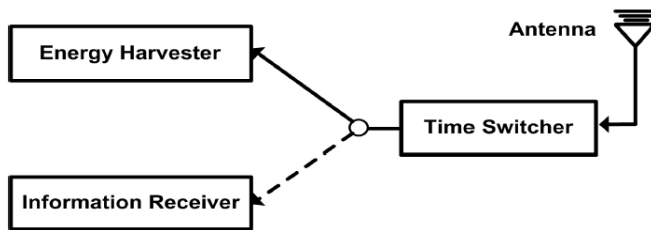
Όταν ο δέκτης χρονικής εναλλαγής j εργάζεται σε λειτουργία συγκομιδής ενέργειας, η ισχύς που συλλέγεται από την πηγή i μπορεί να εκφραστεί ως εξής :

$$P_{j,i} = \eta P_i |H_{i,j}|^2 \quad (14)$$

Όπου το η δηλώνει το συντελεστή απόδοσης της συλλογής ενεργείας, P_i η ισχύς μετάδοσης στην πηγή i , και $H_{i,j}$ δηλώνει το κέρδος του καναλιού μετάδοσης μεταξύ της πηγής i και του δέκτη j .

Ας υποθέσουμε ότι W υποδηλώνει το εύρος ζώνης μετάδοσης και το σ^2 την ισχύ του θορύβου. Όταν ο δέκτης χρονικής εναλλαγής j εργάζεται σε λειτουργία αποκωδικοποίησης πληροφοριών, ο μέγιστος ρυθμός αποκωδικοποίησης των πληροφοριών από την πηγή i είναι :

$$R_{j,i} = W \log(1 + P_i |H_{i,j}|^2 / \sigma^2) \quad (15)$$



Σχήμα 5.6: Αρχιτεκτονική συγκομιδής από πηγές RF τύπου χρονικής εναλλαγής [42].

Β) Δέκτης διαχωρισμού ισχύος: Χρησιμοποιώντας μια παθητική μονάδα διαίρεσης ισχύος, αυτός ο δέκτης χωρίζει την λαμβανόμενη ισχύ από κάθε κεραία σε δύο ροές ρεύματος με μια συγκεκριμένη αναλογία διάσπασης ισχύος πριν εκτελεστεί οποιαδήποτε ενεργή επεξεργασία αναλογικού - ψηφιακού σήματος. Στη συνέχεια, οι δύο ροές πληροφοριών αποστέλλονται στον συλλογέα ενέργειας και στον αποκωδικοποιητή πληροφοριών, αντίστοιχα, για διευκόλυνση του SWIPT. Ο λόγος διαχωρισμού ισχύος μπορεί να βελτιστοποιηθεί για κάθε κεραία λήψης. Συγκεκριμένα, μπορεί να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ του επιτεύξιμου ρυθμού πληροφόρησης του συστήματος και της συλλεχθείσας ενέργειας, μεταβάλλοντας την τιμή των αναλογιών διαχωρισμού ισχύος. Περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης μπορεί να επιτευχθεί με βελτιστοποίηση του λόγου σήματος και του διαχωρισμού ισχύος [47].

Όπως θα δούμε σε επόμενη ενότητα (εχνικές SWIPT), η εναλλαγή του διαχωρισμού ισχύος απαιτεί έναν απλό διακόπτη και επιτυγχάνει καλύτερη ανταλλαγή μεταξύ ρυθμού ενημέρωσης και του ποσού της ενέργειας ραδιοκυμάτων που μεταφέρεται.

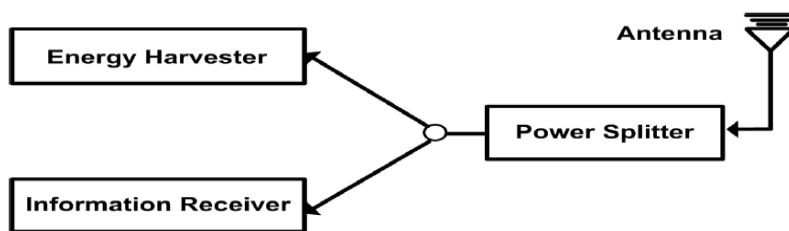
Στην αρχιτεκτονική διαχωρισμού ισχύος όπως βλέπουμε στο πιο κάτω σχήμα 5.7, τα λαμβανόμενα σήματα RF χωρίζονται σε δύο ροές, μια για τον δέκτη πληροφοριών και μια για τον συλλέκτη ραδιοσυχνοτήτων, με διαφορετικά επίπεδα ισχύος.

Ας υποθέσουμε ότι $\theta_j \in [0,1]$ δηλώνει το συντελεστή διάσπασης ισχύος για τον δέκτη j , δηλαδή το θ_j είναι το κλάσμα των σημάτων RF που χρησιμοποιούνται για την συλλογή ενέργειας, η ισχύς της συγκομιζόμενης ενέργειας RF στον δέκτη διαχωρισμού ισχύος j από την πηγή i , μπορεί να υπολογιστεί ως εξής :

$$P_{j,i} = P_i |H_{i,j}|^2 \theta_j \quad (16)$$

Ας υποθέσουμε ότι σ_{sp}^2 υποδηλώνει την ισχύ του θορύβου επεξεργασίας σήματος. Ο μέγιστος ρυθμός αποκωδικοποίησης πληροφοριών στον δέκτη διαχωρισμού ισχύος j από την πηγή i είναι :

$$R_{j,i} = W \log(1 + (1 - \theta_i)P_i |H_{i,j}|^2 / (\sigma^2 + \sigma_{sp}^2)) \quad (17)$$

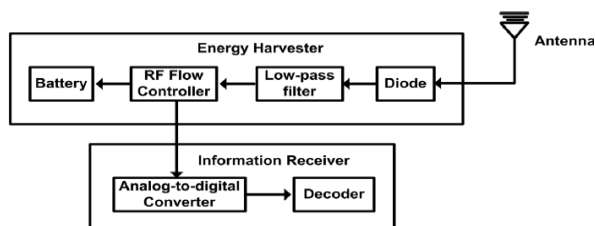


Σχήμα 5.7: Αρχιτεκτονική συγκομιδής από πηγές RF τύπου διαχωρισμού ισχύος [42].

3. Ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική δέκτη (Integrated Receiver Architecture):

Στην ενσωματωμένη αρχιτεκτονική δέκτη, η συγκομιδή ενέργειας από πηγές RF καθώς και η μετατροπή για αποκωδικοποίηση πληροφοριών, ενσωματώνεται στον συλλέκτη ενέργειας μέσω του ανορθωτή. Επομένως, αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει μικρότερα κυκλώματα και κατά συνέπεια μικρότερο μέγεθος συσκευής.

Το Σχήμα 5.8 δείχνει το μοντέλο της ολοκληρωμένης - ενσωματωμένης αρχιτεκτονικής δέκτη. Ο έλεγχος ροής σημάτων RF μπορεί να υιοθετηθεί μέσω εναλλαγής διακλάδωσης και διαχωρισμού ισχύος, όπως στην αρχιτεκτονική του συντονισμένου δέκτη. Ωστόσο, η διάφορα σε αυτή την αρχιτεκτονική είναι ότι η εναλλαγή και ο διαχωρισμός ισχύος υλοποιούνται μαζί στην αρχιτεκτονική δέκτη.

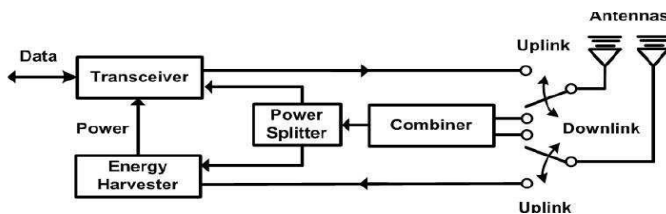


Σχήμα 5.8: Ενσωματωμένη - Ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική δέκτη συγκομιδής RF [44].

4. Ιδανική Αρχιτεκτονική δέκτη (Ideal Receiver Architecture): Η ιδανική αρχιτεκτονική δέκτη υποθέτει ότι ο δέκτης μπορεί να είναι σε θέση να εξάγει τα RF σήματα, δηλαδή να κάνει συγκομιδή ενέργειας από τα ίδια σήματα που

χρησιμοποιούνται για αποκωδικοποίηση πληροφοριών. Ωστόσο, αυτό μοντέλο δεν μπορεί να είναι ρεαλιστικά πρακτικό λόγω του ότι ο σχεδιασμός των σημερινών κυκλωμάτων δεν είναι ακόμη σε θέση να μπορεί να αποσπάσει ενέργεια απευθείας μέσω ραδιοσυχνοτήτων που προέρχονται από σήματα αποκωδικοποιημένων πληροφοριών. Οποιαδήποτε ενέργεια που μεταφέρεται από τα εκ-λαμβανόμενα σήματα ραδιοσυχνοτήτων που αποστέλλονται για τον δέκτη λήψης πληροφοριών χάνεται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας για την αποκωδικοποίηση των πληροφοριών. Μόνο με συστοιχία κεραιών, μπορεί να υιοθετηθεί αυτή η ιδανική αρχιτεκτονική δέκτη, κάνοντας χρήση διπλών κεραιών. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9 υιοθετείται ένας συνδυαστής για να συνδυάσει τα σήματα RF στην είσοδο για να πετύχει βελτίωση της λαμβανόμενης ισχύος [42].

4.



Formatted: Numbered + Level: 1 + Numbering Style: 1, 2, 3, ... + Start at: 1 + Alignment: Left + Aligned at: 0.63 cm + Indent at: 1.27 cm

Σχήμα 5.9: Αρχιτεκτονική δέκτη συγκομιδής ενέργειας RF μέσω διπλών κεραιών.

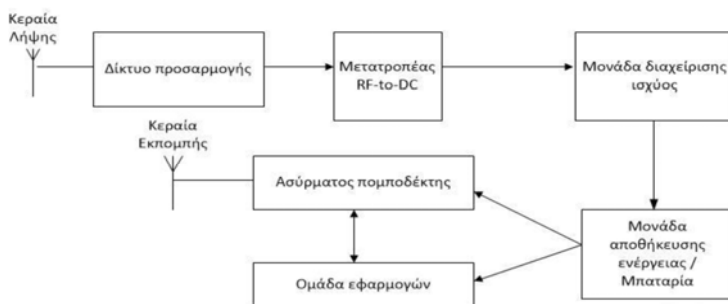
5.5 Αρχιτεκτονικές και τεχνικές SWIPT

Μερικές θεωρητικές μελέτες που έχουν γίνει για το SWIPT υποθέτουν ότι ένα σήμα μπορεί να μεταδώσει τόσο τις πληροφορίες όσο και την ενέργεια του χωρίς απώλειες, αποκαλύπτοντας έτσι την θεμελιώδη ανταλλαγή μεταξύ πληροφοριών και της μεταφοράς ισχύος. Ωστόσο, πρακτικά αυτή η ταυτόχρονη μεταφορά πληροφοριών και ενέργειας δεν είναι δυνατή στην πράξη εφόσον οποιαδήποτε συγκομιδή ενέργειας διεξαχθεί 'καταστρέφει' το περιεχόμενο της πληροφορίας. Για να μπορεί να επιτευχθεί πρακτικά το SWIPT πρέπει το λαμβανόμενο σήμα να χωριστεί σε δύο διαφορετικά μέρη. Το ένα μέρος να είναι υπεύθυνο για την αποκωδικοποίηση πληροφοριών και το άλλο για την συλλογή ενέργειας. Ορισμένες αρχιτεκτονικές δέκτη που αναφέραμε στην ενότητα 5.4, όπως αυτή του διαχωρισμένου δέκτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη διαχωρισμού του σήματος σε διαφορετικούς τομείς. Αυτές περιλαμβάνουν τον διαχωρισμό σε χρονικής εναλλαγής (time), τον διαχωρισμό ισχύος (power), τον διαχωρισμό - μεταγωγή κεραίας (antenna) και των χωρικό διαχωρισμό (space), όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4. Ας δούμε πιο κάτω μερικές από αυτές τις τεχνικές.

5.5.1 Αρχιτεκτονικές δέκτη

Ένας πομποδέκτης WPT – SWIPT αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία:

1. Μια κεραία λήψης
2. Ένα δίκτυο προσαρμογής
3. Έναν μετατροπέα RF to DC ο οποίος μετατρέπει τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε συνεχή τάση DC
4. Μια μονάδα διαχείρισης ισχύος (η οποία αποφασίζει εάν η ηλεκτρική ενέργεια θα αποθηκευτεί ή θα χρησιμοποιηθεί για σκοπούς άμεσης μετάδοσης πληροφοριών)
5. Μια μονάδα αποθήκευσης ενέργειας – μπαταρία
6. Αισθητήρες ή άλλες εφαρμογές
7. Ένα ασύρματο πομποδέκτη
8. Μια κεραία εκπομπής



Σχήμα 5.10: Αρχιτεκτονική πομποδεκτών WPT - SWIPT

5.5.2 Τεχνικές SWIPT

Στις τεχνολογίες SWIPT το λαμβανόμενο σήμα πρέπει να χωριστεί σε δυο μέρη. Ένα για την συλλογή ενέργειας και ένα για την αποκωδικοποίηση των σημάτων. Ο χωρισμός του σήματος μπορεί να γίνει με έναν από τους πιο κάτω τρόπους :

A. Χρονικός διαχωρισμός (time switching) ή μεταγωγή χρόνου : Η αρχιτεκτονική χρονικής εναλλαγής (μεταγωγής), όπως παρουσιάζουμε στο Σχήμα 5.6, επιτρέπει στον κόμβο δικτύου να εναλλάσσει και να χρησιμοποιεί είτε τον δέκτη πληροφοριών είτε τον συλλέκτη ενέργειας RF, έτσι ώστε να λαμβάνει σήματα ραδιοσυχνοτήτων, αντίστοιχα. Όταν ενεργοποιείται ο διακόπτης, ο δέκτης εναλλάσσει μεταξύ της συγκομιδής ενέργειας και της αποκωδικοποίησης πληροφοριών. Ο διαχωρισμός του σήματος εκτελείται χρονικά και έτσι ολόκληρο το σήμα που λαμβάνεται σε μια χρονική θυρίδα χρησιμοποιείται είτε για σκοπούς αποκωδικοποίησης πληροφοριών είτε για σκοπούς συλλογής ισχύος (ηλεκτρικής ενέργειας). Αυτή η τεχνική στον δέκτη μπορεί να είναι απλή στην υλοποίηση της, απαιτεί όμως ακριβές χρονικό συγχρονισμό - προγραμματισμό μεταξύ εναλλαγής πληροφοριών και ενέργειας.

B. Μεταγωγή ισχύος (power-splitting) : Η μεταγωγή ισχύος, μπορεί να υλοποιηθεί με την αρχιτεκτονική του συντοπισμένου δέκτη (Co-located Receiver Architecture) που επιτρέπει στον συλλέκτη ενέργειας και στον δέκτη πληροφοριών να μοιράζονται την ίδια κεραία, έτσι

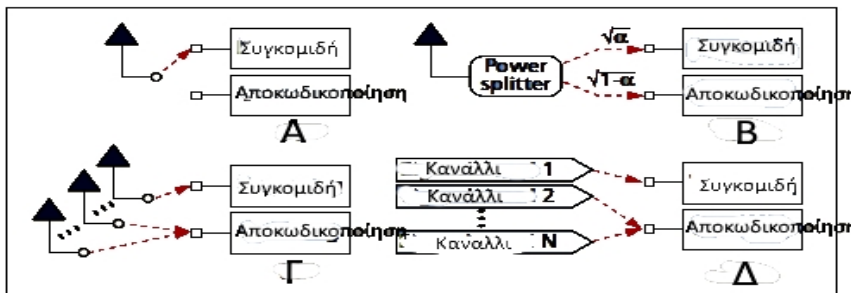
ώστε να παρατηρούν το ίδιο κανάλι. Και σε αυτή την περίπτωση ο κόμβος εναλλάσσει και να χρησιμοποιεί είτε τον δέκτη πληροφοριών είτε τον συλλέκτη ενέργειας RF, έτσι ώστε να λαμβάνει σήματα ραδιοσυχνότητας. Η τεχνική ισχύος (power-splitting) επιτυγχάνει SWIPT διαχωρίζοντας το λαμβανόμενο σήμα σε δύο ροές με διαφορετικά επίπεδα ισχύος. Η μια ροή σήματος αποστέλλεται στο κύκλωμα με ανορθωτική κεραία (rectenna) για τη συλλογή ενέργειας και η άλλη μετατρέπεται σε βασική ζώνη για αποκωδικοποίηση πληροφοριών. Αυτή η τεχνική είναι περισσότερο πολύπλοκη από την τεχνική χρονικής μεταγωγής και απαιτεί βελτιστοποίηση στον διαχωρισμό, όμως μπορεί να επιτύχει άμεσα ταυτόχρονη ροή ασύρματων πληροφοριών και μεταφορά ισχύος (SWIPT), καθώς το σήμα που λαμβάνεται σε μια χρονική θυρίδα χρησιμοποιείται και για τους δύο σκοπούς. Γι' αυτό το λόγο η συγκεκριμένη τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές που δεν είναι ανεκτές σε καθυστερήσεις, για το λόγο ότι οι λειτουργίες αυτής της τεχνικής μπορούν να εκτελούνται ταυτόχρονα.

Γ. Μεταγωγή κεραιών (Antenna switching)

Στην προηγούμενη ενότητα αναφέραμε τους σχεδιασμούς δέκτη, όπως μπορούμε να δούμε στο Σχήμα 5.8 μπορεί να χρησιμοποιηθεί αρχιτεκτονική δέκτη συγκομιδής ενέργειας RF μέσω διπλών κεραιών. Σε αυτή την προσέγγιση η τεχνική μεταγωγής κεραιάς μεταβάλλει δυναμικά κάθε κεραία μεταξύ σε κατάσταση αποκωδικοποίησης και ανόρθωσης (για συγκομιδή ενέργειας) για την επίτευξη SWIPT μεταξύ των κεραιών. Αυτή η τεχνική διαιρεί τις κεραιές λήψης σε δύο ομάδες όπου η μια ομάδα κεραιών χρησιμοποιείται για την αποκωδικοποίηση πληροφοριών και η άλλη για τη συγκομιδή ενέργειας. Αυτή η τεχνική όμως απαιτεί βελτιστοποίηση προσαρμογής των στοιχείων κεραιάς, για αποκωδικοποίηση πληροφοριών και συλλογή ενέργειας. Με χρήση δυναμικού προγραμματισμού και διαφορών τεχνικών μπορεί να λυθούν τα προβλήματα αναμετάδοσης σε κανάλια MIMO, όπου ένας κόμβος χρησιμοποιεί την συλλεγόμενη ενέργεια για να αναμεταδώσει ένα ληφθεί σήμα, καθώς για υπόλοιπες άλλες λειτουργίες.

Δ. Χωρική μεταγωγή (spatial switching)

Η τεχνική χωρικής μεταγωγής μπορεί να εφαρμοστεί σε διαμορφώσεις MIMO και μπορεί να επιτυγχάνει SWIPT στον χωρικό τομέα εκμεταλλευόμενη τις παρεμβολές στο κανάλι. Βασισμένο στην αποδόμηση μοναδιαίας τιμής (SVD) των καναλιών MIMO, η ζεύξη επικοινωνίας μετατρέπεται σε παράλληλα κανάλια που μπορούν να μεταφέρουν πληροφορίες ή ενέργεια (Σχήμα 5.13). Στην έξοδο των κάθε καναλιών υπάρχει ένας διακόπτης που οδηγεί την έξοδο του καναλιού είτε το συμβατικό κύκλωμα αποκωδικοποίησης ή στο κύκλωμα συγκομιδής ενέργειας. Η τεχνική αυτή έχει κάποιες ιδιομορφίες σχετικά με την κατανομή ισχύος στο κανάλι όπου απαιτεί βελτιστοποίηση όσον αφορά τη μέγιστη ισχύ ανά κανάλι. Ακόμη, η χωρική μεταγωγή έχει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα από τους άλλους τρόπους, γιατί το πρόβλημα της βέλτιστης εκχώρησης υπο - καναλιών θεωρείται ως ένα μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης.



Σχήμα 5.11: Τεχνικές μετάδοσης SWIPT σε διαφορετικούς τομείς : α) Χρονικής μεταγωγής (time switching), β) Μεταγωγής ισχύος (power-splitting), γ) Μεταγωγής κεραίων (Antena switching) και δ) χωρικής μεταγωγής (spatial switching) [38]

Σε συστήματα SWIPT δεν είναι δυνατή η αποκωδικοποίηση πληροφοριών και συλλογή ενέργειας στο ίδιο λαμβανόμενο σήμα. Επιπλέον ένας δέκτης με μία μόνο κεραία συνήθως μπορεί να μην είναι σε θέση να συλλέξει αρκετή ενέργεια για την εξασφάλιση αξιόπιστης τροφοδοσίας. Ως εκ τούτου, η χρήση κατανεμημένων κεραιών, όπως στα συστήματα MIMO και η χρήση αναμεταδοτών, θα δημιουργήσει προϋποθέσεις για επαρκή ισχύ και για αξιόπιστη λειτουργία μιας συσκευής.

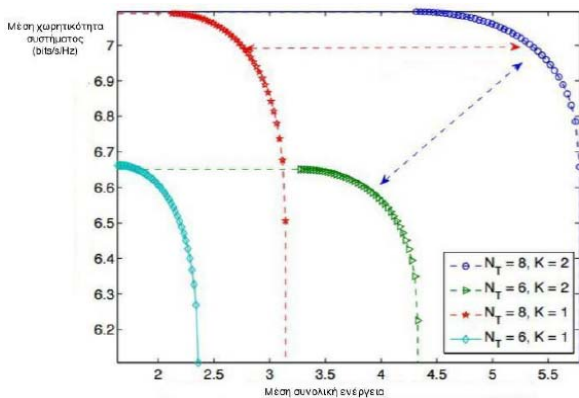
5.5.3 Κατανομή πόρων στα συστήματα SWIPT

Σε αυτή την ενότητα θα σχολιάσουμε τα οφέλη χρήσης τεχνικών SWIPT σε εφαρμογές κατανομής πόρων. Οι αλγόριθμοι κατανομής πόρων είναι αναγκαίοι για σκοπούς βελτιστοποίησης της χρήσης περιορισμένων πόρων στο φυσικό στρώμα, όπως είναι η ενέργεια, το εύρος ζώνης, ο χρόνος και ο χώρος σε συστήματα με πολλαπλούς χρήστες. Η αποδοτική μεταφορά ενέργειας διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην απόδοση του συστήματος. Στα συστήματα SWIPT η κατανομή πόρων ακολουθεί τις παρακάτω αρχές :

- Διαχείριση παρεμβολών : Οι παρεμβολές είναι οι κύριες αιτίες παραμόρφωσης των δεδομένων στα κανάλια επικοινωνιών στα παραδοσιακά δίκτυα. Όμως, στα συστήματα SWIPT η συλλογή ενέργειας στον κόμβο λήψης μπορεί να γίνει από πηγές που έχουν αρκετές παρεμβολές. Με αυτόν το τρόπο η συνεισφορά των σημάτων παρεμβολής έχει θετική δράση. Στην πραγματικότητα, η προσθήκη τεχνητών παρεμβολών σε ένα επικοινωνιακό δίκτυο μπορεί να είναι ωφέλιμο για την συνολική απόδοση του συστήματος, ειδικά όταν οι δέκτες δεν έχουν αρκετή ενέργεια για να υποστηρίξουν τις κανονικές λειτουργίες τους, δεδομένου ότι σε αυτή τη περίπτωση η αποκωδικοποίηση πληροφοριών είναι λιγότερο σημαντική σε σύγκριση με την συγκομιδή ενέργειας.
- Χρονοπρογραμματισμός διάρκειας μεταξύ πληροφοριών και ενέργειας : Για παθητικούς κόμβους λήψης, όπως μικρούς αισθητήρες, η μετάδοση δεδομένων στην άνω ζεύξη (uplink) δεν είναι εφικτή αν δεν έχουν συλλέξει αρκετή ενέργεια από την κάτω ζεύξη (downlink). Όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια συλλογής ενέργειας τόσο

υψηλότερο επίπεδο ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην άνω ζώνη (uplink). Ωστόσο, αυτό συνεπάγεται μικρότερη διάρκεια της μετάδοσης δεδομένων και χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Έτσι μεταβάλλοντας τα ποσά του χρόνου που διατίθεται για την συγκομιδή ενεργείας και μετάδοση πληροφοριών, η απόδοση του συστήματος μπορεί να βελτιωθεί, όμως γι' αυτό τον λόγο πρέπει να βρεθούν βέλτιστες λύσεις καταμερισμού του χρόνου στις δυο ζεύξεις [38].

- Έλεγχος ισχύος και χρονοπρογραμματισμός χρηστών : Γνωρίζουμε ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα RF μπορούν να έχουν διπλό ρολό. Μπορούν να μεταφέρουν ενέργεια και πληροφορία στους δέκτες (κόμβους λήψης). Ωστόσο η ευαισθησία του δέκτη είναι εντελώς διαφορετική για τις δυο περιπτώσεις και μπορεί να αποτελεί εμπόδιο για την πραγματοποίηση του SWIPT. Για τη συλλογή ενέργειας είναι -10 dBm, ενώ για την αποκωδικοποίηση πληροφοριών είναι -60 dBm. Για να είναι εφικτό και αποτελεσματικό το SWIPT απαιτείται έλεγχος ισχύος και χρονοπρογραμματισμός χρηστών για να υπάρξει απόδοση στη μεταφοράς ενέργειας και πληροφοριών. Για παράδειγμα, οι αδρανείς χρήστες σε ένα δίκτυο που έχουν υψηλά κέρδη καναλιού μπορούν να προγραμματιστούν για μεταφορά ισχύος για να παρατείνουν την διάρκεια ζωής του δικτύου. Για αυτό το λόγο ο ευκαιριακός έλεγχος ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκμετάλλευση των εξασθενίσεων στο κανάλι για να βελτιώσει την απόδοση μεταφοράς ενεργείας και πληροφοριών. Το πιο κάτω σχήμα 5.12 απεικονίζει ένα παράδειγμα ελέγχου ισχύος σε συστήματα SWIPT. Παρουσιάζεται η μέση χωρητικότητα του συστήματος σε σχέση με την συνολική συλλεγμένη ενεργεία σε ένα σύστημα κάτω ζεύξης (downlink). [38].



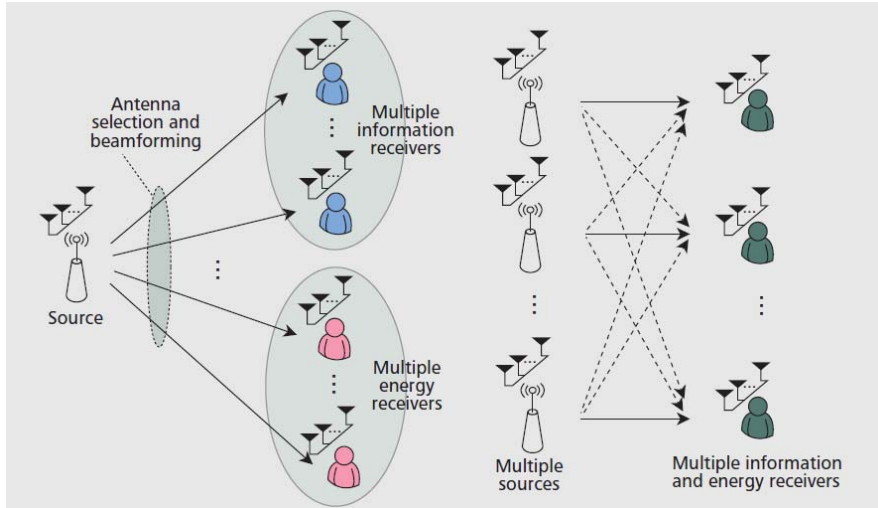
Σχήμα 5.12: Σχέση μέσης χωρητικότητας συστήματος (b / s / Hz) με τη μέση συνολική συλλεγθείσα ενέργεια (mJ / s) για διαφορετικούς αριθμούς δεκτών [38].

Το Σχήμα 5.12 δείχνει τη σχέση της μέσης χωρητικότητας συστήματος με τη μέση συνολική ενέργεια με βάση τον έλεγχο ισχύος. Συγκεκριμένα, ο πομπός είναι εξοπλισμένος με N_T κεραιές, κόμβο λήψης πληροφοριών και K κόμβους για λήψη σημάτων συλλογής ενέργειας. Η συνολική

ισχύς εκπομπής είναι 10W, η ισχύς θορύβου είναι -23dBm, η συχνότητα είναι 915MHz, το κέρδος των κεραιών είναι 10dBi και η απώλεια RF-to-DC λόγω μετατροπών είναι 3dB. Παρατηρούμε ότι η μέση χωρητικότητα συστήματος αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός κεραιών N_t . Επίσης, η μέση συνολική ενέργεια αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των K κόμβων λήψης συλλογής ενέργειας.

5.5.4 Δίκτυα MIMO SWIPT

Οι τεχνικές MIMO μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δώσουν πλεονέκτημα στα δίκτυα SWIPT. Λόγω των χαρακτηριστικών της ασύρματης μετάδοσης η χρήση επιπροσθέτων κεραιών στον δέκτη μπορεί να αποφέρει περισσότερη συγκομιδή ενέργειας και επίσης οι επιπλέον κεραιές εκπομπής μπορούν να αξιοποιηθούν για τη διαμόρφωση δέσμης (Beamforming - Ενότητα 4.3.4), γεγονός που μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση της μετάδοσης πληροφοριών και της μεταφοράς ενέργειας. Ακόμη τα οφέλη του MIMO είναι εμφανής σε σενάρια με πολλαπλούς χρήστες για το λόγο ότι μια πηγή εξοπλισμένη με πολλαπλές κεραιές μπορεί να εξυπηρετεί πολλαπλούς δέκτες ταυτόχρονα και έτσι τα σήματα τα οποία χρησιμοποιούνται για μετάδοση πληροφοριών μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης για σκοπούς ασύρματης συγκομιδής ενέργειας [47]. Λόγω του ότι υπάρχουν πολλοί χρήστες στο σύστημα, οι παρεμβολές χρονικού καναλιού πρέπει να ληφθούν υπόψη και να υλοποιηθούν στρατηγικές μετριασμού των παρεμβολών στα συστήματα SWIPT. Οι τεχνικές μετριασμού παρεμβολών όπως είναι αυτή της κωδικοποίησης, αποστέλλει πληροφορίες στους δέκτες που είναι ελεύθεροι από παρεμβολές, καθώς η ενέργεια μεταδίδεται στους υπόλοιπους δέκτες. Επιπλέον είναι ωφέλιμο να πραγματοποιείται χρονοπρογραμματισμός των χρηστών ο οποίος επιτρέπει στους χρήστες να αλλάζουν ρόλους μεταξύ της συγκομιδής ενέργειας και της λήψης πληροφοριών βάση της ποιότητάς του καναλιού, προκειμένου να διευρυνθεί περαιτέρω η περιοχή μεταξύ του ρυθμού πληροφοριών και της συγκομιδής ενέργειας. Το πιο κάτω σχήμα 5.13 δείχνει περίπτωση πολλαπλών χρηστών διάταξης MIMO σε εφαρμογή SWIPT όπου πολλαπλά ζεύγη σημάτων μοιράζονται το ίδιο φάσμα. Μπορούμε να δούμε ότι σε αυτά τα σενάρια ο συντονισμός των παρεμβολών φέρνει νέες προκλήσεις όσο και νέες ευκαιρίες για την υλοποίηση του SWIPT, οι οποίες είναι πολύ διαφορετικές από αυτές σε σενάρια με μεμονωμένες πηγές και προορισμούς.



Σχήμα 5.13: Δυο τυπικά σενάρια MIMO με πολλαπλούς χρήστες

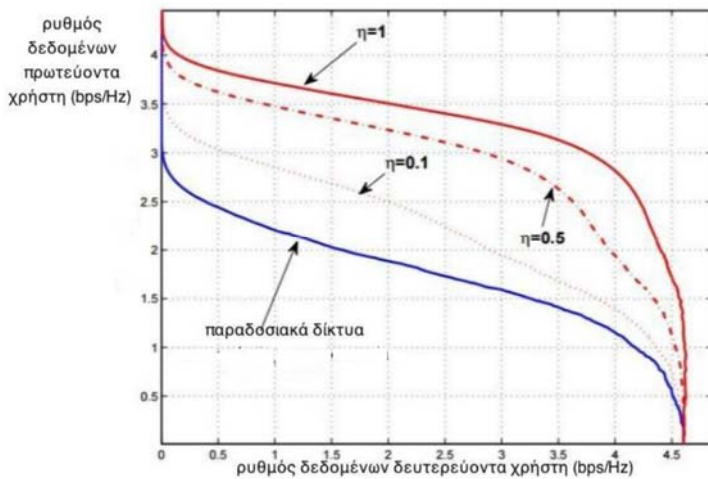
Συνδυασμός MIMO στα συνεργατικά δίκτυα SWIPT: Το MIMO και η συνεργατική αναμετάδοση πληροφοριών αντιπροσωπεύουν δύο διαφορετικούς τρόπους εκμετάλλευσης του χωρικού διαφορισμού (spatial diversity) και οι δύο τεχνικές μπορούν να ενισχύσουν σημαντικά την ενεργειακή απόδοση των συστημάτων, η οποία είναι ύψιστης σημασίας για τα συστήματα SWIPT. Ως εκ τούτου, ο συνδυασμός αυτών των δύο έξυπνων τεχνολογιών είναι μια φυσική επιλογή για τα συστήματα SWIPT [47]. Ας δώσουμε ένα παράδειγμα: Σε μια ακαδημαϊκή αίθουσα διδασκαλίας γεμάτη με φοιτητές υπάρχουν αρκετοί φορητοί υπολογιστές και κινητά τηλέφωνα που είναι εξοπλισμένα με πολλαπλές κεραίες. Ακόμη στην αίθουσα μπορούν να υπάρχουν διάφοροι αισθητήρες για παρακολούθηση των υποδομών του κτηρίου. Έτσι η αίθουσα μπορεί να θεωρηθεί ένα ετερογενές δίκτυο που αποτελείται από κινητές συσκευές με διαφορετικές δυνατότητες. Σε τέτοια περίπτωση, οι ανενεργές συσκευές με δυνατότητες MIMO μπορούν να αξιοποιηθούν ως αναμεταδότες για να βοηθήσουν τους ενεργούς χρήστες στο δίκτυο δίνοντας ταυτόχρονα και δυνατότητες τροφοδοσίας σε αισθητήρες χαμηλής κατανάλωσης. Δεδομένου ότι οι αναμεταδότες έχουν πολλαπλές κεραίες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιο προηγμένες αρχιτεκτονικές δέκτη, όπως αυτή της μεταγωγής κεραίας (Ενότητα 6.4.2). Επιπλέον, η χρήση αυτών των αναμεταδοτών MIMO ανοίγει τη δυνατότητα εξυπηρέτησης πολλαπλών σημάτων ταυτόχρονα. Σε αυτό το πλαίσιο, είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι η χρήση του SWIPT θα ενθαρρύνει τους ανενεργούς χρήστες MIMO να χρησιμοποιηθούν ως αναμεταδότες βοηθώντας έτσι άλλους χρήστες, δεδομένου ότι η παροχή βοήθειας σε άλλους χρήστες δεν μειώνει τη διάρκεια ζωής των μπαταριών στους αναμεταδότες. Ως εκ τούτου, οι αναμεταδότες MIMO μπορούν να αξιοποιηθούν ως επιπλέον εργαλείο για τη βελτίωση της απόδοσης και μπορούν να επιτύχουν βελτιωμένο συνδυασμό μεταξύ του ρυθμού πληροφόρησης και συγκομιδής ενέργειας. [48]

Διαχείριση παρεμβολών στα δίκτυα SWIPT: Στα παραδοσιακά δίκτυα επικοινωνιών, οι ομοδιαυλικές παρεμβολές αναγνωρίζονται ως ένας από τους κύριους παράγοντες που περιορίζουν την απόδοση των συστημάτων. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί μέσω σωστής κατανομής πόρων. Ωστόσο, στα συστήματα SWIPT οι δέκτες μπορούν να αντιμετωπίσουν ισχυρές παρεμβολές, δεδομένου ότι μπορεί να αντιμετωπιστούν ως μια ζωτική πηγή ενέργειας. Στην πραγματικότητα, η προσθήκη τεχνητής παρεμβολής στο δίκτυο επικοινωνίας μπορεί να ωφελήσει τη συνολική απόδοση του συστήματος, ειδικά όταν οι δέκτες δεν έχουν αρκετή ενέργεια για να υποστηρίξουν τις κανονικές λειτουργίες τους, δεδομένου ότι στην περίπτωση αυτή, η αποκωδικοποίηση πληροφοριών καθίσταται λιγότερο σημαντική σε σύγκριση με τη συγκομιδή ενέργειας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2 οι παρεμβολές, μπορεί να δημιουργήσουν μια "ζώνη ασύρματης φόρτισης" [38].

5.5.5 SWIPT σε ασύρματα συνεργατικά δίκτυα συγκομιδής ενέργειας.

Γνωρίζουμε ότι οι τεχνολογίες SWIPT ανοίγουν νέες ευκαιρίες στα συνεργατικά δίκτυα επικοινωνιών. Γι' αυτό το λόγο, θα παρουσιάσουμε ένα παράδειγμα όπου οι τεχνικές SWIPT μπορούν να βελτιώσουν τα παραδοσιακά συνεργατικά 'γνωσιακά' δίκτυα (cooperative cognitive radio networks) με στόχο την επαρκή μετάδοση ισχύος. Στα συνεργατικά γνωσιακά δίκτυα CCRNs (Cooperative Cognitive Radio Networks), τα συστήματα πρωτεύοντων και δευτερεύοντων χρηστών συνεργάζονται μεταξύ τους για τον μερισμό φάσματος. Οι δευτερεύοντες χρήστες μεταδίδουν τις πληροφορίες από τον κύριο (πρωτεύοντα) πομπό στον κύριο (πρωτεύων) χρήστη ως αναμεταδότες όταν υπάρχει συμφόρηση στο σύστημα. Παράλληλα, μπορούν να χρησιμοποιήσουν το πρωτεύων (κύριο) φάσμα για να στείλουν πληροφορίες στους δευτερεύοντες χρήστες. Ωστόσο για να συμβεί αυτό, ο δευτερεύων μεταδότης θα πρέπει να έχει επαρκή ισχύ μετάδοσης και να είναι συνδεδεμένος με το πρωτεύων σύστημα μέσω ενός κύριου καναλιού. Αυτή η ζεύξη (μέσω ενός) καναλιού μπορεί να επιτευχθεί με την κατάλληλη τοποθέτηση των κόμβων μεταξύ τους. Ωστόσο, ο δευτερεύων αναμεταδότης είναι συνήθως ένας αναμεταδότης χαμηλής ισχύος και όχι ένας ισχυρός σταθμός βάσης για αυτό έχουμε ως αποτέλεσμα, η ισχύς μετάδοσης να περιορίζεται [51].

Οι τεχνικές SWIPT μπορούν να μας παρέχουν επαρκή ισχύ μετάδοσης χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα ενίσχυσης-και-προώθησης και διαχωρισμού ισχύος. Συγκεκριμένα, χρειάζονται δυο φάσεις για να ολοκληρωθεί η επικοινωνία. Στην πρώτη φάση, ο πρωτεύων πομπός μεταδίδει την πληροφορία και την ενέργεια. Στη συνέχεια ο δευτερεύων πομπός χωρίζει το λαμβανόμενο σήμα σε δυο μέρη με βάση μια μεταβλητή, η οποία 'δίνει' ένα μέρος του σήματος για μετάδοση πληροφορίας στον πρωτεύοντα χρήστη και το άλλο μέρος για συλλογή ενέργειας με χρήστη του διαχωρισμού ισχύος. Στη δεύτερη φάση, ο δευτερεύων πομπός ενισχύει και κωδικοποιεί τα δεδομένα του χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο ενίσχυσης-και-προώθησης και τα στέλνει στον πρωτεύων χρήστη και στον δευτερεύων χρήστη. Ο δευτερεύων μεταδότης τότε πρέπει να βελτιστοποιήσει την επιλογή της μεταβλητής και τον τρόπο κωδικοποίησης των δεδομένων για να επιτύχει μεγιστοποίηση των ρυθμών αποστολής των δεδομένων [38].



Σχήμα 5.14: Σχέση ρυθμού δεδομένων πρωτεύοντα χρήστη με ρυθμό δεδομένων δευτερεύοντα χρήστη. Το η εξετάζει την απόδοση RF-DC σε διαφορετικές τιμές [51].

Το σχήμα 5.14 παρουσιάζει την επιτεύξιμη περιοχή τιμών σε συστήματα πληροφόρησης και ενεργειακής συνεργασίας σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα συνεργασίας (πληροφορίας μόνο). Το γράφημα παρουσιάζει το ρυθμό δεδομένων του πρωτεύοντα χρήστη σε σχέση με τον ρυθμό δεδομένων του δευτερεύοντα χρήστη στα δίκτυα CCRNs και στα παραδοσιακά γνωσιακά δίκτυα, με χρήση της τεχνολογίας SWIPT. Ο δεύτερος πομπός απέχει 1m από όλους τους άλλους κόμβους και ο πρώτος μεταδότης απέχει 2m από τον κύριο χρήστη. Ο δευτερεύων πομπός έχει 4 κεραίες μετάδοσης και όλοι οι άλλοι κόμβοι του συστήματος έχουν μια κεραία μετάδοσης. Η ενέργεια του κυρίου σήματος είναι 20dB και η ενέργεια του δευτέρου σήματος είναι 10dB. Ο εκθέτης απωλειών διάδοσης είναι 3.5 και η παράμετρος K (για το μοντέλο καναλιού Rician) είναι 5dB. Η απόδοση RF-to-DC που εξετάζεται είναι $\eta=0.1$, 0.5, και 1. Όταν ο ρυθμός δεδομένων του πρώτου χρήστη είναι 2bps/Hz, ο δεύτερος χρήστης μπορεί να διπλασιάσει ή ακόμη και να τριπλασιάσει το δικό του ρυθμό, καθώς η απόδοση RF-to-DC ποικίλλει από 0.1 ως 1. Όταν ο ρυθμός δεδομένων του δευτέρου χρήστη είναι 1.5bps/Hz, ο πρώτος χρήστης μπορεί να αυξήσει τον ρυθμό του κατά 75% όταν ισχύει $\eta=1$ [51]. Είναι φανερό ότι οι επιτεύξιμες περιοχές διευρύνονται σημαντικά χάρη στην πρόσθετη ενεργειακή συνεργασία ακόμη και με την απόδοση RF-to-DC τόσο χαμηλή. Έτσι, η συνεργασία στον τομέα της ενέργειας, εισάγει σαφώς σημαντική αύξηση των επιδόσεων σε σχέση με τα υφιστάμενα γνωσιακά δίκτυα πληροφοριών CRN και θα για αυτό μπορεί να αποτελέσει μια πολλά υποσχόμενη λύση για τα μελλοντικά συνεργατικά 'γνωσιακά' δίκτυα CCRN [38].

5.6 Μοντελοποίηση συλλογής ενέργειας

5.6.1 Γενικές Μοντελοποιήσεις

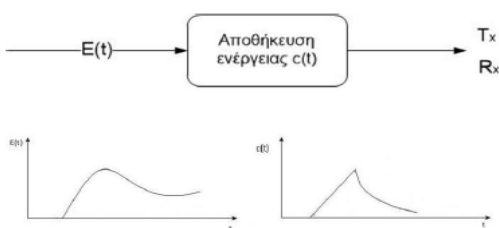
Η μοντελοποίηση της συλλογής ενέργειας έχει σημαντικό ρόλο στην αξιολόγηση και στον σχεδιασμό εφαρμογών ασυρμάτων επικοινωνιών με δυνατότητες συγκομιδής ενέργειας. Οι κύριες κατηγορίες μοντέλων είναι :

A. Ντετερμινιστικές μοντελοποιήσεις (deterministic models): Σε αυτού του είδους τις μοντελοποιήσεις οι δέκτες έχουν επίγνωση του χρόνου που χρειάζεται για να φτάσει η ενέργεια στους δέκτες, καθώς και η ποσότητα της ενέργειας από τους πομπούς. Για να διαχειριστούμε την ενέργεια σε αυτό το μοντέλο χρειαζόμαστε ακριβείς προβλέψεις γεγονότων για μια χρονική περίοδο. Γι' αυτό τον λόγο αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου η ενέργεια είναι από αποκλειστικές πηγές (Dedicated sources) και δεν έχει έντονες διακυμάνσεις, έτσι ώστε να μπορούμε να έχουμε σωστά αποτελέσματα στο μοντέλο.

B. Στοχαστικές μοντελοποιήσεις (stochastic models): Σε αυτού του είδους τις μοντελοποιήσεις η διαδικασία συλλογής ενέργειας θεωρείται ως στοχαστική διαδικασία. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας μοντελοποίησης είναι η περιγραφή της επιρροής των σύννεφων και ο ρόλος που διαδραματίζουν στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας επηρεάζοντας τις διαδικασίες ανόρθωσης (Ενότητα 3.4) [52].

Γ. Άλλες ή υβριδικές μοντελοποιήσεις (other or hybrid models): Είναι οι μοντελοποιήσεις που δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ούτε ντετερμινιστικές ούτε στοχαστικές. Αυτές μπορούν να χαρακτηριστούν ως υβριδικές μοντελοποιήσεις για το λόγο ότι μπορούν να χρησιμοποιούν ενέργεια από πολλές πηγές, με σκοπό την αύξηση του ρυθμού συλλογής ενέργειας για διαφορετικές λειτουργίες. Ακόμη, μπορούν να έχουν δυο μονάδες αποθήκευσης ενέργειας, όπως πυκνωτές ως κύρια μονάδα και μπαταρίες ως δευτερεύουσα μονάδα.

Στο Σχήμα 5.15 μπορούμε να δούμε μια απλή μοντελοποίηση της διαδικασίας συλλογής ενέργειας. Με $E(t)$ ορίζεται η ποσότητα της ενέργειας που συλλέγεται από τον κόμβο του συστήματος. $C(t)$ ορίζονται οι διεργασίες αποθήκευσης της ενέργειας. T_x και R_x είναι συντομογραφίες για τη μετάδοση και τη λήψη πληροφοριών, αντίστοιχα.



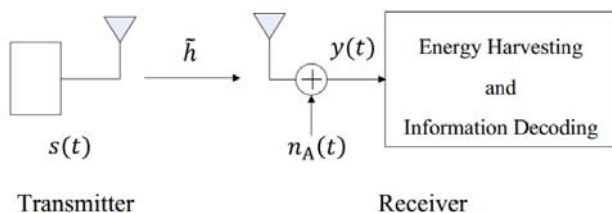
Σχήμα 5.15: Μοντελοποίηση συλλογής ενέργειας

5.6.2 Μοντελοποίηση SWIPT

Ένα ιδιαίτερο ενδιαφέρον και προκλητικό κομμάτι στη ασύρματη συγκομιδή ενέργειας είναι η ταυτόχρονη ασύρματη σύνδεση πληροφοριών και μεταφορά ισχύος (SWIPT). Καθώς το μέγεθος των αισθητήρων και των ασύρματων πομποδεκτών γίνεται μικρότερο, η χρήση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ως πηγή ενέργειας κρίνεται σημαντική και ουσιαστική με την ενοποίηση των διαδικασιών μετάδοσης πληροφοριών. Η ενοποίηση αυτή μπορεί να επιταχυνθεί με την τεχνολογίες SWIPT. Ένα σύστημα με ενσωμάτωση τεχνολογιών SWIPT μπορεί να παρέχει οφέλη σε σύγχρονα δίκτυα επικοινωνιών στα πλαίσια της κατανομής πόρων. Στην παρούσα διατριβή έχουμε δει και αναλύσει το θεωρητικό κομμάτι των τεχνικών συλλογής ενέργειας. Στη συνέχεια θα δούμε το πρακτικό κομμάτι και πώς υλοποιούνται οι τεχνολογίες. Σε αυτή την ενότητα μοντελοποιείται ένα σύστημα ταυτόχρονης ασύρματης μεταφοράς πληροφοριών και ισχύος (SWIPT) που αποτελείται από ένα πομπό και ένα δέκτη με τη συνδεδεμένα μέσω ενός καναλιού. Χρησιμοποιώντας τον διαχωρισμό ισχύος (power-splitting), αναλύεται ο δέκτης ενέργειας για να η εκφράσουμε την αποθηκευμένη ενέργεια. Θεωρούμε μια ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική δέκτη (ενότητα 5.4) πληροφοριών, μέσω του οποίου προκύπτει ένα κάτω όριο χωρητικότητας, που θεωρείται ρυθμός μετάδοσης πληροφοριών του συστήματος.

5.6.3 Μοντέλο συστήματος

Για το μοντέλο αυτό, θεωρούμε μία ασύρματη σύνδεση σημείου προς σημείο (point-to-point) με ταυτόχρονη ασύρματη μεταφορά ισχύος και πληροφοριών, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.16. Ο πομπός καθώς και ο δέκτης είναι εξοπλισμένοι με μία κεραία. Ο πομπός του συστήματος, εκπέμπει ένα μιγαδικό σήμα βασικής ζώνης μορφής $x(t) = A(t)e^{j\varphi(t)}$, όπου e είναι η βάση του αλγόριθμου και $A(t)$ είναι το πλάτος και $\varphi(t)$ η φάση του σήματος $x(t)$. Θεωρούμε ότι το σήμα $x(t)$ είναι στενής ζώνης με εύρος ζώνης Γ hertz.



Σχήμα 5.16: Μοντέλο συστήματος [67]

Το μεταδιδόμενο σήμα στη ζώνη ραδιοσυχνοτήτων μπορεί να εκφραστεί ως εξής :

$$s(t) = \sqrt{2P} A(t) \cos(2\pi f t + \varphi(t)) = \sqrt{2P} \operatorname{Re}\{x(t)e^{j2\pi f t}\} \quad (18)$$

όπου f η συχνότητα του φέροντος σήματος, P είναι η μέση ισχύς μετάδοσης. Τέλος, θεωρούμε ότι $\Gamma \ll f$. Το μεταδιδόμενο σήμα διαδίδεται μέσω ενός ασύρματου καναλιού, με κέρδος καναλιού $h < 0$ και μετατόπιση φάσης του συντελεστή $\theta \in [0, 2\pi)$. Το σήμα που εκπέμπεται, περνά από το κανάλι με μιγαδικό συντελεστή $h = \sqrt{h}e^{j\theta}$, ενώ ο παράγοντας L δηλώνει τις απώλειες ελεύθερου χώρου. Ο θόρυβος $n_A(t)$ που προέρχεται από την κεραία λήψης θεωρείται στενής ζώνης με Gaussian θόρυβο $n_A(t) = \sqrt{2R} \{ n_A(t)e^{j2\pi ft} \}$, με $n_A(t) = n_I(t) + jn_Q(t)$, όπου το $n_I(t)$ είναι η φάση και το $n_Q(t)$ η κάθετη συνιστώσα. Το λαμβανόμενο σήμα $y(t)$ το οποίο αλλοιώνεται από το θόρυβο της κεραίας μπορεί να εκφραστεί ως $y(t) = \sqrt{2}\text{Re}\{y(t)\}$, όπου για το σήμα $y(t)$ ισχύει ότι :

$$y(t) = h\sqrt{LPx}(t)e^{j2\pi ft} + n_A(t)e^{j2\pi ft} = |h| h\sqrt{LPx}(t)e^{j(2\pi ft + \theta)} + n_A(t)e^{j2\pi ft} \quad (19)$$

5.6.4 Δέκτης πληροφοριών

Το σχήμα 5.17 δείχνει τις τυποποιημένες λειτουργίες ενός δέκτη πληροφοριών με συνεκτική αποδιαμόρφωση. Το λαμβανόμενο σήμα ραδιοσυχνοτήτων $y(t)$ μετατρέπεται αρχικά σε ένα σύνθετο σήμα βασικής ζώνης $y_b(t)$ και στην συνέχεια γίνεται δειγματοληψία και ψηφιοποιείται από ένα μετατροπέα αναλογικό προς ψηφιακό για περαιτέρω αποκωδικοποίηση. Ο θόρυβος που εισάγεται από την ζώνη ραδιοσυχνοτήτων δηλώνεται ως $n_{\text{con}}(t)$ με $n_{\text{con}}(t) \sim \text{CN}(0, \sigma_{\text{con}}^2)$. Για λογούς απλότητας θεωρούμε τον μετατροπέα αναλογικού προς ψηφιακό σήματος με μηδέν θόρυβο. Η έξοδος του μετατροπέα διακριτού χρόνου δίνεται από την σχέση :

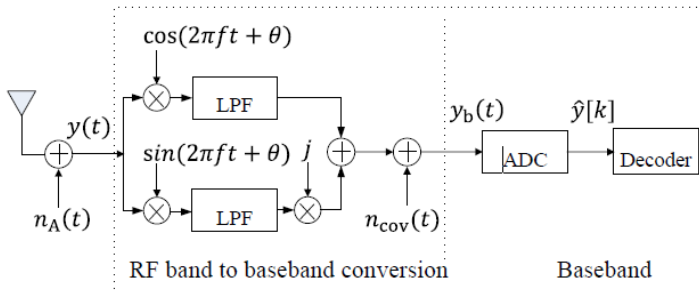
$$y[k] = \sqrt{hPx}[k] + n_A[k] + n_{\text{con}}[k] \quad (20)$$

Όπου $k = 1, 2, \dots$ υποδηλώνει το δείκτη συμβόλων. Από την εξίσωση 20 προκύπτει ότι το ισodύναμο κανάλι βασικής ζώνης για την ασύρματη μετάδοση πληροφοριών είναι το AWGN :

$$Y = \sqrt{hPX} + Z \quad (21)$$

Όπου το X και το Y υποδηλώνουν την είσοδο και την έξοδο του καναλιού, αντίστοιχα και $Z \sim \text{CN}(0, \sigma_A^2 + \sigma_{\text{con}}^2)$ υποδηλώνει τον σύνθετο θόρυβο Gaussian. Όταν η είσοδος του καναλιού διανέμεται ως $X \sim \text{CN}(0, 1)$, ο μέγιστος επιτρεπτός ρυθμός πληροφορίας (σε bps/Hz) ή η χωρητικότητα του καναλιού AWGN δίνεται από την σχέση :

$$R = \log_2 \left(1 + \frac{hP}{\sigma_A^2 + \sigma_{\text{con}}^2} \right) \quad (22)$$



Σχήμα 5.17: Δέκτης πληροφοριών [67]

Όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενες ενότητες, το σήμα που χρησιμοποιείται για συλλογή ενέργειας δεν μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για σκοπούς αποκωδικοποίησης πληροφοριών. Για να μπορέσουμε να αποφύγουμε αυτό τον περιορισμό, υιοθετούμε το πρωτόκολλο δυναμικού διαχωρισμού ισχύος (DPS - dynamic power splitting) που επιτρέπει την συλλογή ενέργειας και την αποκωδικοποίηση πληροφοριών από το ίδιο λαμβανόμενο σήμα την ίδια χρονική στιγμή t . Σύμφωνα με το συγκεκριμένο πρωτόκολλο, η λαμβανόμενη ισχύς, χωρίζεται σε δύο τμήματα. Το ένα μέρος του κλάσματος της ισχύος $\rho(t)$ που χρησιμοποιείται για συγκομιδή ενέργειας, ενώ το άλλο μέρος $1 - \rho(t)$, χρησιμοποιείται για επεξεργασία των πληροφοριών, όπου $0 \leq \rho(t) \leq 1$. Υποθέτουμε ότι ο διαχωρισμός ισχύος γίνεται από ένα ιδανικό εξάρτημα, το οποίο δεν προκαλεί απώλειες και δεν εισάγει θόρυβο.

Θεωρούμε ότι η μετάδοση με διάρκεια T χωρίζεται σε διάφορα μπλοκ με $T = NT_s$ όπου N . Κατά τη διάρκεια της εκπομπής συμβόλων T , ο δέκτης πληροφοριών, μπορεί να βρίσκεται σε δύο καταστάσεις. Η πρώτη κατάσταση είναι να βρίσκεται εκτός λειτουργίας (off mode), για το χρονικό διάστημα T_{off} στο οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί αποθήκευση ενέργειας, ενώ στην δεύτερη περίπτωση, ο δέκτης μπορεί να λειτουργήσει κανονικά (on mode) για χρονικό διάστημα $T_{on} = 1 - T_{off}$ αποκωδικοποιώντας πληροφορίες. Το χρονικό ποσοστό που ο δέκτης βρίσκεται εκτός λειτουργίας μπορεί να δηλωθεί μέσω του συντελεστή α με $0 \leq \alpha \leq 1$, έχοντας ως αποτέλεσμα να ισχύει ότι $T_{off} = \alpha T$ και $T_{on} = (1 - \alpha)T$ [64].

Οι τρεις περιπτώσεις που προκύπτουν είναι ο διαχωρισμός ισχύος (power splitting), ο χρονικός διαχωρισμός (time switching) και η χωρική μεταγωγή, που αναφέραμε στην ενότητα 5.5.2. Στην περίπτωση του διαχωρισμού ισχύος, ο δέκτης πληροφοριών είναι σε λειτουργία ON για όλη την διάρκεια των σύμβολων N , δηλαδή όταν $\alpha = 0$. Ακόμη, ο λόγος διαχωρισμού ισχύος μπορεί να θεωρηθεί σταθερός και ισότιμος με ρ για όλα την διάρκεια των σύμβολων N , δηλαδή:

$$\rho_k = \rho, \quad k = 1, \dots, N.$$

Σε περίπτωση του χρονικού διαχωρισμού, ο δέκτης είναι εκτός λειτουργίας OFF όταν αποστέλλονται τα πρώτα αN σύμβολα, έχοντας ως αποτέλεσμα η συγκεκριμένη αλληλουχία σύμβολων να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συλλογή ενέργειας. Τα υπόλοιπα εναπομείναντα

σύμβολα $(1 - \alpha)N$, μπορούν να αξιοποιηθούν αποκλειστικά για αποκωδικοποίηση πληροφοριών. Αυτά μπορούν να συνοψιστούν ως εξής :

$$\rho = \begin{cases} 1, & k = 1, \dots, \alpha N \\ 0, & k = \alpha N + 1, \dots, N. \end{cases}$$

Στην τρίτη και τελευταία περίπτωση, που είναι η χωρική μεταγωγή, η πρώτη αλληλουχία σύμβολων αN χρησιμοποιούνται για σκοπούς αποθήκευσης ενέργειας, διότι ο δέκτης αποκωδικοποίησης πληροφοριών είναι εκτός λειτουργίας (OFF). Για τον λόγο αυτό, τα υπόλοιπα σύμβολα $(1 - \alpha)N$, έχουν σταθερό λόγο μεταγωγής ισχύος, ίσο με ρ με $0 \leq \rho \leq 1$. Έτσι, για το συγκεκριμένο ζεύγος συντελεστή διαίρεσης (α, ρ) ισχύει :

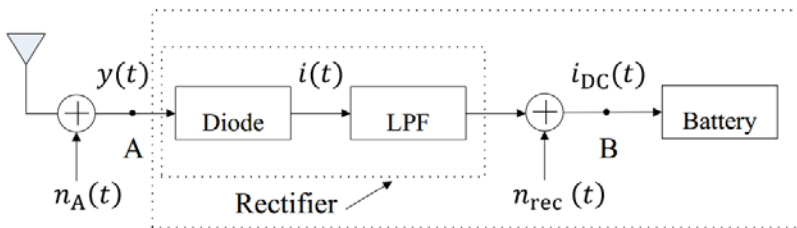
$$\rho = \begin{cases} 1, & k = 1, \dots, \alpha N \\ \rho, & k = \alpha N + 1, \dots, N. \end{cases}$$

Να σημειώσουμε ότι τόσο ο διαχωρισμός ισχύος, όσο και ο χρονικός διαχωρισμός μπορεί να είναι ειδικές περιπτώσεις της τρίτης περίπτωσης (χωρική μεταγωγή), με $\alpha = 0$ για την πρώτη περίπτωση και $\rho = 0$ για την δεύτερη [64]. Στην παρακάτω ανάλυση που ακολουθεί, χρησιμοποιούμε την περίπτωση του διαχωρισμού ισχύος.

5.6.5 Συλλογή Ενέργειας

Θεωρούμε τον δέκτη του κάτω σχήματος 6.8, ως ένα αποκλειστικά συλλέκτη ενέργειας. Στην παρακάτω ανάλυση παρουσιάζουμε την έκφραση της μέσης ενέργειας που προκύπτει όταν συλλέγετε ασύρματα από ένα λαμβανόμενο σήμα. Το σχήμα 5.18, παρουσιάζει τη λειτουργία ενός δέκτη συλλογής ενεργείας, που μετατρέπει το σήμα εισόδου σε ενέργεια, συλλέγοντας από τη ζώνη των ραδιοσυχνοτήτων, μέσω μιας κεραίας (rectenna - σχήμα 2.3). Το λαμβανόμενο RF σήμα $y(t)$ μετατρέπεται σε σήμα συνεχούς ρεύματος (DC) $i_{DC}(t)$ από τον ανορθωτή (rectifier), που περιέχει ένα παθητικό χαμηλοπερατό φίλτρο (LPF) και μία δίοδο. Στη συνέχεια, το συνεχές ρεύμα $i_{DC}(t)$ από την έξοδο της δίοδου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σκοπούς φόρτιση της μπαταρίας και για αποθήκευση ενέργειας. Έχοντας τάση στην είσοδο της δίοδου που είναι ανάλογη του $y(t)$, η έξοδος στο ρεύμα $i(t)$ μπορεί να δοθεί από τη σχέση:

$$i(t) = I_S(e^{\gamma y(t)} - 1) = a_1 y(t) + a_2 y^2(t) + a_3 y^3(t) + \dots \quad (23)$$



Σχήμα 5.18: Συλλέκτης ενέργειας [64]

Από την εξίσωση 19, το $y(t)$ μπορεί να εκφραστεί ως :

$$y(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \left\{ |h| \sqrt{I P x(t)} e^{j(2\pi f t + \theta)} + n_A(t) e^{j2\pi f t} \right\} = \sqrt{2} \mu_Y(t) \cos(2\pi f t + \varphi_Y(T)), \quad (24)$$

Όπου $\varphi_Y(T) = \arctan \frac{\mu_Q(T)}{\mu_I(T)}$, και $M_Y(t) = \sqrt{\mu^2 I(t) + \mu^2 Q(t)}$ με

$$\begin{aligned} \mu_I(t) &= |h| \sqrt{I P A(t)} \cos(\varphi(t) + \theta) + N_I(t) \\ \mu_Q(t) &= |h| \sqrt{I P A(t)} \sin(\varphi(t) + \theta) + N_Q(t) \end{aligned} \quad (25)$$

Εάν αντικαταστήσουμε την εξίσωση 24 στην εξίσωση 25 και αγνοήσουμε τους όρους υψηλότερης τάξης του $y(t)$, εφόσον ο όρος $\gamma y(t)$ είναι πολύ μικρός αριθμός (κοντά στο μηδέν), προκύπτει η παρακάτω εξίσωση, που χαρακτηρίζει την έξοδο διόδου :

$$\begin{aligned} i(t) &\approx \sqrt{2} a_1 \mu_Y(t) \cos(2\pi f t + \varphi_Y(t)) + 2 a_2 \mu^2 \gamma(t) \cos^2(2\pi f t + \varphi_Y(t)) \\ &= a_2 \mu^2 \gamma(t) + \sqrt{2} a_1 \mu_Y(t) \cos(2\pi f t + \varphi_Y(t)) + 2 a_2 \mu^2 \gamma(t) \cos^2(4\pi f t + 2\varphi_Y(t)). \end{aligned} \quad (26)$$

Στη συνέχεια, το ρεύμα $i(t)$ από την έξοδο της διόδου προχωρά στο χαμηλοπερατό φίλτρο για επεξεργασία, το οποίο είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να απορρίπτει τις αρμονικές στις υψηλές συχνότητες f και $2f$, έχοντας ως αποτέλεσμα να εμφανίζεται το συνεχές ρεύμα $i_{DC}(t)$ στην έξοδο της διόδου. Το σήμα εξόδου $i_{DC}(t)$ μπορεί να δοθεί από τη πιο κάτω σχέση [67]:

$$i_{DC}(t) = a_2 \mu^2 \gamma(t) + n_{rec}(t) \quad (27)$$

Για να διατηρηθεί ο λόγος σήματος-προς-θόρυβο (SNR) σταθερός, η πιο πάνω εξίσωση περιλαμβάνει το a_2 το οποίο είναι μία σταθερά που καθορίζεται από τη δίοδο έτσι ώστε να επιτραπεί το $a_2=1$ με κανονικοποιημένο θόρυβο n_{rec} . Η σχέση του a_2 μπορεί να συμπεριλαμβάνει τη μετατροπή του σήματος ισχύος σε σήμα ρεύματος. Για αυτό το λόγο, μετά την κανονικοποίηση του σήματος, ο θόρυβος n_{rec} είναι θεωρείται ως ένα σήμα ισχύος για το οποίο ισχύει ότι $n_{rec} \sim N(0, \sigma^2)$, όπου το σ_{rec} μπορεί να μετρηθεί σε Watt. Αντικαθιστώντας τις πιο πάνω σχέσεις, προκύπτει η εξίσωση 28 :

$$i_{DC}(t) = (|h|(\sqrt{I P A(t)} \cos(\varphi(t) + \theta) + n_I(t)))^2 + (|h|(\sqrt{I P A(t)} \sin(\varphi(t) + \theta) + n_Q(t)))^2 + n_{rec}(t). \quad (28)$$

Θεωρούμε ότι η ενεργεία που αποθηκεύεται στην μπαταρία μετά από αυτή τη μετατροπή, μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη του ρεύματος $i_{DC}(t)$ που έχει απόδοση μετατροπής $0 < \zeta \leq 1$. Η ενέργεια Q που μπορεί να αποθηκευτεί στην μπαταρία, μπορεί να δοθεί από τη σχέση :

$$Q = \zeta E [i_{DC}] = \zeta I |h|^2 P. \quad (29)$$

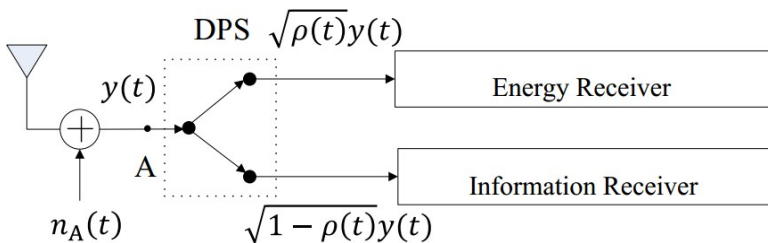
Εάν θεωρήσουμε ότι ο δέκτης που αναφέραμε, δεν δουλεύει αποκλειστικά ως συλλέκτης ενέργειας, αλλά μπορεί να επεξεργάζεται πληροφορίες ταυτόχρονα, σύμφωνα με το διαχωρισμό ισχύος, το μέρος της ισχύος ρ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σκοπούς συλλογής

ενέργειας, έχει ως αποτέλεσμα η πιο πάνω εξίσωση 29 να περιγράφεται ως :

$$Q = \rho \zeta |h|^2 P. \tag{30}$$

5.6.6 Ρυθμός μετάδοσης πληροφοριών

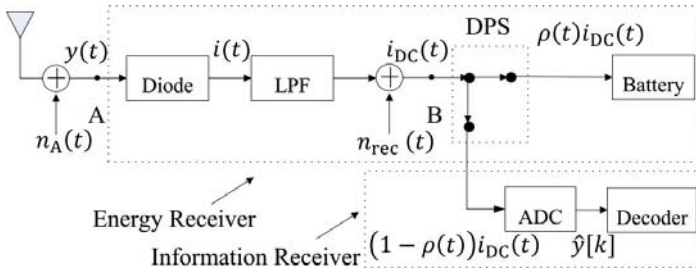
Στο πιο κάτω σχήμα 5.19 παρουσιάζουμε την αρχιτεκτονική στην οποία ένα λαμβανόμενο σήμα ισχύος $y(t)$ χωρίζεται σε δύο τμήματα, αμέσως μετά την κεραία λήψης στο σημείο A, σύμφωνα με τη τεχνική διαχωρισμού ισχύος. Το πρώτο τμήμα 'στέλνει' το σήμα σε ένα δέκτη που συλλέγει ενέργεια, όπως αυτός που φαίνεται στο προηγούμενο σχήμα 5.18, ενώ το δεύτερο τμήμα 'στέλνει' το σήμα σε ένα δέκτη πληροφοριών που με κατάλληλες διεργασίες επεξεργάζεται και αποκωδικοποιεί τις πληροφορίες. Ο διαχωρισμός ισχύος μας οδηγεί στη χρήση δύο ανεξάρτητων δεκτών (seperated receivers) όπως έχουμε αναφέρει στην ενότητα 5.4.



Σχήμα 5.19: Αρχιτεκτονική για ανεξάρτητους δέκτες ενέργειας και πληροφορίας

Το σχήμα 6.10 απεικονίζει την αρχιτεκτονική της οποίας το σήμα ισχύος, αφού έχει ληφθεί από την κεραία $y(t)$ εισέρχεται στον δέκτη συλλογής ενέργειας (σχήμα 5.18). Στη συνέχεια το σήμα περνάει από τον ανορθωτή και χωρίζεται σε δύο τμήματα. Αυτή η διεργασία γίνεται στο σημείο B του κυκλώματος, αφού έχει πλέον μετατραπεί σε συνεχές γέυμα $i_{DC}(t)$. Το πρώτο τμήμα του κυκλώματος που περιέχει το ρεύμα πολλαπλασιασμένο με τον συντελεστή διαίρεσης $\rho(t)$ οδηγείτε στη μπατάρια φορτίζοντάς την, ενώ το δεύτερο τμήμα καταλήγει στο δέκτη πληροφοριών όπου γίνεται η επεξεργασία τους. Όπως φαίνεται και στο πιο κάτω σχήμα 5.20 αναφερόμαστε στην ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική δέκτη, όπου οι δέκτες ενέργειας και πληροφορίας είναι ενσωματωμένοι (integrated receiver - ενότητα 5.4). Οι δυο μέθοδοι που έχουμε δείξει, έχουν αρκετές ομοιότητες όπως η χρήση του ίδιου συλλέκτη ενέργειας, ενώ οι βασικές διαφορές μεταξύ των δυο είναι ότι η διαίρεση γίνεται στο σημείο A στη ζώνη των ραδιοσυχνοτήτων στους ανεξάρτητους δέκτες, ενώ στους ενσωματωμένους δέκτες γίνεται στο σημείο B. Οι ανεξάρτητοι δέκτες πληροφοριών περιλαμβάνουν μετατροπή του σήματος ισχύος από τη ζώνη των ραδιοσυχνοτήτων στη βασική ζώνη. Για αυτό το λόγο η μετατροπή, είναι ανάλογη με τη μετατροπή του σήματος ισχύος (από τη ζώνη των ραδιοσυχνοτήτων) σε σήμα συνεχούς ρεύματος. Σε ολοκληρωμένους δέκτες όπως αυτό του σχήματός 6.20, ένα σήμα συνεχούς ρεύματος μπορεί να θεωρηθεί ως σήμα βασικής ζώνης. Ακόμη, η διπλή χρήση ενός

διορθωτή σε αυτό το είδος αρχιτεκτονικής, μπορεί να προσφέρει μείωση του ενεργειακού κόστους στην επεξεργασία πληροφοριών [64].



— Σχήμα 5.20: Αρχιτεκτονική για ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική δέκτη με ενσωματωμένους δέκτες ενέργειας και πληροφορίας [64].

Από την εξίσωση 34, το ρεύμα $i_{DC}(t)$ μπορεί να εκφραστεί ως :

$$i_{DC}(t) = |h|(\sqrt{lPA(t)}e^{j(\theta + \varphi(\tau))} + n_A(t))^2 + n_{rec}(t). \quad (31)$$

Έχοντας υπόψη ότι η στατιστική του $n_A(t)$ δεν μεταβάλλεται, η πιο πάνω εξίσωσή 31, μπορεί να γραφτεί ισοδύναμα ως :

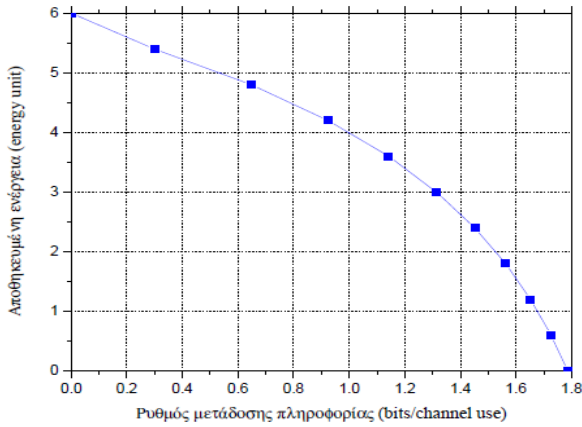
$$i_{DC}(t) = |h|(\sqrt{lPA(t)} + n_A(t))^2 + n_{rec}(t). \quad (32)$$

Το κατώτατο όριο για τη χωρητικότητα του καναλιού, το οποίο χαρακτηρίζεται ως ο ρυθμός μετάδοσης πληροφοριών R μεταξύ του πομπού και του δέκτη στο κανάλι, το οποίο δίνεται από τη σχέση :

$$R = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{e(l|h|^2 p)^2}{2\pi\sigma^2\lambda^2} \right) \quad \text{ή} \quad R = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{e(l|h|^2 p)^2}{2\pi\sigma^2} \right) \quad (33)$$

Η πιο πάνω εξίσωση 33, αποτελεί έκφραση του ρυθμού μετάδοσης πληροφοριών μεταξύ ενός πομπού και δέκτη.

Από τις σχέσεις των εξισώσεων 30 και 33, είναι δυνατόν να αναπαρασταθεί η αποθηκευμένη ενέργεια σε συνάρτηση με τον ρυθμό μετάδοσης πληροφοριών, έτσι ώστε να προκύψει η επιτεύξιμη περιοχή ρυθμού- ενέργειας (rate-energy region), όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα 5.21.



Σχήμα 5.21: Περιοχή ρυθμού - ενέργειας με $P = 10$, $h \sim \text{CN}(0, 1)$, $\zeta = 0.6$, $l = 1$, $\sigma_{\text{rec}}^2 = \sigma_{\text{ADC}}^2 = 1$ [64].

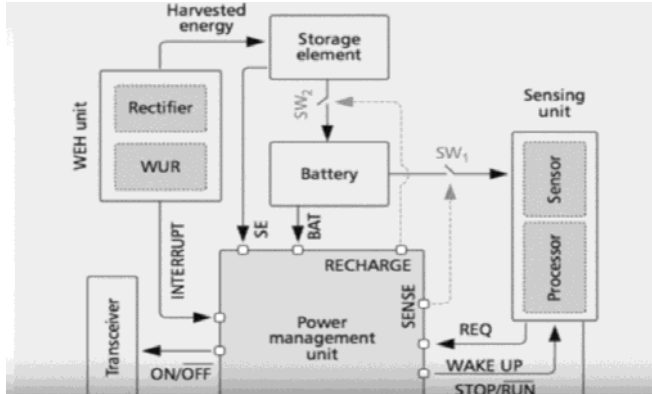
Πιο πάνω έχουμε δει τα πρακτικά σχέδια για την ταυτόχρονη μεταφορά ενέργειας και πληροφορίας. Με βάση τον διαχωρισμό ισχύος, η βιβλιογραφία [67] προτείνει δυο αρχιτεκτονικές δέκτη. Την αρχιτεκτονική διαχωρισμένου δέκτη και την ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική (ενότητα 5.4). Στον διαχωρισμένο δέκτη, το λαμβανόμενο σήμα από την κεραία διαιρείται σε δύο ροές σημάτων RF, οι οποίες τροφοδοτούν ξεχωριστά τον δέκτη ενέργειας και τον δέκτη πληροφοριών, για συλλογή ενέργειας και αποκωδικοποίηση πληροφοριών, αντίστοιχα. Στην ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική δέκτη, μέρος της αποκωδικοποίησης πληροφοριών, όπως η μετατροπή της ζώνης RF σε βασική ζώνη, γίνεται στον ενσωματωμένο δέκτη ενέργειας μέσω του ανορθωτή. Και για τους δύο δέκτες χαρακτηρίζουμε την απόδοση επιδόσεων ρυθμού-ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη την κατανάλωση ισχύος των κυκλωμάτων. Η βιβλιογραφία αναφέρει ότι όταν η κατανάλωση ισχύος είναι μικρή (σε σύγκριση με την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος), ο διαχωρισμένος δέκτης δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε περιοχές με χαμηλή συγκομιδή ενέργειας, ενώ η ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική δέκτη αποδίδει καλύτερα σε περιοχές υψηλής συγκομιδής ενέργειας. Όταν η κατανάλωση ισχύος είναι μεγάλη, τότε η ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική δέκτη συνιστάται, γιατί δίνει ανώτερα αποτελέσματα και επιτυγχάνει μεγαλύτερο ρυθμό σε σχέση με τον διαχωρισμένο δέκτη σε μικρές αποστάσεις μετάδοσης.

5.7 Διαχείριση ενέργειας και πρόβλεψη διάρκειας ζωής

5.7.1 Μονάδα διαχείρισης ενεργείας

Η κάθε τοπολογία δικτύων έχει συγκεκριμένες απαιτήσεις στον σχεδιασμό της διαχείρισης ενέργειας. Όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο στα συνεργατικά δίκτυα οι αναμεταδότες πρέπει να καθορίσουν την ισχύ του σήματος αναμετάδοσης για να παρέχουν την απαιτούμενη αξιοπιστία μεταξύ πομπού και δέκτη. Στα γνωσιακά δίκτυα (ενότητα 6.3.2) οι δευτερεύοντες χρήστες πρέπει να γνωρίζουν την δραστηριότητα των κύριων χρηστών μέσω της ανίχνευσης φάσματος. Για να αποφευχθεί η άσκοπη κατανάλωση ενέργειας σε δίκτυα πολλαπλών χρηστών (MU-MIMO) είναι απαραίτητο να αντιμετωπίσουμε τις παρεμβολές μεταξύ των χρηστών. Ακόμη στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών η διαχείριση της ενέργειας πρέπει να γίνεται με βέλτιστο τρόπο έτσι ώστε να διασφαλίζει την ποιότητα των υπηρεσιών (QoS) [51].

Από ό,τι έχουμε δει πιο πάνω, ο πομπό-δέκτης πληροφοριών είναι από τα πιο ενεργοβόρα κομμάτια σε ασύρματες συσκευές και ειδικά σε συστήματα αισθητήρων. Ο δέκτης αν και δεν χρησιμοποιείται σε όλη την διάρκεια λειτουργίας του συστήματος πρέπει να είναι ενεργοποιημένος για να μπορεί να παρακολουθεί συνέχεια το κανάλι. Αυτή η διαδικασία όμως συμβάλει σημαντικά στη συνολική κατανάλωση ισχύος ενός συστήματος αισθητήρα. Μια προσέγγιση για να αντιμετωπίσουμε την αυξημένη κατανάλωση ενέργειας στον πομποδέκτη είναι να προγραμματίσουμε κύκλο λειτουργίας (duty-cycle) στο σύστημα κατά τον οποίο ο δέκτης θα μπορεί να μεταβαίνει από κατάσταση παρακολούθησης σε κατάσταση ύπνου (sleep). Υλοποιώντας ένα ασύγχρονο κύκλο λειτουργίας στον κόμβο, μπορούμε να πετύχουμε μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Όταν το σύστημα όταν είναι σε κατάσταση αναμονής (idle mode) και δεν υπάρχει κίνηση στο κανάλι, τότε μπαίνει σε κατάσταση ύπνου (sleep mode) για σκοπούς εξοικονόμησης. Αν θέτουμε στόχο να σχεδιάσουμε ένα σύστημα συγκομιδής ενέργειας που θα είναι αποδοτικό, αυτό μπορεί να γίνει με την προϋπόθεση ότι περιέχει μια μονάδα διαχείρισης ισχύος (PMU) η οποία θα περιλαμβάνει μπαταρία η οποία θα φορτίζεται μέσω της συγκομιδής ενέργειας. Το διάγραμμα της αρχιτεκτονικής PMU απεικονίζεται στο Σχήμα 5.22. Για αυτό το λόγο, ένα σημαντικό μέρος οποιασδήποτε συσκευής συγκομιδής ενέργειας είναι η μονάδα διαχείρισης ενέργειας που είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο και αποθήκευση της εκ-λαμβανόμενης ισχύος και πρακτικά διαχειρίζεται την διανομή της διαθέσιμης ενέργειας έτσι, ώστε να μπορεί να μεγιστοποιήσει τη διάρκεια ζωής της συσκευής. Η συνεργασία της μονάδας διαχείρισης ενέργειας με τη μονάδα συγκομιδής ενέργειας είναι απαραίτητη για να διατηρηθεί υψηλό το επίπεδο της ποιότητας εξυπηρέτησης (QoS) λόγω του ότι μπορεί να ανιχνεύει και να προλάβει τυχόν αποτυχία του κόμβου σε περίπτωση έλλειψης ενέργειας. Για σκοπούς βελτίωσης της απόδοσης του συστήματος, μέσα από μελέτη βιβλιογραφίας προτείνεται η αρχιτεκτονική ασύγχρονου σχεδίου (τύπου Wake-Up Radio) με βάση τα σήματα που παράγονται από τη μονάδα. Αυτά τα σήματα μπορούν να 'αφυπνίσουν' την συσκευή και να ανιχνεύσουν πιθανά προβλήματα που μπορεί να προκύψουν αναφορικά με την παροχή ενέργειας.



Σχήμα 5.22: Σχηματικό απεικόνισμα του Power management Unit (PMU)

Όπως έχουμε δει μέχρι τώρα στη παρούσα διατριβή, η μονάδα αισθητήρα είναι υπεύθυνη για την ανίχνευση σημάτων, την επεξεργασία δεδομένων μέσω μικροεπεξεργαστή (ενότητα 3.2) και την τελική μετάδοση τους σε πομποδέκτες χαμηλής ισχύος βασισμένους σε Bluetooth, WiFi, κ.λπ. Καθώς αυτά τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι υποσύνολο των τεχνολογιών IoT, βασιζόμαστε την περαιτέρω ανάλυση μας σε αυτές τις τοπολογίες.

Η διάρκεια ζωής ενός συστήματος IoT που περιέχει μονάδα συγκομιδής ενέργειας, με ή χωρίς μπαταρίες εξαρτάται από τη μέση κατανάλωση ενέργειας των συσκευών αισθητήρα ανά ενεργό κύκλο λειτουργίας (αυτός περιλαμβάνει τις συνδυασμένες λειτουργίες της ανίχνευσης, επεξεργασίας και επικοινωνίας). Σύμφωνα με παραδοχές, η εκτιμώμενη διάρκεια ζωής σε μια ασύρματη συσκευή αισθητήρα που περιέχει μπαταρία και υποστηρίζεται από μονάδα συγκομιδής ενέργειας μπορεί να μοντελοποιηθεί σύμφωνα με την πιο κάτω εξίσωση, όπου:

$$N_H = \frac{E_B}{C_D + CTX \cdot r_{ij}^2 - \frac{C_H}{r_{ij}^2}} \quad (34)$$

Όπου

E_B = η ενέργεια της μπαταρίας

C_D = ο μέσος όρος του κύματος ενέργειας λήψης

CTX = σταθερά αναλογικότητας ενέργειας μετάδοσης

C_H = ενέργεια συγκομιδής

και r_{ij} = η απόσταση του σήματος

Το ζήτημα της ενεργειακής απόδοσης σε δίκτυα ασύρματων αισθητήρων έχει τεράστια σημασία και υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις για την επίλυσή του. Μια από αυτές είναι ο δυναμικός έλεγχος του φάσματος. Μέσω μεθόδων τύπου cognitive radio (CR) μπορεί να προγραμματιστεί σε δυναμική ρύθμιση έτσι, ώστε να χρησιμοποιεί τα καλύτερα ασύρματα κανάλια σε μια περιοχή. Το cognitive radio (CR) μπορεί να ανιχνεύσει αυτόματα τα διαθέσιμα κανάλια στο ασύρματο φάσμα και στη συνέχεια να μεταβάλει ανάλογα τις παραμέτρους

μετάδοσης ή λήψης έτσι, ώστε να επιτρέψει περισσότερες ταυτόχρονες συνδέσεις σε μια δεδομένη ζώνη φάσματος. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως μια μορφή δυναμικής διαχείρισης του φάσματος. Έτσι το cognitive radio (CR) μπορεί να αναγνωρίσει το καλύτερο ασύρματο κανάλι και να εξασφαλίσει την καλύτερη ποιότητα χωρίς παρεμβολές μεταξύ των συσκευών. Επιπλέον, με τη χρήση αυτόνομων κόμβων συλλογής ενέργειας που τροφοδοτούνται με μπαταρία μπορούν να προσφέρουν τα πλεονεκτήματά τους, όπως η ενεργειακή απόδοση και η παρατεταμένη διάρκεια ζωής. Θεωρώντας το γεγονός ότι ένας κόμβος μπορεί να ξοδεύει το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου του σε λειτουργία Sleep (στην οποία τα επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας είναι σημαντικά χαμηλότερα από την ενεργή κατάσταση), η χρήση ενός βελτιστοποιημένου μηχανισμού για την αφύπνιση του κόμβου και ο επαρκής έλεγχος της ενέργειας μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την κατανάλωση ενέργειας στο σύνολο ενός δικτύου ασύρματων αισθητήρων. Ακόμη, ο σχεδιασμός των πρωτοκόλλων τύπου MAC διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ενεργειακή απόδοση του ασύρματου δικτύου αισθητήρων και με τη χρήση αποτελεσματικών πρωτοκόλλων μπορούμε να παρατείνουμε τη διάρκεια ζωής του δικτύου σε συστήματα ασύρματων αισθητήρων [31].

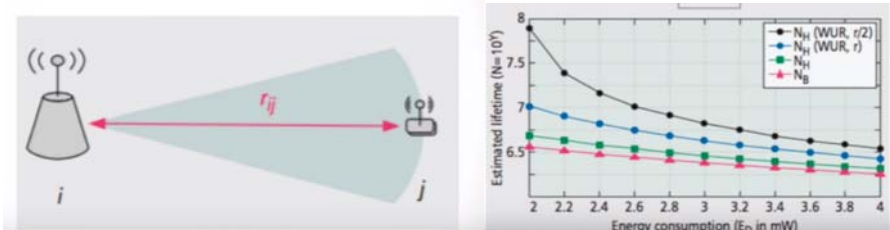
5.7.2 Πρόβλεψη διάρκειας ζωής

Σε συνέχεια της ενότητας 5.6, παρουσιάζουμε 2 διαφορετικά σενάρια - μοντέλα, όπου παρατηρήσουμε διαφορετική διάρκεια ζωής σε κόμβους με δυνατότητες συλλογής ενέργειας, ανάλογα με την τοπολογία :

1. Uniform distribution topology (ring topology)

Οι κόμβοι κατανέμονται σε μια ομοιόμορφη απόσταση, έτσι όλες οι συσκευές αισθητήρων λαμβάνουν παρόμοια ποσότητα ενέργειας για σκοπούς συγκομιδής, υποθέτοντας ότι κανάλι είναι στατικό και η ενέργεια από την συσκευή είναι η ίδια για όλους τους κόμβους. Με βάση αυτές τις υποθέσεις, η διάρκεια ζωής των συσκευών υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση υπολογισμού πιο πάνω (εξίσωσή 18).

Το πρώτο σχήμα 5.23 δείχνει την κατανομή του κόμβου ενώ το δεύτερο σχήμα παρουσιάζει την εκτιμώμενη διάρκεια ζωής και τη συνολική κατανάλωση ενέργειας της συσκευής. Όπως φαίνεται στην γραφική παράσταση η πράσινη γραμμή συμβολίζει την αύξηση διάρκειας ζωής κατά 30% σε κόμβους χαμηλής ενέργειας με μπαταρία (συσκευές αισθητήρων), ενώ η μπλε γραμμή ανταποκρίνεται σε περεταίρω βελτίωση όταν οι συσκευές χρησιμοποιούν τεχνικές Wake-Up Radio που αναφέραμε πιο πάνω. Όπως μπορούμε να δούμε στην γραφική αναπαράσταση με μαύρο γράφημα, σε αυτό το σενάριο η διάρκεια ζωής μιας συσκευής συλλογής ενέργειας αυξάνεται με τη μείωση της απόστασης μεταξύ του κόμβου και του κόμβου αισθητήρα όπως φαίνεται στο NH ($r/2$).

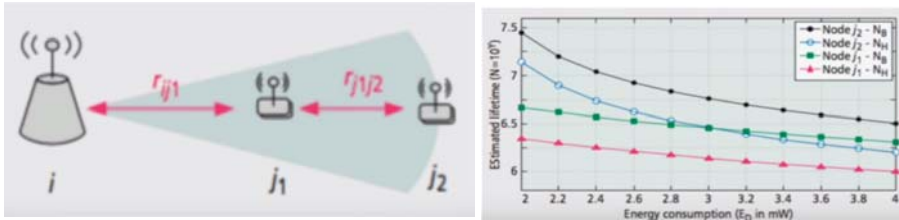


Σχήμα 5.23: Πρόβλεψη διάρκειας ζωής μέσω μοντέλου κόστους ενέργειας - αρχιτεκτονική ring topology.

Η πολιτική σε τέτοιους κόμβους είναι να μαζεύουν ενέργεια και μετά την μεταδίδουν. Στα δίκτυα με ένα κόμβο δικτύου (Single hop) ο χρονοπρογραμματισμός πολλαπλών χρηστών γίνεται έτσι ώστε να επιτευχθεί βέλτιστη χρήση των πόρων (π.χ. ζώνης συχνοτήτων και ενέργειας ραδιοσυχνότητας) και γίνεται μέσω κατανομής και κριτηρίων QoS στα πλαίσια των περιορισμών στην συλλογής ενέργειας.

2. Random distribution topology (multihop topology)

Σε αυτό το σενάριο οι κόμβοι (συσκευές αισθητήρων) κατανέμονται με τυχαία κατανομή. Σε μια μετάδοση πολλαπλών σταθμών, ο κόμβος του αισθητήρα δεδομένων μεταδίδει $k - 1$ φορές πριν φτάσει στον κόμβο. Ο τελευταίος κόμβος στο δίκτυο (συνήθως ο πιο απομακρυσμένος) ενεργεί μόνο ως αισθητήρας και μεταδίδει τα δικά του δεδομένα. Ωστόσο οι υπόλοιποι κόμβοι μεταδίδουν και τα δεδομένα που προέρχονται από τους άλλους απομακρυσμένους κόμβους του δικτύου έτσι αυξάνεται η κατανάλωσή τους, κάτι το οποίο μειώνει τη διάρκεια ζωής. Για να υπολογιστεί η διάρκεια ζωής των κόμβων πρέπει να προσθέσουμε την ενεργειακή κατανάλωση του κύκλου αναμετάδοσης με εκείνη του κύκλου των αισθητήρων. Η κατανάλωση ενέργειας σε έναν κύκλο αναμετάδοσης είναι η συνολική κατανάλωση ενέργειας για τη λειτουργία της συσκευής μείον την ενέργεια που χρειάζεται για σκοπούς επεξεργασίας και ανίχνευσης. Το πρώτο σχήμα 5.24 απεικονίζει ένα σενάριο δύο κόμβων, ενώ το δεύτερο σχήμα παρουσιάζει τον εκτιμώμενο χρόνο ζωής για τον κόμβο αισθητήρα j_1 που λειτουργεί ως αισθητήρας και ως αναμεταδότης για τον κόμβο j_2 . Όπως φαίνεται στην πιο κάτω γραφική παράσταση ο κόμβος j_1 καταναλώνει περισσότερη ενέργεια (εφόσον λειτουργεί δυο φορές περισσότερο από ό,τι ο κόμβος j_2) κάτι που έχει σημαντικό αντίκτυπο στην αυτονομία του (διάρκεια ζωής) σε σχέση με τον κόμβο j_2 [22].



Σχήμα 5.24: Πρόβλεψη διάρκειας ζωής μέσω μοντέλου κόστους ενέργειας για αρχιτεκτονική τυχαίας κατανομής με εκτιμώμενη διάρκεια ζωής και κατανάλωση ενέργειας.

5.8 Περιορισμοί και Προκλήσεις

Σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα οι τεχνικές συγκομιδής ενέργειας μπορούν να έχουν καθοριστικό ρόλο στον ενεργειακό σχεδιασμό και στην ανταλλαγή πληροφοριών με πολλούς αισθητήρες χαμηλής κατανάλωσης που υποστηρίζουν ετερογενείς εφαρμογές ανίχνευσης (sensing applications). Μια από τις βασικές προκλήσεις για επιτυχή ανάπτυξη συσκευών αισθητήρων σε μια περιοχή είναι η ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στους χρήστες και στο περιβάλλον. Γι' αυτό οι συσκευές πρέπει να είναι μικρές σε μέγεθος να κατασκευάζονται και να αναπτύσσονται με γνώμονα το χαμηλό κόστος και να μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η μονάδα συλλογής ενέργειας ως αναπόσπαστο μέρος τέτοιων συσκευών θα πρέπει να τηρεί τις απαιτήσεις αναφορικά με το κόστος, το μέγεθος και το σημαντικότερο να είναι αποδοτική. Σε συστήματα συγκομιδής ενέργειας, όπου οι ασύρματοι κόμβοι αξιοποιούν ενέργεια από περιβαλλοντικές πηγές, η εξασθένιση των καναλιών και οι παρεμβολές είναι δύο σημαντικές προκλήσεις για το σχεδιασμό των ασύρματων δεκτών [40]. Ένα ζήτημα που γίνεται ολοένα και πιο σημαντικό είναι αυτό της απόδοσης, εάν θεωρήσουμε ότι η μεταδιδόμενη ισχύς από τις πηγές είναι συνήθως περιορισμένη λόγω χαμηλών σημάτων ή και παρεμβολών. Πιο κάτω θα δούμε τα ζητήματα αναφορικά με τα συστήματα WEH.

5.8.1 Μελλοντικές τάσεις και ερευνητικές προκλήσεις

Σε αυτή την ενότητα θα δούμε τις προκλήσεις και ανοικτά ερευνητικά θέματα που αφορούν ασύρματα δίκτυα (τηλεπικοινωνιακά συστήματα) με συγκομιδή ενέργειας RF.

1. Υψηλή απόδοση, χαμηλό κόστος

Οι συσκευές πρέπει να συμμορφώνονται με χαμηλό κόστος και μικρό μέγεθος. Ένας κρίσιμος παράγοντας για την ασύρματη σύνδεση ενεργειακού συστήματος είναι η απόδοση, ειδικά αν θεωρήσουμε ότι η μεταδιδόμενη ισχύς από τις πηγές είναι πραγματικά περιορισμένη και ότι τυχόν παρεμβολές μπορούν να περιορίσουν σημαντικά τέτοιου είδους συστήματα. Προτιμότερο το μέγεθος των στοιχείων (όπως η κεραία, ο πολλαπλασιαστής τάσης κ.λπ.) σε ένα σύστημα συλλογής ενέργειας να είναι μικρό έτσι ώστε να μπορεί να ενσωματωθεί σε συσκευές χαμηλής ισχύος. Αν μια υλοποίηση έχει μικρότερο μέγεθος κεραίας, τότε ο ρυθμός

συλλογής ενέργειας ελαττώνεται. Επομένως είναι κρίσιμος ο σχεδιασμός μικρών (σε μέγεθος) συσκευών διατηρώντας παράλληλα υψηλό ρυθμό συλλογής ενέργειας [51].

2. Χαρακτηριστικά καναλιού για ασύρματη συγκομιδή ενέργειας - Παρεμβολές

Τυπικά τα χαρακτηριστικά καναλιού πάνε ανάλογα με το περιβάλλον, τον αριθμό των διαδρομών από την πηγή προς την συσκευή και εξαρτώνται από την απόσταση μεταξύ του κόμβου και του αισθητήρα. Στην παρουσία διαλείψεων (fading) ή πολλαπλών διαδρομών (multipath) η συλλογή ενέργειας θα επηρεαστεί και ο αισθητήρας θα πρέπει να προσαρμοστεί δυναμικά στον κύκλο του ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

Διαχείριση παρεμβολών: Σε δίκτυα ασυρμάτων τηλεπικοινωνιών ορισμένες από τις υπάρχουσες τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών, όπως είναι για παράδειγμα η ρύθμιση φάσματος, μπορεί να βοηθήσει ώστε να αποφύγουμε ή να μετριάσουμε τις παρεμβολές. Ωστόσο, στη συγκομιδή ενέργειας RF, οι παρεμβολές μπορούν να μετατραπούν σε χρήσιμη ενέργεια μέσω πολιτικών χρονικού προγραμματισμού (scheduling policy). Επιπλέον, ο σωστός έλεγχος αυτών των τεχνικών μπορεί να συνδυαστεί με τα συστήματα διαχείρισης ισχύος για περαιτέρω βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Οι πρακτικές προκλήσεις που αναδεικνύονται σε συστήματα συλλογής ενέργειας και τηλεπικοινωνιών βρίσκονται στο πώς μπορούμε να μετριάσουμε τις παρεμβολές, καθώς και να διευκολύνουμε τη μεταφορά ενέργειας.

3. Διασταυρούμενη σχεδίαση συλλογής ασύρματης ενέργειας (cross-layer design)

Όπως αναφέραμε στην ενότητα 5.5 οι συσκευές αισθητήρων εξακολουθούν να λειτουργούν με παράγοντες δράσης (duty-cycle), λόγω της περιορισμένης συλλογής ενέργειας από το περιβάλλον, έτσι ώστε να προσαρμόζουν δυναμικά τον κύκλο λειτουργίας τους ανάλογα με τη διαθεσιμότητα της περιβαλλοντικής ενέργειας. Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση τέτοιων συστημάτων σωστό θα είναι να περιλαμβάνει δυναμικούς κύκλους λειτουργίας τόσο σε επίπεδο πρωτοκόλλων όσο και σε επίπεδο πρωτόκολλων ελέγχου πρόσβασης (MAC). Ωστόσο, οι δυναμικοί κύκλοι λειτουργίας δημιουργούν προκλήσεις στο σχεδιασμό πρωτοκόλλων MAC από άποψη συγχρονισμού, αξιοπιστίας, απόδοσης αξιοποίησης πόρων καναλιών κ.λπ. Επιπλέον ο δυναμικός κύκλος λειτουργίας έχει σχεδόν μηδενικό αντίκτυπο στην τελική απόδοση του στρώματος δικτύου (network layer) συμπεριλαμβανομένης της καθυστέρησης και απόδοσης, αλλά λύνει το πρόβλημα σε σενάρια δρομολόγησης πολλαπλών διαδρομών [22]. Ως εκ τούτου, χρειάζονται λύσεις εξατομικευμένου λογισμικού που να είναι ενήμερες μεταξύ των πρωτοκόλλων ελέγχου πρόσβασης και της διαχείρισης ενέργειας σε φυσικό στρώμα (physical layer) για επιθυμητά αποτελέσματα. Η κατάλληλη μέθοδος συγκομιδής ενέργειας και ο κατάλληλος σχεδιασμός του υλικού (hardware) είναι απαραίτητα για να μπορούμε να έχουμε μια φορητή πηγή ισχύος, αλλά το λογισμικό έχει επίσης πολύ σημαντικό ρόλο. Το λογισμικό πρέπει να ελέγχει την περιφερειακή ON/OFF λειτουργία με μηχανισμούς προγραμματισμού κατάστασης ύπνου (sleep) όσο το δυνατόν περισσότερο χρησιμοποιώντας αποτελεσματικούς αλγόριθμους. Επίσης, το λογισμικό πρέπει να ελέγχει και να ρυθμίζει την βελτιστοποίηση ισχύος έτσι, ώστε να ελαχιστοποιείται η κατανάλωση ρεύματος.

4. Μείωση ενέργειας

Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε δίκτυα αισθητήρων συλλογής ενέργειας και σε συσκευές IOT είναι πρωταρχικής σημασίας. Μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας σημαίνει και μείωση στο μέγεθος μιας συσκευής, έτσι θα μπορεί αυτή η τεχνολογία να προσφέρει μεγάλες ευκολίες χρήσης, ενσωμάτωσης και αυξημένης φορητότητας.

5. Μελλοντική εξέλιξη δικτύων 5ης γενιάς.

Η αύξηση της κίνησης και ζήτησης δεδομένων κινεί τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας προς την πέμπτη γενιά (5G), όπου όλα θα συνδέονται μέσω του διαδικτύου και θα παρέχουν πρόσβαση μέσω υπηρεσιών cloud. Τα δίκτυα 5ης γενιάς αναμένονται να φέρουν νέες προκλήσεις, όμως με τη σταδιακή ανάπτυξη και υλοποίησή τους θα είναι ακόμη μια πηγή για ασύρματη συγκομιδή ενέργειας. Οι τεχνικές αναμετάδοσης που θα χρησιμοποιούνται από το 5G μπορούν να ωφελήσουν την άντληση ενέργειας από ραδιοσυχνότητες. Επίσης, τα έξυπνα τηλέφωνα, λόγω της κινητικότητας τους μπορούν να λειτουργήσουν ως πύλες - κόμβοι αναμετάδοσης δεδομένων για αισθητήρες και ως πηγές ενέργειας RF για σκοπούς συγκομιδής. Σε μελλοντικά κυψελωτά συστήματα (όπως στα δίκτυα 5ης γενιάς), με μικροκυψέλες (Small cells, Ενότητα 4.3.2), MIMO (Ενότητα 4.3.3) και τεχνολογίες χιλιοστομετρικών κυμάτων (Millimeter waves, Ενότητα 4.3.1) μπορούν να βοηθήσουν να ξεπεράσουμε τους σημερινούς περιορισμούς των απωλειών διάδοσης (path loss). Έτσι, η συγκομιδή ενέργειας από ασύρματους κόμβους θα μπορεί να ενσωματωθεί πιο αποτελεσματικά σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα για να υποστηρίξει από κοινού την υψηλή απόδοση και την ενεργειακή βιωσιμότητα.

6. Κατανεμημένη ενέργεια (Distributed Energy beamforming)

Τα δίκτυα 5ης γενιάς περιλαμβάνουν τεχνολογίες τύπου Beamforming. Αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σκοπούς συγκομιδής ενέργειας και για σκοπούς ασύρματης μεταφοράς ισχύος. Η κατανεμημένη μορφοποίηση δεσμών ενέργειας επιτρέπει σε μια συστοιχία κατανεμημένων ενεργειακών πηγών να μιμούνται από κοινού μια συστοιχία κεραιών μεταφέροντας ταυτόχρονα την ενέργεια των ραδιοσυχνοτήτων προς την κατεύθυνση ενός συλλέκτη ενέργειας για μεγαλύτερο κέρδος πολυπλεξίας (gain). Το δυναμικό κέρδος ενέργειας στον δέκτη από φορείς κατανεμημένης ενέργειας σχηματισμού δέσμης αναμένεται να είναι το ίδιο με αυτόν της μορφοποίησης σε δέσμη πληροφοριών. Ωστόσο, δημιουργούνται προκλήσεις σε τέτοιες υλοποιήσεις, για παράδειγμα στον συγχρονισμό χρόνου μεταξύ των πηγών ενέργειας και στο συντονισμό των κατανεμημένων φορέων σε φάση και συχνότητα έτσι, ώστε τα σήματα ραδιοσυχνοτήτων να μπορούν να συνδυαστούν επικοινωνιακά από τον δέκτη.

7. Επίδραση κινητικότητας

Οι κόμβοι δικτύου, οι πηγές ραδιοσυχνοτήτων και οι σταθμοί βάσης πληροφοριών μπορούν να είναι κινητά σημεία. Ως εκ τούτου, η κινητικότητα γίνεται ένας σημαντικός παράγοντας για τη

συγκομιδή ενέργειας από ραδιοσυχνότητες και τη μετάδοση πληροφοριών. Το κυριότερο ζήτημα οφείλεται στο γεγονός ότι οι επιδόσεις της συλλογής ενέργειας και της μετάδοσης των πληροφοριών ποικίλλουν ανάλογα με το χρόνο έτσι η κατανομή (καταμερισμός) των πόρων πρέπει να είναι δυναμική και προσαρμοστική.

8. Κωδικοποίηση δικτύου

Η κωδικοποίηση δικτύου είναι γνωστό ότι είναι ενεργειακά αποδοτική στη μετάδοση πληροφοριών. Με κωδικοποίηση δικτύου, γίνεται δυνατόν οι αποστολείς να μπορούν να μεταδίδουν ταυτόχρονα πληροφορίες. Αυτό, ειδικά σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας, αυξάνει την ποσότητα ενέργειας RF που μπορεί να συλλεχθεί κατά τη διάρκεια των χρονοθυρίδων όταν οι αποστολείς δεν εκπέμπουν, τα συστήματα αισθητήρων μπορούν να συλλέξουν τα περιβαλλοντικά σήματα ραδιοσυχνότητων. Ενδεικτικά να αναφέρουμε ότι μέσα από βιβλιογραφική ανασκόπηση, ορισμένες μελέτες αναφέρουν ότι ο χρόνος ζωής ενός δικτύου αμφίδρομης αναμετάδοσης με κωδικοποίηση δικτύου μπορεί να αυξηθεί έως και 70% όταν χρησιμοποιείται συγκομιδή ενέργειας RF. Εκμεταλλυόμενοι τη φύση των εκπομπών σημάτων ραδιοσυχνότητων όπου κάνουν επαναχρησιμοποίηση της διασκορπισμένης ενέργειας, μπορεί να πετύχουμε αρκετή εξοικονόμηση ενέργειας. Ωστόσο, θεωρητικά, εάν η συγκομιδή ενέργειας από ραδιοσυχνότητες θα αυξήσει το ανώτερο όριο ενεργειακού κέρδους ή όχι, και πόσο ακριβώς αυτό θα αυξηθεί, είναι ένας τομέας που απαιτεί ακόμη περαιτέρω έρευνα.

9. Επιπτώσεις στην υγεία

Είναι αναγνωρισμένο εδώ και καιρό ότι η έντονη έκθεση σε ραδιοσυχνότητες μπορεί να προκαλέσει θέρμανση υλικών με πεπερασμένη αγωγιμότητα, συμπεριλαμβανομένων των βιολογικών ιστών (π.χ. σε ανθρώπους). Ορισμένες επιδράσεις στα γονίδια παρατηρούνται όταν η ισχύς ραδιοσυχνότητων φτάσει και ξεπεράσει τα ανώτερα όρια από τα διεθνή επίπεδα ασφαλείας. Συνήθως οι μελέτες επικεντρώνονται στις επιπτώσεις των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, ιδιαίτερα από τα κινητά τηλέφωνα και κυψελωτά δίκτυα, όχι όμως για την επίδραση των πηγών ενέργειας από ραδιοσυχνότητες στην υγεία. Οι περισσότερες μετρήσεις συμπεραίνουν ότι η έκθεση σε ραδιοσυχνότητες από ραδιοεπικοινωνίες είναι ασφαλής. Παρόλο που υπάρχουν πολλές υπάρχουσες μελέτες σχετικά με τους κινδύνους για την υγεία των κινητών τηλεφώνων, έχουν γίνει μόνο μικρές προσπάθειες για έρευνες σχετικά με επιδράσεις στην υγεία που μπορούν να προκαλεστούν από έναν ειδικό πομπό φορτιστής RF, ο οποίος μπορεί να απελευθερώσει πολύ μεγαλύτερη ισχύ. Ακόμη, πρέπει να εξεταστεί η ενέργεια που μεταδίδεται από πηγές στοχευμένης ακτινοβολίας λόγω της μεγάλης ισχύς που διαδίδεται. Επομένως, υπάρχει ανάγκη έρευνας σε αυτό τον τομέα κυρίως για αντιμετώπιση των ανησυχιών για την ασφάλεια όσον αφορά την ανάπτυξη των ξεχωριστών φορτιστών RF.

10. Εμπορία ενέργειας

Στα ασύρματα συστήματα συγκομιδής η ενέργεια μπορεί να γίνει ένας πολύτιμος πόρος. Έτσι μπορεί να δημιουργηθεί ένας τομέας για αγορά ενέργειας ο οποίος θα διαχειρίζεται οικονομικά αυτό τον ενεργειακό πόρο από κοινού με τους ραδιοφωνικούς πόρους. Για παράδειγμα, οι

πάροχοι υπηρεσιών ασύρματης χρέωσης μπορούν να ενεργούν ως προμηθευτές ενέργειας RF για να καλύψουν τη ζήτηση ενέργειας από κόμβους δικτύου. Οι πάροχοι ασύρματων υπηρεσιών μπορούν να προσφέρουν και ασύρματη ενέργεια και να την τιμολογούν ανάλογα με την ποιότητα της υπηρεσίας. Μία από τις αποδοτικές προσεγγίσεις σε αυτή τη νέα δυναμική αγορά είναι η ανάπτυξη της διαχείρισης στη ζήτηση, η οποία θα μπορεί να επιτρέπει στους παρόχους υπηρεσιών και στους κόμβους του δικτύου να αλληλοεπιδρούν (όπως π.χ. στα έξυπνα δίκτυα), για να εγγωθηθούν την ενεργειακή απόδοση και την αξιοπιστία. Εντούτοις, για να γίνει αυτό δυνατόν πρέπει να διερευνηθούν ζητήματα που σχετίζονται με την ποσότητα της ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων και την τιμή στην οποία είναι διατεθειμένοι να εμπορεύονται ή να πραγματοποιούν συναλλαγές [44].

11. Πρακτικές προκλήσεις

- Εκτός από την απόσταση μεταφοράς, ο ρυθμός συγκομιδής ενέργειας RF επηρεάζεται κυρίως σε μεγάλο βαθμό από την κατεύθυνση και το κέρδος των κεραιών λήψης. Επομένως, για να βελτιωθεί η απόδοση της συγκομιδής ενέργειας, η δημιουργία κεραιών υψηλού κέρδους για ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων είναι μια σημαντική ερευνητική πρόκληση.
- Σε φορητές συσκευές τα εξαρτήματα συγκομιδής ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων πρέπει να είναι αρκετά μικρά ώστε να μπορούν ενσωματώνονται σε συσκευές χαμηλής ισχύος. Για παράδειγμα, το μέγεθος ενός συστήματος αισθητήρα με ισχύ που προέρχεται μέσω της συγκομιδής RF πρέπει να είναι μικρότερο ή συγκρίσιμο με αυτό ενός συστήματος αισθητήρα με ισχύ που τροφοδοτείτε (προέρχεται) από μπαταρίες.
- Τα περισσότερα συστήματα συγκομιδής ενέργειας RF απαιτούν μια ανεξάρτητη κεραία, προσαρμογή δικτύου και ανορθωτή. Φυσικά, το μέγεθος της κεραίας έχει καθοριστικό αντίκτυπο στον ρυθμό συλλογής ενέργειας, έτσι αυτό παρουσιάζει μια δυσκολία – πρόκληση στο να μειωθεί το μέγεθος των συσκευών, διατηρώντας παράλληλα υψηλή απόδοση στη συγκομιδής ενέργειας.
- Η απόδοση μετατροπής RF-to-DC σε ένα σύστημα συγκομιδής ενέργειας εξαρτάται από την πυκνότητα της παραγόμενης ισχύος RF. Αποδοτικότερη μετατροπή RF-to-DC οδηγεί σε αποδοτικότερο ρυθμό συλλογής ενέργειας. Έτσι, η βελτίωση της απόδοσης στη μετατροπή RF-to-DC σε χαμηλή συλλεγμένη ισχύ είναι σημαντική. Μεγαλύτερος ρυθμός συλλογής ενέργειας επιτυγχάνεται όταν χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας RF-to-DC χαμηλής ισχύος. Επιπλέον, η υλοποίηση ενός υψηλής απόδοσης μετατροπέα συνεχούς ρεύματος χαμηλής ισχύος DC-to-DC, ο οποίος μετατρέπει μια πηγή DC από ένα επίπεδο τάσης σε ένα άλλο, θα αποτελούσε μια ακόμη προσπάθειά βελτίωσης για την επίτευξη υψηλής απόδοσης σε συστήματα συλλογής ενέργειας RF.
- Λόγω του αντιστρόφου τετραγωνικού νόμου, η πυκνότητα ισχύος των κυμάτων RF μειώνεται αναλογικά προς το αντίστροφο του τετραγώνου της απόστασης διάδοσης, έτσι η πρακτική μεταφορά και συγκομιδή ενέργειας RF περιορίζεται μονάχα σε μια τοπική περιοχή. Σύμφωνα με τα πρότυπα και κανονισμούς ραδιο-εκπομπών που ρυθμίζονται από τους οργανισμούς τηλεπικοινωνιών (όπως την FCC, ITU) σε

συστήματα ασύρματης μετάδοσης επιτρέπεται η λειτουργία έως 4W της ισοδύναμης ιστροπικά ακτινοβολούμενης ισχύος (EIRP). Ωστόσο, για να επιτευχθεί ρυθμός μεταφοράς ενέργειας 5,5μW με πηγή ισχύος 4W, είναι δυνατή η απόσταση μόνο των 15 μέτρων [42]. Αξίζει να αναφέρουμε ότι σε σταθμούς πρόσβασης τύπου Wi-Fi η μέγιστη επιτρεπόμενη ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς στη ζώνη των 2.4 GHz είναι 100 mW EIRP, και στη ζώνη των 5 GHz είναι 1W EIRP. Στην ισχύ αυτή συνυπολογίζεται η ισχύς εξόδου του πομπού και το κέρδος της κεραίας [43].

- Ακόμη μια πρακτική πρόκληση σε συστήματα συγκομιδής ενέργειας έχει να κάνει με την κακή προσαρμογή εμπέδησης (Impedance mismatching) της σύνθετης αντίστασης που εμφανίζεται όταν η αντίσταση εισόδου και η αντίσταση στον ανορθωτή δεν είναι ίση με αυτό της κεραίας. Έτσι, η κεραία δεν είναι σε θέση να παραδώσει όλη την τροφοδοτούμενη ισχύ στον ανορθωτή λόγω των μεταβολών της σύνθετης αντίστασης και για αυτό μπορεί να υποβαθμιστεί σοβαρά η απόδοση μετατροπής ενέργειας. Άρα, υπάρχει ανάγκη να αναπτυχθούν οι κατάλληλες τεχνικές σχεδιασμού κυκλωμάτων που να συντονίζουν αυτόματα τις παραμέτρους ώστε να ελαχιστοποιούν την αναντιστοιχία της αντίστασης.
- Χωρίς να υπάρχει οπτική επαφή από τις πηγές ραδιοκυμάτων RF σε ένα σύστημα συγκομιδής ενέργειας, αναμένεται να υπάρχουν σημαντικές απώλειες κατά την μεταφοράς ενέργειας. Επομένως, οι πηγές ενέργειας RF πρέπει να είναι τοποθετημένες κατά βέλτιστο τρόπο ώστε να υποστηρίζουν πολλαπλούς δέκτες προς φόρτιση. Γι' αυτό, σε κινητά περιβάλλον, η κινητικότητα των δεκτών και των πηγών ενέργειας μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά τη μεταφορά ενέργειας RF.
- Η ευαισθησία ενός δέκτη πληροφοριών είναι τυπικά πολύ υψηλότερη από αυτή ενός συλλέκτη ενέργειας RF. Συνεπώς, ένας δέκτης που βρίσκεται σε απόσταση μακριά από έναν πομπό RF μπορεί να είναι σε θέση μόνο να αποκωδικοποιήσει πληροφορίες και να αποτύχει να αποσπάσει ενέργεια από τα σήματα RF. Σε αυτή την περίπτωση, οποιοδήποτε σύστημα SWIPT δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά. Επομένως, η βελτίωση της ευαισθησίας του κυκλώματος σε συστήματα συγκομιδής ενέργειας RF είναι ζωτικής σημασίας.
- Σε συσκευές που τροφοδοτούνται με ισχύ που προέρχεται από ραδιοσυχνότητες, η ισχύς μετάδοσης τους είναι τυπικά χαμηλή, για αυτό το σκοπό μπορούν να υιοθετηθούν πολλαπλές κεραίες για να βελτιωθεί η απόδοση μετάδοσης. Ωστόσο, όταν ο αριθμός των κεραιών αυξάνεται υπάρχει και μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Για αυτό, υπάρχουν μερικά εμπόδια μεταξύ της απόδοσης μετάδοσης και της κατανάλωσης ενέργειας. Μελλοντικά πρέπει να αναπτυχθούν σχέδια για τη βελτιστοποίηση αυτού του συμβιβασμού διότι τα ζητήματα αυτά γίνονται ακόμη πιο περίπλοκα σε δυναμικό περιβάλλον, για παράδειγμα όταν οι αισθητήρες εργάζονται με διαφορετικό ρυθμό συγκομιδής ενέργειας.
- Καθώς οι συσκευές που τροφοδοτούνται μέσω συγκομιδής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες έχουν συνήθως αυστηρούς περιορισμούς λειτουργίας, δεν είναι πρακτικά σωστό να υποστηρίζουν αλγόριθμους υψηλού υπολογισμού. Οποιαδήποτε σχέδια προγραμματισμού, όπως είναι αυτά της διαμόρφωσης και της κωδικοποίησης,

της πολιτικής λειτουργίας του δέκτη και των πρωτόκολλων δρομολόγησης, που θα υιοθετηθούν πρέπει να είναι ενεργειακά αποδοτικά και χαμηλής ισχύος. Ως εκ τούτου, η κατανάλωση ενέργειας είναι πάντα μια σοβαρή ανησυχία στις συσκευές που λειτουργούν με ραδιοσυχνότητες, πράγμα που πιθανόν να απαιτεί τον επανασχεδιασμό υφιστάμενων συστημάτων και αλγορίθμων σε συμβατικά δίκτυα.

5.9 Εφαρμογές συστημάτων συλλογής ενέργειας σε συσκευές

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν γίνει μια από τις πιο ευρέως εφαρμοζόμενες εφαρμογές για την περιβαλλοντική συγκομιδή ενέργειας μέσω ραδιοσυχνοτήτων. Οι συλλέκτες ραδιοσυχνοτήτων RF μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κόμβους αισθητήρων για την παροχή ενέργειας. Όπως μπορούμε να δούμε στο Σχήμα 5.25 οι συσκευές που επωφελούνται την ασύρματη συλλογή RF ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ιατρικές εφαρμογές και ιατρική περίθαλψη. Αξιοποιώντας την συλλογή ενέργειας από ραδιοσυχνότητες, οι ιατρικές συσκευές χαμηλής κατανάλωσης μπορούν να επιτύχουν ενέργεια σε πραγματικό χρόνο κατά παραγγελία (on-demand) από εξειδικευμένες πηγές RF, επιτρέποντας έτσι κυκλώματα χωρίς μπαταρίες με μειωμένο μέγεθος. Μια άλλη εφαρμογή της συγκομιδής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες είναι τα RFID που χρησιμοποιούνται ευρέως για την αναγνώριση, την παρακολούθηση και την διαχείριση αποθεμάτων. Οι πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα των κυκλωμάτων χαμηλής κατανάλωσης και των τεχνολογιών συγκομιδής ενέργειας μπορούν να επεκτείνουν την διάρκεια ζωής και το εύρος λειτουργιών των ετικετών RFID. Συγκεκριμένα οι ετικέτες RFID, αντί να βασίζονται μόνο στους αναγνώστες (RFID readers) για να ενεργοποιούν παθητικά τα κυκλώματά τους, μπορούν μέσω από την συλλογής ενέργειας RF να εκτελούν ενεργά την επικοινωνία τους. Συνεπώς οι τεχνολογίες τύπου RFID μπορούν να εξελιχθούν από απλές παθητικές ετικέτες (tags) σε έξυπνες ετικέτες με νέες λειτουργίες όπως είναι η ανίχνευση, η επεξεργασία δεδομένων και η έξυπνη διαχείριση ενέργειας.

Εκτός από δίκτυα ασύρματων αισθητήρων και σε τηλεπικοινωνίες η συγκομιδή ενέργειας από ζώνες Wi-Fi, GSM, DTV καθώς και από περιβαλλοντικές κινητές συσκευές μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλές ηλεκτρονικές καταναλωτικές συσκευές, που μπορούν να φορτίσουν κατά την διάρκεια της νύχτας όταν δεν χρησιμοποιούνται. Αυτό μπορεί να γίνει κάνοντας συλλογή από το περιβάλλον η ακόμη και κάνοντας χρήση ενός κοντινού πομπού RF. Ήδη γνωστές εταιρίες περιφερειακών για υπολογιστές γνωρίζοντας ότι η συγκομιδή ενέργειας RF μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παροχή δυνατότητας φόρτισης για μια μεγάλη ποικιλία φορητών συσκευών χαμηλής ισχύος, όπως ηλεκτρονικά ρολόγια, βοηθήματα ακοής και MP3 players, ασύρματα πληκτρολόγια κυκλοφορεί στην αγορά ασύρματο ποντίκι (mouse) που φορτίζει ασύρματα εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη αλλαγή και αγορά μπαταριών, καθώς αυτές καταναλώνουν μόνο κάποια μικρό-βατ έως κάποια milli -watts σε ισχύ [44]. Ακόμη άλλες

γνωστές εταιρίες ηλεκτρονικών όπως η Texas Instruments [62], διαθέτουν βιώσιμες, κλιμακούμενες λύσεις ισχύος για φορητές συσκευές η οποίες μπορούν να προσαρμοστούν σε ρολόγια, οθόνες e-ink και άλλα είδη φορητών συσκευών. Στο μέλλον ίσως δούμε περισσότερα συστήματα με δυνατότητες συγκομιδής ενέργειας που να επιτρέπουν την συνεχή φόρτιση κινητών συσκευών, ιδίως σε αστικές περιοχές όπου η πυκνότητα των περιβαλλοντικών πηγών RF είναι υψηλή.



Σχήμα 5.25: Συσκευές που επωφελούνται την συλλογή RF [37]

5.10 Σύνοψη

Μέσα από βιβλιογραφικές αναφορές έχουμε ανασκοπήσει τις τεχνολογίες και τοπολογίες των συστημάτων ασύρματης συγκομιδής ενέργειας. Οι περισσότερες βιβλιογραφικές επισκοπήσεις σε θεματικές περιοχές που εμπίπτουν στο σχεδιασμό RF energy harvesting δίνουν έμφαση στην βελτίωση της απόδοσης των μονάδων WEH και μείωση της κατανάλωσης των συσκευών. Τα σενάρια που αναφέραμε στη προηγούμενη ενότητα, αναλύουν δύο διαφορετικές τοπολογίες συστημάτων συγκομιδής ενέργειας. Η πρώτη περίπτωση αναφέρεται σε ομοιόμορφη κατανομή αισθητήρων σε τοπολογία δακτυλίου (ring topology), ενώ η δεύτερη περίπτωση αναφέρεται σε τυχαία κατανομή αισθητήρων σε τοπολογία πολλαπλών κόμβων. Από αυτά τα χαρακτηριστικά, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η τελική τοπολογία κόμβων παίζει σημαντικό ρόλο στην διάρκεια ζωής των αισθητήρων και μπορούμε να παρατηρήσουμε παρατεταμένη διάρκεια ζωής των συσκευών μέσω τεχνικών WEH, ανάλογα με την περίπτωση. Έτσι, η βελτίωση της διάρκειας ζωής μέσω της συγκομιδής ενέργειας, για συσκευές αισθητήρων χαμηλής ισχύος είναι αρκετά σημαντική γιατί μπορεί να εκτείνει σημαντικά την διάρκεια ζωής σε ασύρματους κόμβους.

Οι αρχιτεκτονικές σχεδιασμού στον δέκτη που αναφέραμε στην ενότητα 5.4, χαρακτηρίζουν τους διαφορετικούς τύπους κυκλωμάτων που μπορούν να υλοποιηθούν σε αυτά τα

συστήματα συγκομιδής ενέργειας. Όταν η κατανάλωση ισχύς ενός κυκλώματος είναι σχετικά μικρή σε σύγκριση με την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος, η ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική δέκτη ξεπερνά την αρχιτεκτονική του συντοπισμένου δέκτη σε υψηλή συγκομιδής ενέργειας, ενώ η αρχιτεκτονική του συντοπισμένου δέκτη είναι ανώτερη σε περιπτώσεις χαμηλής συγκομιδής ενέργειας. Όταν η κατανάλωση ενέργειας στο κύκλωμα είναι υψηλή, η ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική δέκτη λειτουργεί καλύτερα. Για ένα σύστημα χωρίς ελάχιστες απαιτήσεις συλλογής ενέργειας, ένα σύστημα τύπου ενσωματωμένου δέκτη επιτυγχάνει υψηλότερο ρυθμό πληροφόρησης από εκείνη του διαχωρισμένου δέκτη σε κοντινές αποστάσεις μετάδοσης. Επίσης, η συγκομιδή ενέργειας RF μέσω διπλών κεραιών μπορεί εύκολα να επεκταθεί κάνοντας χρήση μεγαλύτερου αριθμού κεραιών στην περίπτωση της ιδανικής αρχιτεκτονικής και στην περίπτωση που έχουμε κύκλωμα με λειτουργία χρονικής εναλλαγής [42].

Στην ενότητα 5.5 αναφέραμε τις προσεγγίσεις για αποτελεσματική αντιμετώπιση της κατανάλωσης ενέργειας σε κατάσταση αναμονής μέσω ενός κύκλου λειτουργίας (duty cycling) στην οποία ο δέκτης μεταβαίνει από κατάσταση 'ακρόασης' σε κατάσταση ύπνου (sleep). Η ασύγχρονη προσέγγιση κύκλου εργασίας στην μονάδα διαχείρισης ενέργειας είναι η πιο αποτελεσματική λύση όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας [22]. Αν και οι πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα τεχνολογιών συγκομιδής ενέργειας μετριάζουν τα ζητήματα έλλειψης ενέργειας, οι συσκευές αισθητήρων εξακολουθήσουν να λειτουργούν με κύκλους λειτουργίας (duty cycling) λόγω της περιορισμένης συλλογής ενέργειας από το περιβάλλον. Για αυτό, πρέπει να ρυθμίζουν δυναμικά τους κύκλους λειτουργίας τους για να προσαρμοστούν ανάλογα με τη διαθεσιμότητα της περιβαλλοντικής ενέργειας. Κλείνοντας αυτό το υπο-κεφάλαιο, μπορούμε να είμαστε σε θέση να αναφέρουμε ότι οι νέες υλοποιήσεις συστημάτων συγκομιδής ενέργειας θα πρέπει να λάβουν υπόψη τις πιο πάνω περιπτώσεις, αλλά και τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης υλοποίησης, για την επιλογή κατάλληλου μοντέλου. Για να πετύχουμε καλή απόδοση στα συστήματα πρέπει πρώτα να μελετήσουμε τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και τις ενεργειακές απαιτήσεις της κάθε συσκευής, ειδικά σε υλοποιήσεις τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και IoT. Με σωστό σχεδιασμό ο χρόνος ζωής των συστημάτων μπορεί να αυξηθεί μέσω της ασύρματης συγκομιδής ενέργειας, ενώ για να επιτευχθεί πλήρως η αυτό-βιωσιμότητα σε ευρύ φάσμα συσκευών, πρέπει να τύχουν περαιτέρω μελέτης και ίσως απαιτήσουν βελτιωμένες τεχνικές σχεδιασμού τόσο σε επίπεδο κυκλώματος όσο και σε επίπεδο συστήματος.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκαν συνοπτικά και αναλύθηκαν τα δίκτυα συγκομιδής ενέργειας.— Έχουμε κάνει μια επισκόπηση των συστημάτων συλλογής ενέργειας ραδιοσυχνότητας με έμφαση των αρχιτεκτονικών, των διάφορων τεχνικών και των υφιστάμενων εφαρμογών. Στη συνέχεια δώσαμε το υπόβαθρο του σχεδιασμού κυκλωμάτων και εξετάσαμε τα διάφορα ζητήματα που εγείρονται στα συστήματα συγκομιδής ενέργειας. Φτάνοντας στο τέλος του κεφαλαίου έχουμε δει τις μελλοντικές κατευθύνσεις και πρακτικές προκλήσεις των τεχνικών συγκομιδής ενέργειας ραδιοσυχνότητας.

Τα συστήματα συλλογής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες μπορούν να αξιοποιούν μεθόδους (τεχνικές) συγκομιδής από μακρινά πεδία ή μέσω ακτινοβολίας μέσω της συγκομιδής - χρήσης ή μέσω συγκομιδής-χρήσης-αποθήκευσης για τη διαχείριση της ενέργειας. Οι κυρίες πηγές

ραδιοσυχνοτήτων για τη συγκομιδή ενέργειας είναι οι αποκλειστικές πηγές RF και οι δυναμικές πηγές RF από το περιβάλλον. Ακόμη μπορούμε να κάνουμε χρήση ενός πομπού – μεταδότη ισχύος αν θέλουμε να παρέχουμε άμεση διαθεσιμότητα ενέργειας. Τα πρωτόκολλα σε αυτά συστήματα που κάνουν χρήση ειδικού φορτιστή RF, λειτουργούν εκτός ζωνών (out-of-band) για αποφυγή πιθανών παρεμβολών. Κατά τον σχεδιασμό συστημάτων συγκομιδής ενέργειας μέσω ραδιοσυχνοτήτων θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και να εξεταστούν οι τυχόν παρεμβολές, η κωδικοποίηση και μορφοποίηση δικτύου, η προσαρμογή εμπέδησης (impedance matching), η ευαισθησία του δέκτη και η απόδοση μετάδοσης [42].

Διαφορετικές αρχιτεκτονικές δέκτη, όπως είναι ο διαχωρισμένος και ο συντονισμένος δέκτης και η ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική στον δέκτη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ασύρματη λήψη ισχύος ανάλογα με την υλοποίηση. Αρκετές εφαρμογές που κάνουν χρήση της παρεχόμενης ενέργειας μέσω της ασύρματης συγκομιδής από ραδιοσυχνότητες είναι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, τα RFID tags και μια μεγάλη ποικιλία κινητών συσκευών χαμηλής ισχύος.

Κεφάλαιο 6

Ασύρματα δίκτυα και αναμεταδότες

6.1 Εισαγωγή

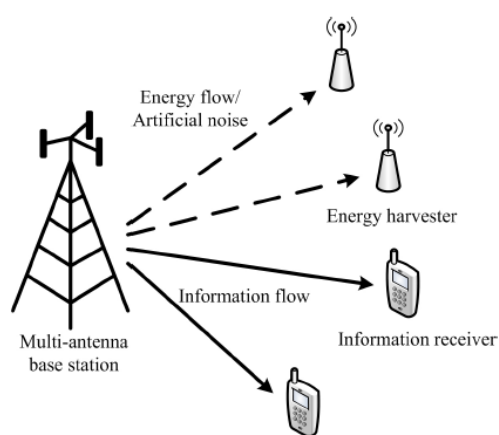
Όπως έχουμε αναφέρει στα προηγούμενα κεφάλαια η συγκομιδή ενέργειας είναι μια πολύ υποσχόμενη τεχνολογία για ασύρματη μεταφορά ισχύος που επιτρέπει σε τερματικά να επαναφορτίσουν τις μπαταρίες τους από περιβαλλοντικές πηγές όπως είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η απόδοση της ασύρματης επικοινωνίας σε συστήματα αισθητήρων περιορίζεται βασικά από την περιορισμένη ζωή της μπαταρίας η οποία χρειάζεται να αντικατασταθεί ή να επαναφορτιστεί κάτι το οποίο διακόπτει -διαταράσσει την λειτουργία της συσκευής. Η πρόσφατη πρόοδος στα συστήματα συγκομιδής ενέργειας μπορεί να μας παρέχει δυνατότητες μεταφοράς ισχύος μέσω της συλλογής ραδιοσυχνοτήτων για τροφοδότηση των ασύρματων συσκευών. Γι' αυτό το λόγο οι συσκευές που τροφοδοτούνται από την περιβαλλοντική ενέργεια μέσω ραδιοσυχνοτήτων προσελκύουν όλο και περισσότερο το ερευνητικό ενδιαφέρον. Πιο κάτω, θα κάνουμε μια ανασκόπηση στα δίκτυα συλλογής ενέργειας, αναφερόμενοι και στους αναμεταδότες (relays) που χρησιμοποιούνται κυρίως σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Τέλος, κλείνουμε το κεφάλαιο με σύγκριση τεχνολογιών.

6.2 Γενικά

Η χρήση διπλών σημάτων RF για παροχή ενέργειας καθώς και μεταφορά πληροφοριών μπορεί να παρέχει ενέργεια σε υλοποιήσεις χαμηλής ισχύος (όπως δίκτυα αισθητήρων). Οι τεχνικές SWIPT παρέχουν το πλεονέκτημα της ελεγχόμενης και αποδοτικής παράδοσης ασυρμάτων σημάτων πληροφορίας και ενέργειας ταυτόχρονα κάτι το οποίο μπορεί να μας προσφέρει επιλογές χαμηλού κόστους για βιώσιμη ανάπτυξη ασυρμάτων συστημάτων χωρίς τροποποίηση του υλισμικού (hardware) στον πομπό. Οι πρόσφατες έρευνες στον τομέα αυτό έχουν αναγνωρίσει ότι τα συστήματα ταυτόχρονης μεταφοράς δεδομένων πληροφορίας και μεταφορά ενέργειας χρειάζονται ισολογισμό στο σχεδιασμό του συστήματος. Μερικοί λόγοι για αυτό είναι οι διάφορες παραλλαγές που υπάρχουν στην ποσότητα και ρυθμό των σημάτων RF. Ο ρυθμός εντροπίας (entropy rate) σε ένα σήμα RF προσδιορίζει την ποσότητα πληροφοριών, ενώ η μέση τετραγωνισμένη τιμή των σημάτων ραδιοσυχνοτήτων αντιπροσωπεύει την ισχύ του. Στα σημερινά συστήματα, η ποσότητα των μεταδιδόμενων πληροφοριών και της μεταφερόμενης ενέργειας δεν μπορεί να μεγιστοποιηθεί ταυτόχρονα για αυτό εγείρονται ζητήματα για επανασχεδιασμό υφιστάμενων ασύρματων δικτύων [44].

Η ασύρματη μεταφορά ισχύος μπορεί να χρησιμοποιήσει διάφορες υλοποιήσεις τεχνολογιών όπως συστήματα πολλαπλών κεραιών. Μια βασική πρόκληση σε αυτά τα συστήματα είναι οι απώλειες στη μεταφοράς ενέργειας. Με την αύξηση της απόστασης παρατηρούνται μεγαλύτερες απώλειες διάδοσης. Αυτό το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα σοβαρό σε συστήματα με ένα πομπό (μια κεραία) που παράγει ομοιοκατευθυντική ακτινοβολία (omni-directional) στα εκπεμπόμενα σήματα RF. Για να έχουμε αποδοτική μεταφοράς ενέργειας RF χρειάζονται προηγμένες τεχνικές πολλαπλών κεραιών και επεξεργασίας σήματος, όπως είναι η μορφοποίηση δέσμης (beamforming). Οι τεχνικές πολλαπλών κεραιών μπορούν να επιτύχουν χωρική πολυπλεξία (spatial multiplexing). Επιπλέον, τεχνικές μορφοποίησης δέσμης με τη

χρήση πολλαπλών κεραιών μπορεί να εφαρμοστούν για βελτίωση της απόδοσης της μεταφοράς ενέργειας RF καθώς και SWIPT, χωρίς πρόσθετο εύρος ζώνης ή αυξημένη ισχύ εκπομπής. Για αυτό το λόγο το beamforming θεωρείται ως κύρια τεχνική για εφικτή εφαρμογή του SWIPT. Σε δίκτυα συγκομιδής ενέργειας η μορφοποίηση δέσμης 'κατευθύνει' τα σήματα ραδιοσυχνοτήτων προς τους δέκτες. Ακόμη, εκτός από τη μετάδοση δεδομένων και βελτιστοποίηση της συγκομιδής ενέργειας η μορφοποίηση δέσμης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξασφαλίσει ασφαλείς επικοινωνίες [44]. Το πιο κάτω Σχήμα 6.1 δείχνει ένα γενικό μοντέλο για το σύστημα μορφοποίησης δέσμης SWIPT.



Σχήμα 6.1: Γενικό μοντέλο για σύστημα μορφοποιημένων δεσμών SWIPT.

Οι τρόποι μετάδοσης της ενέργειας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Μετάδοση ενέργειας κοντινού πεδίου (η ισχύς μετάδοσης είναι μερικές δεκάδες Watts για μικρές – κοντινές αποστάσεις μέχρι 1 μέτρο).
- Μετάδοση ενέργειας μακρινού πεδίου με πηγές στοχευμένης ακτινοβολίας (η μετάδοση γίνεται με κατευθυντικές κεραιές και η ισχύς μετάδοσης είναι μερικά mWatts για μικρές για αποστάσεις μερικών μέτρων).
- Μετάδοση χαμηλής ενέργειας μακρινού πεδίου με περιβαλλοντικές πηγές (όπου η ισχύς μετάδοσης είναι μερικά μ Watts για αποστάσεις μερικών χιλιομέτρων – όπου η πυκνότητα της ισχύος είναι επαρκής).

6.3 Είδη δικτύων συλλογής ενέργειας

Τα τελευταία χρόνια τα συνεργατικά και γνωσικά δίκτυα σημειώνουν σημαντική πρόοδο, κάτι το οποίο δίνει ώθηση στην ανάπτυξη μοντέρνων ασυρμάτων επικοινωνιών σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Τα πλεονεκτήματά τους οφείλονται στην αντιμετώπιση των περιορισμών του φάσματος, της ισχύος και των απωλειών διαδρομής. Για αυτό θα αναλύσουμε περιληπτικά τα είδη ασυρμάτων δικτύων συλλογής ενέργειας.

6.3.1 Συνεργατικά δίκτυα συλλογής ενέργειας

Σε συνεργατικά δίκτυα συλλογής ενέργειας, οι κόμβοι μπορούν να συνεργάζονται μεταξύ τους για να μεταδίδουν πληροφορίες, σχηματίζοντας έτσι ένα εικονικό σύστημα MIMO. Αυτό γίνεται χωρίς να υπάρχει ανάγκη εγκατάστασης πολλαπλών κεραιών σε κάθε κόμβο. Με χρήση τεχνικών συλλογής ενέργειας, η εγκατάσταση αυτόνομων συνεργατικών αναμεταδοτών βελτιώνει τον χωρικό διαφορισμό (space diversity) και αυξάνει τη διάρκεια λειτουργίας τους χωρίς να απαιτείται συχνή αντικατάσταση μπαταριών. Όμως σε τέτοια συστήματα τα προβλήματα ενεργειακού προγραμματισμού γίνονται όλο και πιο περίπλοκα, γιατί σε κάθε χρονική στιγμή πρέπει να εξετάζεται η σχέση μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας (σε κάθε βήμα επικοινωνίας) και του ρυθμού επαναφόρτισης των μπαταριών. Συλλέγοντας ενέργεια από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διευκολύνουμε την μετάδοση πληροφοριών μέσω αναμεταδοτών στα συνεργατικά δίκτυα. Σε περιπτώσεις δικτύων δυο βημάτων οι αναμεταδότες μπορούν να συλλέγουν ενέργεια από ραδιοσυχνότητες ή να μεταδίδουν πληροφορίες στον δέκτη, κάτι το οποίο εκτελείται μόνο όταν ο αναμεταδότης έχει επαρκή ισχύ (ενέργεια) που να διασφαλίζει αποκωδικοποίηση πληροφοριών από τον δέκτη [51].

- Επιλογή αναμεταδότη (relay selection) : Οι πηγές σε παραδοσιακά δίκτυα, επιλέγουν τους αναμεταδότες με τον καλύτερο λόγο σήματος -προς τον- θόρυβο (SNR - Signal Noise Ratio). Αυτό δεν ισχύει στα δίκτυα συλλογής ενέργειας διότι πρέπει να εξεταστεί η κατάσταση της ενέργειας σε κάθε αναμεταδότη. Για παράδειγμα, όταν ένας αναμεταδότης επιλέγεται συνέχεια, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η μπαταρία του να είναι άδεια, λόγω του αργού ρυθμού επαναφόρτισης.
- Αμφίδρομη και συνεργατική επικοινωνία πολλαπλών κόμβων (multi-hop) : Το βασικό στοιχείο σε αυτή την περίπτωση είναι το συνεργατικό πρωτόκολλο αυτόματου αιτήματος επανάληψης (automatic repeat request) για να παρέχει αξιόπιστα δεδομένα στους κόμβους με την ελάχιστη δυνατή ποσότητα ενέργειας. Σκοπός του πρωτοκόλλου αυτού είναι η βελτίωση της απόδοσης ανάλογα με την κατανάλωση ενέργειας και τον ρυθμό επαναφόρτισης των μπαταριών [51].

Σε δίκτυα πολλαπλών κόμβων, τεχνικές συνεργατικής αναμετάδοσης μπορούν να βοηθήσουν να ξεπεραστεί η διάλειψη και εξασθένιση των σημάτων κάνοντας χρήση ενδιάμεσων κόμβων αναμετάδοσης κάτι το οποίο βελτιώνει την απόδοση και αξιοπιστία του δικτύου. Έτσι, είναι κατάλληλο να εφαρμόζουμε τα δίκτυα πολλαπλών κόμβων σε δίκτυα περιορισμένης ενέργειας,

όπως στα συστήματα συγκομιδής ενέργειας RF-EHNS. Πρόσφατες ερευνητικές μελέτες σε αυτό τον τομέα επικεντρώνονται στη βελτίωση της απόδοσης στο φυσικό στρώμα και στο επίπεδο MAC (π.χ. στη λειτουργία αναμετάδοσης και κατανομή ισχύος), καθώς και το επίπεδο δικτύου (επιλογή αναμεταδοτών). Στον σχεδιασμό δικτύων με πολλαπλούς κόμβους πρέπει να ληφθούν υπόψη πληροφορίες σχετικά με την ενεργειακή κατάσταση των αισθητήρων (π.χ. το αποθεματικό διαθέσιμης ενέργειας και το δυναμικό διαθέσιμης ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων).

6.3.2 Γνωσιακά δίκτυα (CRN - cognitive radio network)

Κύριο χαρακτηριστικό των γνωσιακών δικτύων, είναι ότι οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να χρησιμοποιήσουν μέρος του φάσματος που ανήκει στους κύριους (πρωτεύοντες) χρήστες. Σε αυτό τον τύπο δικτύων συλλογής ενέργειας, οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν την δυνατότητα συλλογής ενέργειας από πρωτεύοντες ή από τους υπολοίπους δευτερεύοντες χρήστες. Ο σχεδιασμός των γνωσιακών δικτύων συλλογής ενέργειας, καθώς και η ποιότητα επικοινωνίας τους εξαρτάται από τη δυναμική χρήση του διαθέσιμου φάσματος ανάλογα με την συλλογή ενέργειας από το περιβάλλον. Γι' αυτό το λόγο, το επίπεδο ισχύος τους δεν είναι σταθερό στον χρόνο. Στους κόμβους με λειτουργίες συλλογής ενέργειας μπορούμε να διακρίνουμε τα πιο κάτω χαρακτηριστικά:

- Στρατηγική ανίχνευσης φάσματος : Οι ενεργειακοί περιορισμοί εξαρτώνται από τη διάρκεια της συγκομιδής ενέργειας και επηρεάζουν την διαδικασία ανίχνευσης φάσματος. Σε περιπτώσεις όπου υπάρχει χαμηλή στιγμιαία ισχύς στο σύστημα, τότε αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αποτυχημένη προσπάθεια ολοκλήρωσης των διαδικασιών ανίχνευσής και μετάδοσης πληροφοριών. Σε αυτή την περίπτωση ο δευτερεύων χρήστης πρέπει : α) να παραμείνει αδρανής μέχρι η συσσωρευμένη ενέργεια του συστήματος να είναι αρκετή (μεγαλύτερη) έτσι ώστε να μπορέσει να ανιχνεύσει και να μεταδώσει πληροφορίες μια φορά, β) να ανιχνεύσει το φάσμα, γ) όταν η συσσωρευμένη ενέργεια είναι μεγαλύτερη από ένα προκαθορισμένο κατώφλι ανίχνευσής να απασχολήσει μερίδιο του φάσματος, δ) να συνεχίσει αυτή τη διαδικασία της ανίχνευσης μέχρι να εξαντληθεί η ενέργεια [53].
- Στρατηγική συγκομιδής ενέργειας : Το δίκτυο βρίσκει την κατάλληλη χρονική στιγμή, καθώς και την διάρκεια που οι δικτυακοί κόμβοι συλλέγουν ενέργεια.
- Στρατηγική πρόσβασης φάσματος : Το δίκτυο βρίσκει την κατάλληλη στιγμή για πρόσβαση στο φάσμα.

Τα γνωσιακά ραδιοεπικοινωνιακά δίκτυα μπορούν να ρυθμιστούν και να προγραμματιστούν δυναμικά και να χρησιμοποιήσουν τα καλύτερα ασύρματα κανάλια για να αποφύγουν παρεμβολές και συμφόρηση. Αυτά τα δίκτυα ανιχνεύουν αυτόματα διαθέσιμα κανάλια στο ασύρματο φάσμα και αλλάζουν ανάλογα τις παραμέτρους μετάδοσης ή λήψης έτσι, ώστε να επιτρέπουν περισσότερες ταυτόχρονες ασύρματες επικοινωνίες σε μια δεδομένη θέση και ζώνη φάσματος [45]. Αυτή η διαδικασία είναι μια μορφή δυναμικής διαχείρισης του φάσματος. Τροφοδοτώντας γνωσιακά δίκτυα με συγκομιδή ραδιοσυχνοτήτων μπορεί να λύσουμε προβλήματα που αφορούν το φάσμα και ενεργειακής απόδοσης στα ασύρματα δίκτυα.

Τα γνωσιακά δίκτυα με δυνατότητες συγκομιδής ραδιοσυχνοτήτων επιτρέπουν σε δευτερεύοντες χρήστες να συλλέγουν και να αποθηκεύουν ενέργεια από κοντινές εκπομπές πρωτογενών χρηστών. Στη συνέχεια, οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να μεταδώσουν δεδομένα όταν είναι αρκετά μακριά από τους βασικούς χρήστες ή όταν οι κύριοι χρήστες είναι αδρανείς. Επομένως, οι δευτερεύοντες χρήστες όχι μόνο εντοπίζουν 'τρύπες' στο φάσμα για ευκαιριακές μεταδόσεις δεδομένων, αλλά και αναζητούν κατειλημμένες ζώνες φάσματος - καναλιών για συλλογή ενέργειας RF. Στα γνωσιακά δίκτυα, ένας δευτερεύων χρήστης μπορεί να λάβει ενέργεια RF από ένα κύριο χρήστη στη μετάδοση. Το σχήμα 6.2 δείχνει μια γενική αρχιτεκτονική δικτύου για δίκτυα CRN που τροφοδοτούνται από ραδιοσυχνότητες. Ακόμη, δείχνει τρεις ζώνες που σχετίζονται με τον κύριο χρήστη. Η 'ζώνη μετάδοσης' είναι η επικοινωνιακή κάλυψη του πρωτεύοντος χρήστη. Μέσα στη 'ζώνη μετάδοσης', εάν ο δευτερεύων χρήστης βρίσκεται στη "ζώνη συγκομιδής RF", τότε ο δευτερεύων χρήστης μπορεί να συλλέξει ενέργεια RF από τον κύριο χρήστη. Εάν όμως οι κύριοι χρήστες καταλάβουν τα δικά τους κανάλια, τότε ο δευτερεύων χρήστης δεν μπορεί να μεταδώσει δεδομένα αν είναι μέσα στην "ζώνη παρεμβολών" (εφόσον δημιουργούνται παρεμβολές στη επικοινωνία των κύριων χρηστών) [44].

6.3.3 Δίκτυα συλλογής ενέργειας πολλαπλών χρηστών

Κυρίο χαρακτηριστικό των δικτύων συλλογής ενέργειας με πολλαπλούς χρήστες είναι οι αμοιβαίες παρεμβολές που δημιουργούνται μεταξύ των χρηστών. Για να εξασφαλιστεί η ποιότητα των υπηρεσιών (μεταξύ χρηστών) απαιτείται η αντιμετώπιση των παρεμβολών χρησιμοποιώντας τεχνικές αξιολόγησης της ενέργειας, η οποία είναι γενικά περιορισμένη σε περιβάλλοντα επικοινωνίας με πολλαπλούς χρήστες. Στη συνέχεια, θα δούμε τις τεχνικές οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αντιμετώπισή αυτών των προβλημάτων :

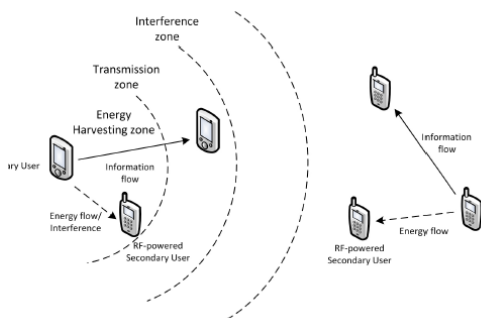
- Κανάλια παρεμβολής με πολλαπλούς χρήστες : Κύρια ιδέα αυτών των καναλιών είναι η χρήση των παρεμβολών για ανανέωση της ενέργειας στις μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Για να επιτευχθεί αυτό, το σήμα διασπάται σε δύο ορθογώνια σήματα. Ένα σήμα πληροφοριών προς αποκωδικοποίηση και ένα άλλο σήμα για την συλλογή ενέργειας [54].
- Κανάλια ευρυεκπομπής (broadcast channels) : Αυτά τα κανάλια έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό την επίτευξη δικαιοσύνης (fairness) μεταξύ των δεκτών, βάση του σωστού καταμερισμού του χρόνου, του ρυθμού και της ισχύς. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της διανομής είναι τα συστήματα MIMO με 3 κόμβους, όπου ο ένας δέκτης συλλέγει ενέργεια ενώ οι άλλοι δέκτες αποκωδικοποιούν πληροφορίες που στέλνονται από τον πομπό. Όταν οι δέκτες πληροφοριών και ενέργειας βλέπουν διαφορετικά κανάλια επικοινωνίας, ο ρυθμός τους εξαρτάται από τις επιλογές του σχήματος μετάδοσης. Σε περίπτωση που οι δέκτες πληροφορίας και ενέργειας 'βλέπουν' το ίδιο επικοινωνιακό κανάλι, ο ρυθμός τους εξαρτάται από τα σχήματα χρονικού διαχωρισμού (time switching) και διαχωρισμού ισχύος (power-splitting).
- Κανάλια πολλαπλής διανομής (multicast channels) : Σε αυτή την περίπτωση δικτύων ο πομπός αποστέλλει κοινές πληροφορίες σε πολλούς δέκτες ταυτόχρονα. Οι δέκτες

μπορούν είτε να συλλέξουν ενέργεια είτε να αποκωδικοποιήσουν πληροφορίες. Η αποκωδικοποίηση και κωδικοποίηση των πληροφοριών βασίζεται σε δυο κριτήρια. Το ένα κριτήριο είναι η ελαχιστοποίηση του μέσου ορού λανθάνουσας πληροφορίας, με βάση τη μεταδιδόμενη ισχύ και τους περιορισμούς της ενέργειας, ενώ το άλλο κριτήριο είναι η μεγιστοποίηση της συνολικής ενέργειας με βάση τη μεταδιδόμενη ισχύ και της μέσης τιμής λανθάνουσας πληροφορίας [55].

- Πολλλαπλή πρόσβαση καναλιών (multiple access channels) : Σε αυτή την περίπτωση δικτύων με πολλαπλούς χρήστες, απαιτείται συντονισμός των χρηστών για να μπορούν να ικανοποιηθούν οι περιορισμοί μετάδοσης ενέργειας, έτσι ώστε να μπορεί να υπάρξει πετυχημένη πολλαπλή πρόσβαση. Σε συστήματα ΣΕ, οι χρήστες μπορούν να αναπληρώσουν ενέργεια από εκλαμβανόμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που προέρχονται από τους πομπούς (downlink). Συγκεκριμένα το σημείο πρόσβασης μεταδίδει το σήμα του σε πολλαπλούς χρήστες που χρησιμοποιούν συστήματα συγκομιδής ενέργειας και στη συνέχεια οι χρήστες εκμεταλλεύονται αυτή την ενέργεια για μετάδοση πληροφοριών στο σημείο πρόσβασης (ή πυλώνα πληροφοριών) μέσω τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου TDMA (Time Division Multiple Access). Η απόδοση των συστημάτων μεγιστοποιείται με τη σωστή διαχείριση του χρονικού καταμερισμού και την ικανοποίηση των περιορισμών της μέσης ενέργειας [51].

6.3.4 Συλλογή ενέργειας από κυψελωτά δίκτυα

Όπως αναφέραμε στην Ενότητα 4.5, τα κυψελωτά δίκτυα αποτελούνται από μικροκυψέλες (cells) πυκνά συνδεδεμένες μεταξύ τους με χαμηλή εμβέλεια και χαμηλές απαιτήσεις μεταδιδόμενης ισχύς. Στα παραδοσιακά κυψελωτά δίκτυα (όπως στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας), η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να μειωθεί με την εγκατάσταση περισσότερων σταθμών βάσης και την ανάπτυξη έξυπνων μηχανισμών όπως τον καταμερισμό πόρων, τον σχεδιασμό κελιών (cell planning) και τον χρονοπρογραμματισμό (δρομολόγηση) χρηστών (user scheduling).



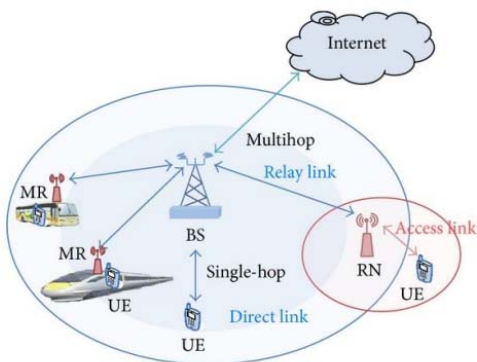
Σχήμα 6.2: Γενική αρχιτεκτονική (γνωσιακών δικτύων) με τροφοδότηση από σήματα RF.

6.4 Αναμεταδότες (Relays)

Οι αναμεταδότες είναι συσκευές που βοηθούν στις επικοινωνίες. Υπάρχουν πολλά είδη αναμεταδοτών που ποικίλουν σε τεχνολογίες και χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα με μια ή με πολλαπλές κεραίες. Οι αναμεταδότες μπορεί να είναι σταθερά σημεία (π.χ. δικτυακής υποδομής), κινητά σημεία ή σημεία συνεταιρισμού (π.χ. από κινητές συσκευές χρηστών). Γενικά, όσους περισσότερους αναμεταδότες έχουμε τόσοι περισσότερους πολλαπλούς χρήστες μπορούν να υποστηρίξουν εφόσον ο σκοπός ενός αναμεταδότη είναι να παρέχει κάλυψη, διαφορισμό και αυξημένη χωρητικότητα. Τα πιο γνωστά μοντέλα αναμεταδοτών είναι :

- α) Μονόδρομης πλήρης αμφίδρομης λειτουργίας (One-way full duplex)
- β) Μονόδρομης μισής αμφίδρομης λειτουργίας (One-way half duplex)
- γ) Διπλής αμφίδρομης λειτουργίας (Two-way half duplex)
- δ) Μονόδρομης λειτουργίας πολλαπλών αλμάτων (One-way multi-hop)

Στα ασύρματα δίκτυα η αναμετάδοση (relaying) είναι η προσέγγιση βάσει της οποίας ένα τερματικό επικοινωνεί με το κεντρικό δίκτυο μέσω ενός κόμβου αναμετάδοσης. Ο κόμβος είναι ασύρματα συνδεδεμένος με το βασικό κελί χρησιμοποιώντας ασύρματες διασυνδέσεις όπως για παράδειγμα κινητής τηλεφωνίας. Από την οπτική του τερματικού, ο ενδιάμεσος κόμβος εμφανίζεται ως μία κανονική κυψέλη. Αυτό απλοποιεί την υλοποίηση του τερματικού, και βοηθά την επίτευξη συμβατότητας με τα υπόλοιπα τερματικά. Το relaying επιτρέπει την βελτίωση της κάλυψης σε μέρη που διαφορετικά το σήμα θα ήταν ασθενές, όπως εσωτερικοί χώροι, απομακρυσμένες περιοχές κ.λπ. Στο Σχήμα 6.3, παρατηρούμε έναν τέτοιο αναμεταδότη RN.

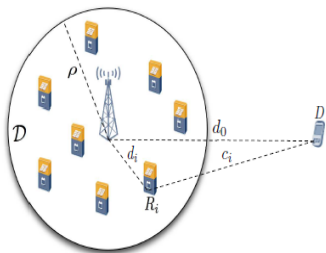


Σχήμα 6.3 : Βελτίωση της κάλυψης μέσω ενός relay κόμβου [61].

Οι λειτουργίες ενός αναμεταδότη έχουν να κάνουν κατά κύριο λόγο με την ενίσχυση και προώθηση ενός σήματος, αποκωδικοποίησης και προώθησης των σημάτων, καθώς και με τη συμπίεση και προώθηση των σημάτων [46].

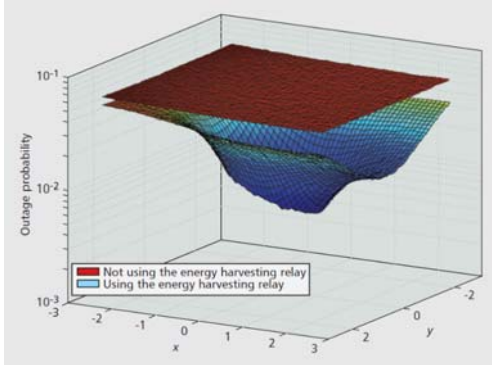
6.4.1 Συστήματα SWIPT με αναμεταδότες

Ένα σύστημα MIMO, όπως παρουσιάζεται στο πιο κάτω Σχήμα 6.4, μπορεί να είναι δύσκολο να εφαρμοστεί σε ορισμένες περιπτώσεις λόγω πρακτικών περιορισμών όπως είναι το μέγεθος και το κόστος των κινητών συσκευών. Αυτό παρακινεί τη χρήση αναμεταδοτών σε δίκτυα SWIPT. Πιο κάτω παρατηρούμε ένα σενάριο χρήσης αναμεταδοτών, στη συγκεκριμένη περίπτωση R_i που χρησιμεύει για να αυξάνει την εμβέλεια από το σταθμό βάσης στη κινητή συσκευή D . Επιπλέον, κάνοντας χρήση της ασύρματης μεταφοράς ισχύος, δίνει ώθηση σε κινητές συσκευές και αναμεταδότες να τροφοδοτούνται από λαμβανόμενα σήματα ραδιοσυχνότητας και επομένως η διάρκεια ζωής τους μπορεί να αυξηθεί.



Σχήμα 6.4: Τυπικό μοντέλο δικτύου. Ένας σταθμός βάσης επικοινωνεί με τον προορισμό D με τη βοήθεια αναμεταδοτών. Συγκεκριμένα, στην πρώτη φάση εκπομπής ο σταθμός βάσης μεταδίδει το σήμα του στους κόμβους αναμετάδοσης και στην συνέχεια οι αναμεταδότες αποκωδικοποιούν το σήμα πηγής και το μεταδίδουν (προωθούν) στον προορισμό, σύμφωνα με τους κανόνες επιλογής αναμεταδότη από το σύστημα [50].

Ας εξετάσουμε μια βιβλιογραφική περίπτωση ενός δικτύου αναμεταδότη με ένα ζεύγος πηγής-προορισμού και μία απλή αποκωδικοποίηση - προώθηση. Το SWIPT εκτελείται στον αναμεταδότη χρησιμοποιώντας τον διαχωρισμό ισχύος (power-splitting). Στο σχήμα 6.5 μπορούμε να δούμε την απόδοση του συστήματος χρησιμοποιώντας αναμεταδότη σε σύγκριση με την απευθείας μετάδοση (δηλαδή όταν δεν χρησιμοποιείται ο αναμεταδότης). Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από το σχήμα η χρήση αναμεταδότη, μειώνει το χρόνο μεταξύ διακοπών λειτουργίας έως και δέκα φορές (από 7×10^{-1} σε 5×10^{-2}) στην αξιοπιστία λήψης. Αυτό σε σύγκριση με την άμεση μετάδοση βλέπουμε ότι το σύστημα με αναμεταδότη μπορεί να μας μειώσει το χρόνο που θα βρίσκεται το σύστημα εκτός λειτουργίας έως και δέκα φορές κάτι το οποίο μας προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις στην αξιοπιστία λήψης [47].



Σχήμα 6.5: Απόδοση διακοπής λειτουργίας δικτύου αναμεταδοτών με μια πηγή και ένα προορισμό. Η πηγή βρίσκεται στο $(0, 0)$, ο προορισμός βρίσκεται στο $(5 \text{ m}, 0)$, και το επίπεδο x - y δείχνει τη θέση του αναμεταδότη. Το κόκκινο σημείο δείχνει τη μη χρήση αναμεταδότη, ενώ το μπλε σκιαγράφημα δείχνει τη χρήση ενός αναμεταδότη συλλογής ενέργειας [47].

Παραγωγή πιθανότητας διακοπής: Ένα συμβάν διακοπής εμφανίζεται μόνο όταν δεν υπάρχει αλλαγή στην κατάσταση της προσωρινής αποθήκευσης. Επομένως, η πιθανότητα μη διαθεσιμότητας του συστήματος, δίνεται από το άθροισμα των πιθανοτήτων να βρίσκονται σε στάδιο r και να έχουν ένα γεγονός διακοπής [66].

Εξίσωση πιθανότητας διακοπής:

$$P_{\text{out}} = \sum_{r=1}^{(L+1)K} \pi_r p_r = \text{diag}(A)\pi. \quad (35)$$

Η πιο πάνω εξίσωση δείχνει ότι ο υπολογισμός της σχετικής σταθερής κατάστασης π , περιλαμβάνει ένα απλό θεωρητικό πλαίσιο για τον υπολογισμό της πιθανότητας διακοπής για τη πολιτική επιλογής αναμεταδότη.

6.4.2 Επιλογή αναμεταδοτών σε ασύρματα δίκτυα

Σε αυτή την υπο-ενότητα σχολιάζουμε την επιλογή αναμεταδοτών στα ασύρματα συνεργαζόμενα δίκτυα, όπου οι αναμεταδότες είναι εξοπλισμένοι με μπαταρίες. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές τεχνικές συγκομιδής ενέργειας, οι ασύρματοι κόμβοι (π.χ. οι αναμεταδότες) μπορούν είτε να αντλούν ενέργεια από σήματα πηγής (σε περίπτωση που η μπαταρία είναι αφόρτιστη) είτε προσπαθούν να αποκωδικοποιήσουν και να προωθήσουν τα σήματα (σε περίπτωση φορτισμένων μπαταριών). Γ' αυτό η ενέργεια των κόμβων επηρεάζει σημαντικά την απόδοση των συστημάτων και οδηγεί σε διαφοροποιημένα κέρδη ανάλογα με τις τιμές του λόγου SNR. Η επιλογή των αναμεταδοτών (Relay selection) είναι σημαντική για την αξιοποίηση πολλαπλών αναμεταδοτών σε συστήματα χαμηλής πολυπλοκότητας και η χρήση τεχνικών συγκομιδής ενέργειας φέρνει θεμελιώδεις αλλαγές στο σχεδιασμό στρατηγικών επιλογής αναμεταδοτών. Στα συμβατικά δίκτυα αναμεταδοτών είναι γνωστό ότι τα κανάλια πηγής - αναμεταδότη και προορισμού - αναμεταδότη είναι εξίσου σημαντικά για την επιλογή

αναμεταδότη, πράγμα που σημαίνει ότι η βέλτιστη θέση ενός αναμεταδότη είναι να τοποθετηθεί στη μέση μεταξύ της πηγής και προορισμού. Αυτή η επιλογή είναι κρίσιμη στα δίκτυα συγκομιδής ενέργειας, γιατί η ποιότητα των καναλιών από το κανάλι αναμετάδοσης καθορίζει όχι μόνο την αξιοπιστία μετάδοσης, αλλά και την συγκομιδή ενέργειας από τους αναμεταδότες.

A. Τυχαία επιλογή αναμεταδοτών

Το σχέδιο τυχαίας επιλογής αναμεταδοτών (RRS) δεν απαιτεί καμία ανατροφοδότηση σχετικά με την κατάσταση της μπαταρίας ή τη θέση των κόμβων αναμετάδοσης και επιλέγει τον αναμεταδότη με τυχαίο τρόπο. Αυτό το σχέδιο έχει χαμηλή πολυπλοκότητα υλοποίησης και είναι κατάλληλο για δίκτυα με αυστηρούς περιορισμούς ισχύος και εύρους ζώνης. Χωρίς γενικές απώλειες θεωρούμε ότι ένας αναμεταδότης i επιλέγεται για να βοηθήσει μια πηγή. Εάν ο αναμεταδότης i είναι πλήρως φορτισμένος, επιχειρεί να αποκωδικοποιήσει σήματα από την πηγή και παραμένει σε λειτουργία ανίχνευσης φάσματος. Εάν ο αναμεταδότης i έχει άδεια μπαταρία, μεταβαίνει σε λειτουργία συγκομιδής ενέργειας και χρησιμοποιεί το λαμβανόμενο σήμα για σκοπούς ασύρματης μεταφοράς ισχύος (WPT). Σε αυτή την περίπτωση ο συγκεκριμένος αναμεταδότης δεν είναι ενεργός για το λόγο ότι είναι σε λειτουργία συγκομιδής ενέργειας και χρησιμοποιεί το σήμα της πηγής για φόρτιση. Κατά την διάρκεια της πρώτης χρονοθυρίδας το λαμβανόμενο σήμα στον αναμεταδότη i μπορεί να γραφτεί ως εξής :

$$y_i = \sqrt{P} \frac{H_i}{\sqrt{1+a_i}} s + n_i \quad (36)$$

Όπου το s υποδηλώνει το σήμα πηγής με κανονικοποιημένη ισχύ. Όταν ο αναμεταδότης i είναι ενεργός το αντίστοιχο λαμβανόμενο SNR είναι ίσο με

$$\text{SNR}_i = \frac{P|h_i|^2}{(1+a_i)\sigma^2} \quad (37)$$

Όταν ο αναμεταδότης i είναι ανενεργός (κενή μπαταρία), η ισχύς εισόδου στην συσκευή είναι ίση με

$$P_h = \zeta \frac{P|h_i|^2}{(1+a_i)} \quad (38)$$

όπου το ζ υποδηλώνει την απόδοση μετατροπής WPT και υποθέτει ότι η συλλογή ενέργειας από τον προσθετικό λευκό γκαουσιανό θόρυβο (AWGN) είναι αμελητέα. Στη δεύτερη χρονική περίοδο, το ληφθέν σήμα στον προορισμό μπορεί να γραφτεί ως

$$y_D = \sqrt{P} \frac{g_i}{\sqrt{1+c_i}} S + n_D \quad (39)$$

Και ο λόγος σήματος προς τον θόρυβο δίνεται από

$$\text{SNR}_D = \frac{P_r |g_i|^2}{(1+c_i)\sigma^2} \quad (40)$$

B. Επιλογή αναμεταδότη με βάση την πλησιέστερη απόσταση

Το σχέδιο επιλογής αναμεταδότη με βάση την πλησιέστερη απόσταση απαιτεί προαγομένη γνώση της θέσης των κόμβων αναμετάδοσης. Υποθέτουμε ότι ο σταθμός βάσης παρακολουθεί τη θέση των αναμεταδοτών μέσω ενός καναλιού ανατροφοδότησης ή μέσω μηχανισμού εντοπισμού θέσης (GPS) και επιλέγει τον κόμβο αναμετάδοσης ο οποίος βρίσκεται πιο κοντά στον σταθμό βάσης.

Γ. Τυχαία επιλογή αναμεταδότη με πληροφορίες μπαταρίας

Η τυχαία επιλογή αναμεταδότη με βάση πληροφορίες από την μπαταρία, επιλέγει τυχαία έναν κόμβο αναμετάδοσης μεταξύ των φορτισμένων αναμεταδοτών (εάν υπάρχουν). Το σχέδιο αυτό, βασίζεται σε μια εκ των προτέρων γνώση της κατάστασης της μπαταρίας και απαιτεί από τους αναμεταδότες να τροφοδοτούν την κατάσταση της μπαταρίας τους στην αρχή κάθε φάσης εκπομπής.

Δ. Επιλογή αναμεταδότη με βάση την πλησιέστερη απόσταση με πληροφορίες μπαταρίας

Η επιλογή αναμεταδότη με βάση την προσέγγιση της πλησιέστερης απόστασης με την μπαταρία ακολουθεί τις αρχές του πρώτου σχεδίου, αλλά λαμβάνει υπόψη την κατάσταση της μπαταρίας των κόμβων των αναμεταδοτών.

Ε. Κατανεμημένη διαμόρφωση δέσμης

Το σχέδιο αυτό επιλέγει όλους τους κόμβους αναμεταδοτών που φορτίζονται στην αρχή της φάσης εκπομπής. Πιο συγκεκριμένα, όλοι οι κόμβοι αναμεταδοτών με πλήρως φορτισμένες μπαταρίες ενεργοποιούνται και προσπαθούν να αποκωδικοποιήσουν τα εκλαμβανόμενα σήματα. Οι αναμεταδότες που είναι σε θέση να αποκωδικοποιήσουν επιτυχώς τα σήματα, δημιουργούν μια εικονική πολλαπλή συστοιχία κεραιών και μεταδίδουν το σήμα στον προορισμό. Η πρακτική εφαρμογή της κατανεμημένης διαμόρφωσης δέσμης απαιτεί την κωδικοποίηση του μηνύματος της πηγής με έναν κώδικα κυκλικού ελέγχου πλεονασμού (CRC) για την ανίχνευση σφαλμάτων. Με αυτό τον τρόπο, μόνο οι αναμεταδότες που περάσουν τον έλεγχο CRC μεταδίδουν στην δεύτερη φάση. Αυτό το σχέδιο, απαιτεί τέλειο συγχρονισμό και χρονική σηματοδότηση μεταξύ των κόμβων αναμετάδοσης. Ακόμη περιλαμβάνει πληροφορίες ανατροφοδότησης από τους αναμεταδότες όπως τον συντελεστή του καναλιού g_i στον αναμεταδότη i . Η φάση εκπομπής του πρωτοκόλλου κατανεμημένης διαμόρφωσης δέσμης ακολουθεί την περιγραφή της τυχαίας επιλογής αναμεταδοτών (A) και της επιλογής αναμεταδότη με βάση την πλησιέστερη απόσταση (B) που δίνεται από τις εξισώσεις 11 έως 13.

Τα σχήματα επιλογής αναμεταδοτών που αναφέραμε πιο πάνω, έχουν διαφορετική απόδοση διακοπής λειτουργίας (outage probability) σε υψηλούς λογούς σήματος προς στο θόρυβο (SNR), τα οποία εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την κατάσταση της μπαταρίας. Σύμφωνα με ανασκόπηση βιβλιογραφίας [50], τα σχέδια της τυχαίας επιλογής αναμεταδοτών (A) και το σχέδιο της επιλογής αναμεταδότη με βάση την πλησιέστερη απόσταση (B), έχουν την χειρότερη πιθανότητα διακοπής και συγκλίνουν στα ίδια επίπεδα. Το σχέδιο της

κατανεμημένης μορφοποίησης δέσμης (E), είναι μια υποσχόμενη λύση για χαμηλά και μέτρια επίπεδα SNR. Μπορεί να δώσει καλύτερα αποτελέσματα, όμως χρειάζεται πληροφορίες κατάστασης καναλιού. Αναφορικά με τα πιο πάνω σχήματα επιλογής, μπορούν να μας δώσουν μια γενική άποψη σε τοπολογίες πολλαπλών κυψελών, όπου οι παρεμβολές πολλαπλών χρηστών επηρεάζουν την αποκωδικοποίηση των αναμεταδοτών [50].

6.5 Σύγκριση παραδοσιακών δικτύων ΣΕ με SWIPT.

Σε αυτή την ενότητα, συγκρίνουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαδικασιών συλλογής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες των παραδοσιακών δικτύων και των δικτύων τύπου SWIPT. Η συλλογή ενέργειας από ραδιοσυχνότητες παρέχει υψηλή απόδοση μεταφοράς ενέργειας, αλλά δεν παρέχει υψηλή ποιότητα υπηρεσιών. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα είναι ότι μπορούμε να έχουμε αισθητήρες οι οποίοι δεν απαιτούν εξωτερική ισχύ ή μπαταρία αφού μπορούν να τροφοδοτούνται από ενέργεια μέσω ραδιοσυχνότητων RF. Οι αισθητήρες και άλλες συσκευές που κάνουν χρήση μεθόδων συγκομιδής ενέργειας, μπορούν να ενεργοποιούνται όταν αποθηκεύεται επαρκής ενέργεια για την λειτουργία τους. Άλλο σημαντικό πλεονέκτημα της ενέργειας ραδιοσυχνότητων είναι ότι μπορεί να βρεθεί σχεδόν παντού. Έτσι η ενεργεία μπορεί να συλλεχθεί από οπουδήποτε και να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδότηση μικρών συσκευών. Γι' αυτό, η συλλογή ενέργειας μέσω ραδιοσυχνότητων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική λύση για ηλεκτρική ενέργεια, διότι είναι εφικτή και ανανεώσιμη. Ακόμη, μπορεί να αποτελέσει εναλλακτική λύση για μπαταρίες που έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής και χρειάζονται αντικατάσταση. Με την συγκομιδή RF ενέργειας δεν υπάρχει ανάγκη για μπαταρίες.

Με τις τεχνολογίες SWIPT γίνεται ενοποίηση των διαδικασιών μετάδοσης πληροφοριών και ενέργειας. Δηλαδή, ένα λαμβανόμενο σήμα μπορεί να χωριστεί σε δυο μέρη, ένα μέρος για συλλογή ενέργειας και άλλο μέρος για αποκωδικοποίηση σήματος. Ένα από τα πλεονεκτήματα των τεχνολογιών SWIPT είναι η χρήση των συστημάτων MIMO για μεγαλύτερη απόδοση. Ωστόσο, όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των κόμβων του δικτύου, τόσο ελαττώνεται η απόδοση του συστήματος.

Στον πιο κάτω πίνακα 6.1 μπορούμε να δούμε τις διαφορές μεταξύ παραδοσιακών συστημάτων συλλογής ενεργείας, με τις τεχνολογίες SWIPT. Ο πίνακας 6.1 συγκρίνει τις δυο τεχνικές ανάλογα με τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε τεχνολογίας.

	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Παραδοσιακά δίκτυα Συγκομιδής Ενέργειας	- Σχετικά ευκολά στην υλοποίηση. - Απλούστερος σχεδιασμός. - Μικρός όγκος, χαμηλό βάρος - Χαμηλό κόστος παραγωγής και υλοποίησης.	- Χαμηλή απόδοση. - Χαμηλή μέγιστη ισχύς. - Μικρό κέρδος.
SWIPT	- Μπορούν να ενσωματωθούν σε συστήματα ασύρματης επικοινωνίας.	- Χρειάζεται δύο ανεξάρτητους δέκτες

	<ul style="list-style-type: none"> - Επιτρέπει τόσο την αποκωδικοποίηση δεδομένων όσο και την αποτελεσματική συγκομιδή RF ενέργειας την ίδια στιγμή. - Η κατευθυνόμενη ενέργεια RF από τον σταθμό βάσης βελτιώνει την απόδοσή σε σύγκριση με την παραδοσιακή συγκομιδή ενεργείας. - Ιδίες ή διαφορετικές κεραιές μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για μετάδοση όσο και για λήψη σημάτων. - Επιτρέπει την πολυπλεξία πληροφορίας και ενεργείας με ελεγχόμενο τρόπο στην πηγή – σταθμό βάσης. 	<p>ενέργειας και πληροφορίας κάτι το οποίο οδηγεί σε πιο περιπλοκά κυκλώματα.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Για αυτό το λόγο, έχει μεγαλύτερο κόστος υλοποίησης. - Ορισμένες εφαρμογές μπορεί να είναι πολύ ακριβές και μη κερδοφόρες για φορητές συσκευές.
Γενικά	<ul style="list-style-type: none"> - Το σύστημα συγκομιδής ενεργείας από ραδιοσυχνότητες μπορεί να είναι πολύ μικρό. Συνήθως η μεγαλύτερη επιφάνεια του χρησιμοποιείται από την κεραιά. - Βολικά: Χωρίς καλώδια σύνδεσης και συχνή αντικατάσταση μπαταριών. - Οικονομικά αποδοτικά: Παροχή ρεύματος με απρόσκοπτη λειτουργία. - Αυτονομία : Παρέχουν ένα μικρό ποσό ενέργειας για συσκευές χαμηλής ισχύος έτσι ώστε να λειτουργούν αυτόνομα. - Φιλικά προς το περιβάλλον - Ευέλικτη ανάπτυξη : Μπορούν να εφαρμοστούν σε περιβάλλοντα με ή χωρίς οπτική επαφή. - Προσφέρουν πλεονεκτήματα έναντι άλλων τεχνικών συλλογής ενέργειας (όπως για παράδειγμα ηλιακή ή αιολική) π.χ. μπορεί να λειτουργεί σε σκοτάδι. - Παρέχουν ισχύ κατόπιν ζήτησης ακόμη και σε συνθήκες κινητικότητας. - Μπορεί να λειτουργήσει ως μια δευτερεύουσα πηγή ενώ ταξιδεύουμε. - Παρέχουν δυνατότητες παρακολούθησης. - Απαιτούν ελάχιστη συντήρηση διότι δεν έχουν κινούμενα μέρη που δεν χρειάζεται να είναι εκτεθειμένα στο περιβάλλον. - Μεγάλη περίοδος λειτουργίας. - Προσφέρουν ενεργειακή πολυεκπομπή λόγω των πολλαπλών μεταδόσεων των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. 	<ul style="list-style-type: none"> - Η συγκομιδή από το περιβάλλον μπορεί να είναι απρόβλεπτη και αρκετά ανεξέλεγκτη. - Χαμηλή απόδοση μεταφοράς ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις. - Απώλεια απόδοσης από εξασθένηση καναλιών και τυχόν διαλείψη σήματος. - Απώλειες ραδιοκυμάτων. - Δεν εγγυούνται QoS σε ασύρματες εφαρμογές λόγω αβεβαιότητας σχετικά με τον χρόνο, την τοποθεσία και τις καιρικές συνθήκες. - Περιορισμοί μεγέθους και σχήματος : Προκειμένου να παρέχεται μέγιστη ισχύς οι κεραιές μετάδοσης και λήψης πρέπει να έχουν το ίδιο σχήμα, μέγεθος και πόλωση. - Μη επαρκή ισχύς : Επί του παρόντος η συγκομιδή ενέργειας δεν παρέχει επαρκή ποσότητα ενέργειας για συστήματα αυξημένης κατανάλωσης γιατί δεν υπάρχουν τεχνολογίες που συλλέγουν ενέργεια με μεγάλη απόδοση.

Πίνακας 6.1 : Σύνοψη προκλήσεων στα συστήματα συλλογής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες.

Παρά τα μειονεκτήματά τους, οι τεχνικές συγκομιδής ενέργειας γίνονται όλο και πιο δημοφιλείς λόγω του πλεονεκτήματος του χαμηλού κόστους. Τα πλεονεκτήματά τους περιλαμβάνουν ενεργειακή αυτάρκεια, ενεργειακή αυτοτροφοδοτούμενη λειτουργία με διάρκεια ζωής που περιορίζεται μόνο από τους περιορισμούς του υλικού τους. Και οι δύο μέθοδοι συγκομιδής ενέργειας εκμεταλλεύονται την ενέργεια που είναι διαθέσιμη στο περιβάλλον και δεν έχουν ανάγκη από κάποια άλλη πηγή. Έχουν υψηλή διάρκεια ζωής και δεν απαιτείται συντήρηση, αφού τα στοιχεία είναι ενιαία, χωρίς μηχανικά μέρη. Ακόμη τα στοιχεία κυκλωμάτων συγκομιδής ενέργειας σε συστήματα τηλεπικοινωνιών είναι συμπαγές, μικρών διαστάσεων με χαμηλό βάρος. Τέλος, τα παραδοσιακά συστήματα συλλογής ενέργειας και τα συστήματα SWIPT διαθέτουν πολλά πρακτικά πλεονεκτήματα, όπως ευρύ φάσμα λειτουργιών, σχετικά χαμηλό κόστος παραγωγής, μπορούν να έχουν μικρό μέγεθος δέκτη και αποτελεσματική ενεργειακή πολευκομπίη χάρη στη φύση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

6.6 Σύνοψη

Η τεχνολογία SWIPT έχουν πολύ υποσχόμενες εφαρμογές σε διάφορους τομείς που μπορούν να επωφεληθούν συσκευές εξαιρετικά χαμηλής ισχύος. Πιθανές εφαρμογές μπορούν να περιλαμβάνουν την παρακολούθηση δομής, με την ενσωμάτωση αισθητήρων σε κτήρια, γέφυρες, δρόμους κ.λπ. Έξυπνοι αισθητήρες που τροφοδοτούνται από την συγκομιδή ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτοματισμούς κτηρίων, για να παρακολουθούν και να ελέγχουν διάφορες διαδικασίες.

Ωστόσο για την επιτυχή υλοποίηση τέτοιων εφαρμογών SWIPT πρέπει να ξεπεραστούν αρκετές προκλήσεις σε διαφορά επίπεδα από την υλοποίηση του υλικού, την ανάπτυξη πρωτοκόλλων και τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό [38].

Πλέον, η λήψη ραδιοσυχνότητας όχι μόνο μπορεί να μας παρέχει πληροφόρηση, αλλά και να δημιουργήσει ευκαιρίες συλλογής ενέργειας. Υπάρχουν προκλήσεις σχετικά με την αποτελεσματική κατανομή πόρων, αλλά απ' ό,τι έχουμε δει μέχρι τώρα η συγκομιδή ενέργειας έχει την ικανότητα να μπορεί να ενσωματωθεί σε διαφορετικούς τύπους δικτύων για να παρέχει ευκαιρίες βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης.

Στα πιο πάνω κεφάλαια αναφέραμε τεχνικές καθώς και σχεδιαστικές αρχές στα δίκτυα συγκομιδής ενέργειας. Η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ συσκευών δικτύου μέσω μετάδοσης (εκπομπής) απαιτείται κατά τη διάρκεια της επιλογής διαδρομής. Λόγω περιορισμών, οι συσκευές δικτύου δεν μπορούν να συλλέξουν ενέργεια RF από το ίδιο φέρον σήμα που χρησιμοποιείται για αποκωδικοποίηση πληροφοριών. Ως αποτέλεσμα, οι συσκευές δικτύου που λειτουργούν σε λειτουργία συγκομιδής RF ενδέχεται να χάσουν τις πληροφορίες εκπομπής. Έτσι, απαιτείται ένας αποτελεσματικός μηχανισμός μετάδοσης 'μηνυμάτων' στη αρχιτεκτονική του δέκτη που βασίζεται σε χρονική μετάβαση για τα πρωτόκολλα δρομολόγησης. Τα συστήματα συγκομιδής ενέργειας που λειτουργούν στην ζώνη ISM (π.χ. WiFi) ενδέχεται να χρειάζονται αποτελεσματικούς μηχανισμούς κατανομής ραδιοφάσματος ο οποίος να συντονίζει την επικοινωνία και τη φόρτιση. Λαμβάνοντας υπόψη τα στατιστικά

στοιχεία του καναλιού και τις απαιτήσεις ποιότητας της υπηρεσίας όσον αφορά τη μεταφορά ενέργειας, η αλληλουχία εναλλαγής και το σήμα μετάδοσης μπορούν να βελτιστοποιηθούν από κοινού για διαφορετικούς στόχους σχεδιασμού των συστημάτων [47].

Η ενσωμάτωση των τεχνικών συγκομιδής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες φέρνει νέα ερευνητικά ζητήματα, όπως είναι η διαχείριση του ραδιοφάσματος σε γνωστικά δίκτυα που τροφοδοτούνται με συγκομιδή ραδιοσυχνότητων και τον απαραίτητο ανασχεδιασμό των πρωτοκόλλων MAC και δρομολόγησης. Οι τεχνολογίες SWIPT έχουν πολλά υποσχόμενες εφαρμογές σε διάφορους τομείς, από τους οποίους μπορεί να επωφεληθούν συσκευές εξαιρετικά χαμηλής ισχύος. Ωστόσο, για την επιτυχή υλοποίηση τέτοιων εφαρμογών SWIPT, πρέπει να ξεπεραστούν διάφορες προκλήσεις σε διάφορα επίπεδα [38]. Με βάση τα πιο παραπάνω καθώς και μελέτη βιβλιογραφικών αναφορών καταλήγουμε στις γενικές προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν αναφορικά με τις τεχνικές συλλογής ενέργειας, που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια. Αν και έχουμε αναφέρει τις γενικές προκλήσεις των δικτύων συλλογής ενέργειας, πιο κάτω θα επικεντρωθούμε στα ανοικτά θέματα στα δίκτυα συλλογής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες στις τεχνολογίες SWIPT. Ακόμη, θα αναφέρουμε τα ζητήματα που δημιουργούνται από την συγκομιδή ενέργειας μέσω κυψελωτών δικτύων και αισθητήρων γνωστικών δικτύων. Τέλος, θα συνοψίσουμε τις προκλήσεις στα συστήματα συλλογής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες.

6.6.1 Γενικές προκλήσεις δικτύων συλλογής ενέργειας.

Αρκετές έρευνες έχουν γίνει για τα δίκτυα συλλογής ενέργειας όμως είναι ακόμη σε πειραματικά στάδια. Σε προηγούμενα κεφάλαια, είδαμε τους περιορισμούς που θέτουν οι εφαρμογές (υλοποιήσεις) τους. Πιο κάτω παρουσιάζουμε τις γενικές προκλήσεις σχετικά με την ανάπτυξη και το σχεδιασμό των δικτύων συλλογής ενέργειας, ανεξάρτητα από την μορφή ενέργειας που χρησιμοποιείται.

- Διαχείριση παρεμβολών : Οι μέχρι τώρα υπάρχουσες τεχνικές διαχείρισης των παρεμβολών υιοθετούν μηχανισμούς αποφυγής (ή αντιμετώπισης) παρεμβολών μέσω προγραμματισμού του φάσματος. Ωστόσο, στα συστήματα SWIPT οι επιβλαβείς παρεμβολές μπορούν να 'μετατραπούν' σε χρήσιμη πηγή ενέργειας. Για αυτό το λόγο, είναι προτεινόμενη η χρήση μονάδας διαχείρισης της ενέργειας που θα ελέγχει τις παρεμβολές από τα γειτονικά κανάλια επικοινωνίας, έχοντας στόχο τη βελτίωση της απόδοσης στη συλλογή ενέργειας.
- Ελάχιστος δυνατός ρυθμός συλλογής ενέργειας : Για την σωστή λειτουργία ενός δικτύου Energy Harvesting απαιτείται ένας ελάχιστος ρυθμός συλλογής ενέργειας. Γι' αυτό ένα κατώτερο κατώφλι ρυθμού είναι απαραίτητο (αναγκαίο) είτε για συνεχή είτε για διακοπτόμενη λειτουργία του δικτύου.
- Διακυμάνσεις ενέργειας σε multi-hop επικοινωνίες : Οι τυχόν διακυμάνσεις της ενέργειας μπορούν να οδηγούν σε απρόβλεπτες τιμές στις μεταβλητές ενός συστήματος. Με αποτέλεσμα, οι εφαρμογές επικοινωνιακών δικτύων με πολλαπλούς κόμβους (multi-hop) στα δίκτυα συλλογής ενέργειας να καθίσταται εξαιρετικά

δύσκολες. Αυτό το φαινόμενο γίνεται όλο και πιο έντονο σε συσκευές μικρού μεγέθους όπως σε εφαρμογές με χαμηλή απαίτηση ισχύος [51].

- Χωρητικότητα καναλιού : Η χωρητικότητα καναλιών που περιέχουν πομπούς συλλογής ενέργειας είναι γνωστή ως AWGN (Additive White Gaussian Noise). Για αυτό το λόγο, η μελέτη της χωρητικότητας καναλιού σε κανάλια με θόρυβο και με περιορισμένο μέγεθος μπαταριών είναι υποχρεωτική.

6.6.2 Προκλήσεις δικτύων συλλογής ενέργειας.

Σε συνέχεια της ενότητας 5.8 αναφέρουμε ακόμη μερικές γενικές προκλήσεις στην συλλογή ενέργειας από ραδιοσυχνότητες.

- Κατασκευή κεραιών : Ο ρυθμός συλλογής ενέργειας επηρεάζεται άμεσα από την απολαβή και την κατευθυντικότητα των κεραιών. Χρειάζεται υψηλή απολαβή κεραιών για ευρύ φάσμα συχνοτήτων με σκοπό να βελτιωθεί η απόδοση της συλλογής ενέργειας.
- Διάταξη κεραιών : Η διάταξη πολλαπλών κεραιών μπορεί να βελτιώσει την απόδοση μετάδοσης όταν η ισχύς μετάδοσης των κεραιών είναι χαμηλή. Όμως, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κεραιών που χρησιμοποιούνται, αυξάνεται η κατανάλωση ενέργειας. Η αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας όμως οδηγεί στη μείωση της απόδοσης μετάδοσης. Για αυτό χρειάζεται ένα σχήμα βελτιστοποίησης της σχέσης μεταξύ κατανάλωσης ενέργειας και απόδοσης μετάδοσης. Το πρόβλημα αυτό γίνεται ακόμη πιο περίπλοκο σε δυναμικά περιβάλλοντα όπου οι ρυθμοί συλλογής ενέργειας ποικίλλουν.
- Ασφάλεια : Γενικά οι δέκτες που τοποθετούνται σε κοντινή απόσταση από τον πομπό προγραμματίζονται για συλλογή ενέργειας. Ωστόσο, υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου δέκτες ενέργειας μπορούν να υποκλέπτουν μηνύματα που προορίζονται σε δέκτες πληροφορίας. Το πρόβλημα των κοντινών αποστάσεων οδηγεί σε προβλήματα ασφάλειας σε φυσικό επίπεδο με βάση τους περιορισμούς της συλλογής ενέργειας, της ασφάλειας στη μετάδοση πληροφοριών και του QoS. Γι' αυτό το λόγο χρειάζονται νέα πρωτόκολλα μετάδοσης που να αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της ασφάλειας, όπως είναι η εισαγωγή τεχνητού θορύβου στα μεταδιδόμενα σήματα ή η αποστολή επιπλέον σημάτων παρεμβολών [51].

6.6.3 Προκλήσεις δικτύων συλλογής ενέργειας με τεχνολογίες SWIPT.

Από την μελέτη βιβλιογραφιών σχετικά με την τεχνολογία SWIPT σε συνεργατικά δίκτυα συλλογής ενέργειας, που αναφέρθηκαν στην ενότητα 6.4.5 παρουσιάζουμε τις ακόλουθες προκλήσεις:

- Δυσκολίες υλικών συστημάτων : Υπάρχει μεγάλος αριθμός προτάσεων και θεωριών για εφαρμογές της τεχνολογίας SWIPT, όμως στην πράξη αντιμετωπίζονται πολλές δυσκολίες υλοποίησης στα απαραίτητα κυκλώματα. Για παράδειγμα, η μεταγωγή χρόνου δεν είναι τόσο αποδοτική όσο ο διαχωρισμός ισχύος. Ακόμη οι διεργασίες που

γίνονται για τον διαχωρισμό ισχύος έχουν μεγάλες απώλειες από την διάσπαση της ισχύος [51].

- Ασφάλεια επικοινωνίας και μετάδοσης ενέργειας : Οι πομποί (μεταδότες) μπορούν να αυξήσουν την ενέργεια μετάδοσης με την πρόσθεση ενός σήματος ενέργειας, που έχει ως στόχο τη διευκόλυνση της συλλογής ενέργειας από τους δέκτες. Με αυτό τον τρόπο, όμως, μπορούν να γίνουν πιο επιρρεπείς σε κακόβουλους κόμβους που έχουν δυνατότητες να λαμβάνουν πληροφορίες. Γι' αυτό το λόγο παρατηρείται αυτή η συγκεκριμένη πρόκληση όσο αφορά την ποιότητα υπηρεσιών, την ασφάλεια επικοινωνίας και ενέργειας στα συστήματα με SWIPT [51].
- Απώλειες διαδρομής : Όταν η μετάδοση γίνεται σε μακρινές αποστάσεις, η απόδοση της τεχνολογίας SWIPT είναι χαμηλή. Όμως, η απόδοση του συστήματος μπορεί να βελτιωθεί όταν χρησιμοποιείται σύγχρονη τεχνολογία διάταξης κεραιών και ταυτόχρονα κάποιο εξελιγμένο σύστημα κατανομής πόρων. Για παράδειγμα, η χρήση συντονισμένης μετάδοσης πολλαπλών σημείων των συστημάτων massive MIMO μπορούν να μειώσουν τις απώλειες μονοπατιού. Τα συστήματα massive MIMO, όπως αυτά που αναφέραμε στο κεφάλαιο 4.3.3, ενισχύουν την κατευθυντικότητα μεταξύ των κεραιών λήψης και μετάδοσης. Ακόμη, μέσω της συντονισμένης μετάδοσης πολλαπλών σημείων είναι δυνατή η μετάδοση με χωρική διαφορικότητα, κάτι το οποίο εξαλείφει τις απώλειες μονοπατιού, μειώνοντας την απόσταση κόμβων μετάδοσης και κόμβων λήψης [51].

6.6.4 Προκλήσεις δικτύων συλλογής ενέργειας από γνωσιακά δίκτυα

Στην ενότητα 6.3.2 αναφερθήκαμε στα γνωσιακά δίκτυα (CRN - cognitive radio networks). Οι προκλήσεις συλλογής ενέργειας από αισθητήρες γνωστικών δικτύων με βάση τα επίπεδα επικοινωνίας είναι οι παρακάτω:

- Φυσικό επίπεδο : Για να μπορούν να αντιμετωπιστούν τα διάφορα χαρακτηριστικά των αισθητήρων γνωστικών δικτύων στα χρονικά και χωρικά επίπεδα, πρέπει το φυσικό επίπεδο τους (physical layer) να είναι παραμετροποιήσιμο ως προς την συχνότητα λειτουργίας, τη διαμόρφωση και την κωδικοποίηση καναλιού, την ισχύ μετάδοσης και τη διάρκεια ανίχνευσης φάσματος. Ακόμη, οι αισθητήρες γνωστικών δικτύων πρέπει να παρέχουν στατιστικές πληροφορίες για τις συνθήκες του καναλιού, με σκοπό την ενδυνάμωση της φασματικής γνώσης (spectrum-awareness) λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς των αισθητήρων.
- Επίπεδο ζεύξης και έλεγχος λαθών : Εξαιτίας της δυναμικής χρήσης του φάσματος και της δυνατότητας πρόσβασης πολλαπλών καναλιών, κάποιοι μηχανισμοί όπως αυτός του FEC (Forward Error Correction) δεν δίνουν αποδοτικά αποτελέσματα. Αυτό το γεγονός συμβαίνει γιατί ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά στους μηχανισμούς FEC είναι το ότι ο αποστολέας προσθέτει επιπλέον πληροφορία στα μηνύματα. Αναπόφευκτα, η υλοποίηση αυτού του είδους μηχανισμών μπορούν να προκαλέσουν μία σταθερή επιβάρυνση στον όγκο των μεταδιδόμενων δεδομένων και για αυτό είναι απαιτητικοί υπολογιστική ισχύ. Ωστόσο, οι υβριδικοί μηχανισμοί ARQ (Automatic

Repeat Request) μπορούν να βοηθήσουν στην ανάκτηση πακέτων. Οι κόμβοι μπορούν να κρατήσουν τις πληροφορίες που λαμβάνουν, ακόμα και αν δεν είναι ο τελικός τους προορισμός και στην συνέχεια μπορούν να μεταδώσουν τις ίδιες πληροφορίες σύμφωνα με τους μηχανισμούς ARQ. Για αυτό το λόγο, είναι ανάγκη να ερευνηθούν επιπλέον οι μηχανισμοί των FEC, ARQ και υβριδικού ARQ σχετικά με την παροχή μέγιστης ενέργειας και τη μεταπομπή φάσματος (spectrum handoff) [51].

- Επίπεδο ζεύξης και πρωτόκολλα MAC : Σε συστήματα συγκομιδής ενέργειας είναι αναγκαίος ο σχεδιασμός νέων πρωτοκόλλων MAC. Ακόμη πρέπει να εξαιρεφτεί η χωρική συσχέτιση του φαινομένου ανίχνευσης, το φαινόμενο των παρεμβολών λόγω πυκνής σύνδεσης κόμβων και οι περιορισμοί για την απόδοση ενέργειας [51].
- Επίπεδο μεταφοράς : Ο έλεγχος της συμφόρησης (congestion control) και η αξιοπιστία είναι από τους κύριους στόχους στα επίπεδα μεταφοράς ενός κόμβου. Ο έλεγχος ρυθμού αποστολής και λήψης με βάση τη διάρκεια ανίχνευσης φάσματος σε σχέση με τα ποικίλα χαρακτηριστικά του φάσματος μπορούν να επιτύχουν ικανοποιητική αξιοπιστία. Σκοπός των πρωτοκόλλων αυτών δεν είναι η μεγιστοποίηση του ρυθμού και η μεγιστοποίηση χρήσης του φάσματος, αλλά η μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας και η επίλυση των τυχών συμφορήσεων στο κανάλι. Επιπρόσθετα, σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου (real time), είναι απαραίτητη η ύπαρξη κάποιων συγκεκριμένων πρωτοκόλλων που μπορούν να ελαχιστοποιούν τις καθυστερήσεις. Ένας ακόμα σκοπός του ελέγχου στον ρυθμό (αποστολής και λήψης), είναι η επιλογή του ιδανικού ρυθμού έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι καθυστερήσεις μεταξύ αποστολέα και δέκτη [51].
- Επίπεδο δικτύου : Ένας ιδανικός μηχανισμός αντιμετώπισης παρεμβολών στο επίπεδο δικτύου μπορεί να είναι ένας αλγόριθμος δρομολόγησης ενέργειας μέσω πολλαπλών μονοπατιών με γνώση φάσματος. Αυτός ο αλγόριθμος μπορεί να οδηγήσει στη μέγιστη απόδοση χρήσης του φάσματος με ελάχιστη καθυστέρηση διαδρομής [60].

6.6.5 Σύνοψη γενικών προκλήσεων σε συστήματα συλλογής ενέργειας

Μερικά από τα ζητήματα που προκύπτουν στον σχεδιασμό των δικτύων ασύρματης συγκομιδής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες είναι τα ακόλουθα :

1. Επίπεδο κυκλωμάτων: Κεραία, προσαρμογή δικτύου, ανορθωτής, αρχιτεκτονική δέκτη.
2. Σε δίκτυα single-hop με δυνατότητες συγκομιδής ενέργειας ραδιοσυχνότητων: Χρονοπρογραμματισμός πολλαπλών χρηστών και πολιτικές λειτουργίας του δέκτη.
3. Σε δίκτυα πολλαπλών κεραίων με δυνατότητες συγκομιδής ενέργειας ραδιοσυχνότητων: SWIPT, βελτιστοποίηση καναλιών, διαμόρφωση δέσμης ενέργειας (beamforming), ανάδραση πληροφοριών.
4. Σε δίκτυα αναμεταδοτών (relays) με δυνατότητες συγκομιδής ενέργειας ραδιοσυχνότητων: Πολιτικές λειτουργίας αναμεταδότη, επιλογή αναμεταδοτών και κατανομή ισχύος.
5. Γνωσιακά δίκτυα ραδιοεπικοινωνιών : ανίχνευση φάσματος, πρόσβαση και διαχείριση φάσματος, μεταβίβαση φάσματος handoff.
6. Πρωτόκολλα επικοινωνιών : πρωτόκολλα δρομολόγησης και πρωτόκολλα MAC.

Η ασύρματη συγκομιδή ενέργειας σε περιπτώσεις πολλαπλών ζωνών περιπλέκει τις απαιτήσεις του συστήματος όσο αφορά τη γεωμετρία των κεραιών και απαιτεί εξελιγμένους μετατροπείς ισχύος. Έτσι, η συγκομιδή ενέργειας σε δίκτυα αισθητήρων γίνεται σε ασύρματες πηγές που μπορούν να προσφέρουν προβλέψιμη ενέργεια, όπως θα δούμε πιο κάτω. Το κλειδί για τη συλλογή ενέργειας βρίσκεται στον αποδοτικό σχεδιασμό του μετατροπέα RF-to-DC, γι' αυτό η ασύρματη συγκομιδή ενέργειας είναι συνήθως βελτιστοποιημένη για μια πηγή ενέργειας (Dedicated source - sink mode) και επιτρέπει τη συγκομιδή ενέργειας από το περιβάλλον ή από μια βοηθητική πηγή [22].

Στον πιο κάτω πίνακα 6.2 συνοψίζουμε τις γενικές προκλήσεις των δικτύων συλλογής ενέργειας καθώς και τις βασικές προκλήσεις των διαδικασιών συλλογής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες, μέσω τεχνολογιών SWIPT και από αισθητήρες γνωσιακών δικτύων. Η συλλογή ενέργειας από αισθητήρες γνωσιακών δικτύων επιτρέπει την πολλαπλή πρόσβαση καναλιών, τη χρήση καναλιών πολλαπλής διανομής και τη δυναμική χρήση του φάσματος. Όμως, για είναι εφικτή υλοποίηση τους χρειάζεται υψηλός όγκος δεδομένων με αποτέλεσμα η απόδοση των συστημάτων να είναι μειωμένη. Η συλλογή ενέργειας από τα μελλοντικά κυψελωτά δίκτυα 5^{ης} γενιάς μπορεί να μας παρέχει μεγαλύτερες ταχύτητες επικοινωνίας με μικρότερες απαιτήσεις ενέργειας λόγω ύπαρξης μικρών κελιών μικρότερης ισχύος. Όμως λόγω της μικρότερης εμβέλειας των σταθμών βάσης οι απώλειες διαδρομής αυξάνονται και η εμβέλεια ελαττώνεται [51].

Formatted: Greek

Γενικές προκλήσεις	<p>Διαχείριση παρεμβολών</p> <p>Χωρητικότητα καναλιού σε κανάλια με θόρυβο</p> <p>Δύσκολη εφαρμογή των multi-hop επικοινωνιών</p> <p>Απαιτήσεις ελάχιστου ρυθμού συλλογής ενέργειας</p>
Προκλήσεις συλλογής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες	<p>Ευαισθησία δέκτη</p> <p>Διάταξη πολλαπλών κεραιών</p> <p>Επιλογή πηγών ενέργειας</p> <p>Πρωτόκολλα για θέματα ασφάλειας</p> <p>Κινητικότητα κόμβων</p>
Προκλήσεις συλλογής ενέργειας μέσω τεχνολογιών SWIPT	<p>Μεγάλες απώλειες διαδρομής σε μακρινές αποστάσεις</p> <p>Πρωτόκολλα για θέματα ασφάλειας</p> <p>Μεγάλες απώλειες από τις διεργασίες διαχωρισμού ισχύος</p>
Προκλήσεις συλλογής ενέργειας από αισθητήρες γνωσιακών δικτύων	<p>Ανάγκη για νέα πρωτόκολλα MAC και μηχανισμούς FEC - ARQ</p> <p>Πρωτόκολλα για δρομολόγηση ενέργειας μέσω πολλαπλών μονοπατιών</p> <p>Έλεγχος συμφόρησης και αξιοπιστίας</p>

Πίνακας 6.2 : Σύνοψη προκλήσεων στα συστήματα συλλογής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες.

Κεφάλαιο 7

Επίλογος

7.1 Σχετικά

Η παρούσα διατριβή ασχολήθηκε με ένα ξεχωριστό κλάδο των τηλεπικοινωνιών. Συγκεκριμένα παρουσιάστηκαν οι τεχνικές συλλογής ενέργειας σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Για την εξαγωγή συμπερασμάτων, η παρούσα διατριβή έχει μελετήσει και εξετάσει πρόσφατες βιβλιογραφίες, αναφορικά με τον τομέα των ασυρμάτων δικτύων και των τεχνολογιών συγκομιδής ενέργειας, ώστε να καταγράψει τις αρχές καθώς και τα προβλήματα.. Το πρώτο μέρος της διατριβής (Κεφ.1) ασχολήθηκε με τον σκοπό και αναγκαιότητα της παρούσας έρευνας. Το δεύτερο κεφάλαιο κάνει μια επισκόπηση των πηγών συγκομιδής ενέργειας, ενώ το τρίτο κεφάλαιο δίνει το τεχνολογικό υπόβαθρο συγκομιδής ενέργειας. Ακόμη το τρίτο κεφάλαιο κάνει μια εισαγωγή στο IoT, τις εφαρμογές του καθώς και γενικές αρχές σχεδίασης συστημάτων συγκομιδής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες. Στο 4ο κεφάλαιο παρουσιάζεται επισκόπηση και ανάλυση των δικτύων 5^{ης} γενιάς, καθώς και τις τεχνικές που καθιστούν δυνατή την νέα επερχόμενη γενιά ασύρματων δικτύων. Με την ραγδαία ανάπτυξη των συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας και ειδικά των δικτύων 5ης γενιάς θα υπάρχουν

περισσότερες πηγές προς εκμετάλλευση και συγκομιδή. Τα δίκτυα 5ης γενιάς προϋποθέτουν πιο πυκνό περιβάλλον ανάπτυξης (περισσότερους πομποδέκτες - κεραιές) έτσι, ώστε να παρέχουν τις υπηρεσίες τους. Έτσι, με περισσότερους πομποδέκτες σε κάθε περιοχή, σε μελλοντικά δίκτυα, θα μπορούμε να αναπτύξουμε συστήματα συλλογής ενέργειας με μεγαλύτερη ευκολία.

Στο κεφάλαιο 5 έγινε μια επισκόπηση των δικτύων RF-EHNs με έμφαση στην αρχιτεκτονική συστημάτων. Παρουσιάστηκαν οι κατηγορίες πηγών ενέργειας RF, οι τεχνικές συγκομιδής, μελλοντικές τάσεις, ερευνητικές – πρακτικές προκλήσεις και οι υπάρχουσες υλοποιήσεις. Ακόμη, στο 5ο κεφάλαιο γίνεται μια μοντελοποίηση ενός συστήματος SWIPT.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα είδη δικτύων συλλογής ενέργειας, τα δίκτυα αναμεταδοτών. Ακόμη, στο 6ο κεφάλαιο γίνεται μια σύγκριση μεταξύ παραδοσιακών δικτύων συγκομιδής ενέργειας με δίκτυα SWIPT και παρουσιάζονται όλες οι προκλήσεις των δικτύων συλλογής ενέργειας. Το κεφάλαιο 7 κλείνει την παρούσα έρευνα.

7.2 Συμβολή τις διατριβής

Με την παρούσα διατριβή παρουσιάσαμε τις τεχνολογικές δυνατότητες και προκλήσεις της συλλογής ενέργειας και των εφαρμογών της σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Το θέμα της διατριβής είναι εφικτό και συγκεκριμένο και αποτελεί δυναμικό συνδυασμό ακαδημαϊκής σημαντικότητας και πρακτικού ενδιαφέροντος. Είναι μια ανασκόπησή από υπάρχουσες βιβλιογραφίες και συλλογή δεδομένων από προσομοιώσεις προκειμένου να οδηγηθούμε σε μια αποτύπωση των ερευνητικών ζητημάτων της περιοχής. Έχουν δοθεί ορισμένες κατευθυντήριες γραμμές για το σχεδιασμό και λειτουργία ασυρμάτων δικτύων συλλογής ενέργειας. Έχουμε συζητήσει τις προκλήσεις και τις κατευθύνσεις των τεχνικών συγκομιδής ενέργειας, οι οποίες σε μελλοντικά δίκτυα, μπορούν να μας βοηθήσουν να σχεδιάσουμε καλύτερα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών.

7.3 Συμπεράσματα και μελλοντικές προεκτάσεις

Σε μια διπλωματική εργασία δεν είναι εφικτή η πλήρης μελέτη ενός αντικείμενου τόσο για χρονικούς λόγους όσο και εξαιτίας του εύρους του. Για το λόγο αυτό, η παρούσα εργασία θεωρείται η αρχή για περαιτέρω μελέτη και ανάλυση του συγκεκριμένου αντικείμενου που είναι οι τεχνικές συλλογής ενέργειας και η ταυτόχρονη ασύρματη μεταφορά πληροφορίας και ισχύος. Αρχικά σε αυτή την εργασία παρουσιάστηκαν και αναλυθήκαν οι διάφορες τεχνικές συλλογής ενέργειας και οι εφαρμογές τους σε συστήματα τηλεπικοινωνιών. Τα συστήματα ταυτόχρονης ασύρματης μετάδοσης διαθέτουν δύο επιμέρους δέκτες, ένα για την συλλογή και αποθήκευση ενέργειας και ένα για την επεξεργασία και την αποκωδικοποίηση πληροφοριών που περιέχεται στο λαμβανόμενο σήμα. Στην πλειοψηφία της η βιβλιογραφία πάνω σε αυτό το αντικείμενο παρουσιάζει τους δύο επιμέρους δέκτες ως ανεξάρτητους. Αυτό το γεγονός όμως,

καθορίζει ότι η μετατροπή του σήματος από την ζώνη ραδιοσυχνοτήτων στη βασική ζώνη, που πραγματοποιείται σε ένα ανεξάρτητο δέκτη πληροφορίας, είναι ανάλογη της μετατροπής του σήματος ισχύος από τη ζώνη ραδιοσυχνοτήτων σε συνεχές ρεύμα, που πραγματοποιείται στον δέκτη ενεργείας, μπορεί να επιτρέψει την χρήση ενός δέκτη με ενσωματωμένους και τους δύο επιμέρους δέκτες. Με αυτό το τρόπο μπορεί να μειωθεί σημαντικά η πολυπλοκότητα του συστήματος και να πετύχει εξοικονόμηση ενέργειας στην αποκωδικοποίηση της πληροφορίας. Ακόμη, το SWIPT προσφέρει υψηλότερη ενεργειακή απόδοση σε σύγκριση με την συμβατική μετάδοση πληροφοριών.

Τα συστήματα με αναμεταδότες που αναφέρθηκαν στην ενότητα 6.4, μπορούν να έχουν θετική επίδραση σε παραδοσιακά συστήματα και SWIPT. Όμως, η επιλογή αναμεταδότη καθώς και τα πρωτόκολλα - αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται είναι σημαντικά γιατί παίζουν μεγάλο ρόλο στις επιδόσεις, στην συνολική απόδοση και στην διάρκεια ζωής του δικτύου. Σε συστήματα με αναμεταδότες, όσο λιγότεροι είναι οι κομβίοι (δέκτες) τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας. Ακόμη η επιλογή αλγορίθμων είναι κρίσιμη σε αυτά τα συστήματα, καθώς ένας αλγόριθμος μπορεί να παρουσιάζει μικρότερη πιθανότητα από ένα άλλο αλγόριθμο. Από βιβλιογραφίες φαίνεται ότι το ίδιο ισχύει σε συστήματα multicasting με τα broadcasting.

Η συλλογή ενεργείας σε συνδυασμό με τις τεχνολογίες SWIPT είναι μια ενδιαφέρουσα πρόταση έτσι ώστε να αυξηθεί η αυτονομία τηλεπικοινωνιακών συσκευών. Αυτός ο συνδυασμός μπορεί να προσφέρει αυξημένες δυνατότητες επικοινωνίας, βελτίωση της απόδοσης και αύξηση της αυτονομίας των συστημάτων, όμως είναι εμφανής η ύπαρξη ορισμένων ζητημάτων για μελλοντική μελέτη. Νέα πρωτοκολλά και νέες επερχόμενες τεχνολογίες μπορούν να φέρουν βελτιώσεις στα συστήματα ταυτόχρονης ασύρματης μεταφοράς πληροφορίας και ισχύος, όμως αποτελούν αντικείμενο έρευνας και ανάλυσης, ειδικά σε νέες και υφιστάμενες ζώνες συχνοτήτων.

Βιβλιογραφία

1. System on chip https://en.wikipedia.org/wiki/System_on_a_chip
2. Systems on a Chip (SOCs) as Fast As Possible <http://y2u.be/L4XemL7t6hg>
3. A Survey of Recent Work on Energy Harvesting Networks
4. Energy harvesting https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_harvesting
5. Energy Harvesting http://eu.mouser.com/applications/energy_harvesting/ Σχήμα 1.0
6. New Applications for Energy Harvesting <http://eu.mouser.com/applications/energy-harvesting-new-applications/>

7. Competitive Analysis of Energy Harvesting, Wireless Communication Systems, Jesus Gomez-Vilardebo, Centre Technologic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC), Deniz Gunduz, Imperial College London
8. Διαδικασίες διαπομπής σε Ασύρματα δίκτυα με χρήση πληροφορίας θέσης, Αντωνίου Ευθυμίου Μαρκόπουλου 2005, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.
9. Everything You Need to Know About 5G <https://tinyurl.com/hbd4m3h>
10. Millimeter Waves Will Expand The Wireless Future <https://tinyurl.com/pmhcwz>
11. Small cell https://en.wikipedia.org/wiki/Small_cell
12. What Is MIMO? <https://tinyurl.com/jepptkj>
13. What is beamforming ? <https://tinyurl.com/hfz5sz2>
14. Energy Harvesting: Is There No Free Lunch? <https://tinyurl.com/h3y2lt6>
15. Introduction to Energy Harvesting Technology <https://tinyurl.com/jtkwj7h>
16. What is the Internet of Things (IoT)? <https://tinyurl.com/ku62b64>
17. Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications, Sujesha Sudevalayam and Purushottam Kulkarni, IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 13, NO. 3, Q3 2011, 443
18. Cisco: Νέα πλατφόρμα λειτουργιών IoT για επιχειρήσεις <https://techblog.gr/b2b/cisco-new-iot-platform-1236/>
19. Internet of Things (IoT) και τεχνητή νοημοσύνη www.gadgetocosmos.com/iot/iot-artificial-intelligence
20. Οι μορφές της Ενέργειας <https://www.slideshare.net/georgechrist10/ss-53991446>
21. Αιολική ενέργεια <https://tinyurl.com/ycn6ab3u>
22. P. Kamalinejad, C. Mahapatra, Z. Sheng, S. Mirabbasi, V. C. M. Leung, and Y. L. Guan, "Wireless energy harvesting for the Internet of Things," IEEE Commun. Mag., vol. 53, no. 6, pp. 102–108, 2015.
23. How to use RF Energy Harvesting for Wireless Charging <http://tinyurl.com/ybk7xvz8>
24. Θερμοηλεκτρικά Υλικά <http://slideplayer.gr/slide/1962598/>
25. RF Energy Harvesting: Batteries Not Included <https://tinyurl.com/ya9dcb26>
26. Pervasive RF Energy Offers Ready Power Source <https://tinyurl.com/ybzhvyop>

27. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα φωτοβολταϊκών συστημάτων <https://tinyurl.com/yaxuy8yl>
28. Ανεμογεννήτριες <https://tinyurl.com/y78oflijy>
29. Εφαρμογή της τεχνολογίας Internet of Things για διαχείριση Υδάτινων Πόρων, Φώτιος Κατριβέτσος, Μεταπτυχιακή Διατριβή στα Πληροφορικά Συστήματα ΑΠΚΥ 2014
30. Pickup (music technology) <https://tinyurl.com/yckrrlg4>
31. Optimisation of Energy Efficiency on MAC Layer in Wireless Sensor Networks, Ana Koren, Department of Wireless Communications Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb
32. More than 5B people use mobile devices <https://tinyurl.com/y92bzman>
33. 5G Bytes: Beamforming Explained <https://tinyurl.com/ybeuret2>
34. Powerharvester receivers <https://tinyurl.com/ybu75yc5>
35. Received signal strength indication <https://tinyurl.com/zlaqlz9>
36. What is the minimum RSSI needed for 3G or LTE? <https://tinyurl.com/kndztf9>
37. The art of powering wearable electronics <https://tinyurl.com/y8292rpm>
38. I. Krikidis, S. Timotheou, S. Nikolaou, G. Zheng, D. W. K. Ng, and R. Schober, "Simultaneous Wireless Information and Power Transfer in modern communication systems," IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 11, pp. 104–110, 2014.
39. Συλλογή ενέργειας και αισθητήρες για κόμβους οπισθοσκέδασης <http://dias.library.tuc.gr/view/22651>
40. S. Bi, C. K. Ho, and R. Zhang, "Wireless powered communication: Opportunities and challenges," IEEE Commun. Mag., vol. 53, no. 4, pp. 117–125, 2015.
41. PWST and High Function RFID <https://www.slideshare.net/Powercast/presentations>
42. R. S. Lakshmi, "RF Energy Harvesting for Wireless Devices", International Journal of Engineering Research and Development vol. 11, no. 4, pp. 39–52, 2015.
43. Ασύρματα δίκτυα 2.4 & 5 GHz <https://tinyurl.com/y6w44hb5>
44. S. Bi, C. K. Ho, and R. Zhang, "Wireless powered communication: Opportunities and challenges," IEEE Commun. Mag., vol. 53, no. 4, pp. 117–125, 2015
45. Cognitive radio https://en.wikipedia.org/wiki/Cognitive_radio
46. Robert W. Heath Jr., Where are the Relay Capacity Gains in Cellular Systems

Field Code Changed

Field Code Changed

47. Z. Ding et al., "Application of smart antenna technologies in simultaneous wireless information and power transfer," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 4, pp. 86–93, 2015.
48. I. Krikidis et al., "A Low Complexity Antenna Switching for Joint Wireless Information and Energy Transfer in MIMO Relay Channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 5, May 2014, pp. 1577–87.
49. I. Krikidis, "Simultaneous information and energy transfer in large-scale networks with/without relaying," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 3, pp. 900–912, 2014.
50. I. Krikidis, "Relay Selection in Wireless Powered Cooperative Networks with Energy Storage," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 12, pp. 2596–2610, 2015.
51. Δίκτυα Συλλογής Ενέργειας από το (Ράδιο-) Περιβάλλον : Βασικές Αρχές , Υπάρχουσες Τεχνικές και Ανοιχτές Προκλήσεις, 2015. Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
52. D. Niyato, E. Hossain, and A. Fallahi, Sleep and Wakeup Strategies in Solar-Powered Wireless Sensor/Mesh Networks: Performance Analysis and Optimization, *IEEE Trans. Mobile Comput.*, Feb. 2007.
53. X. Huang et al., On Green Energy Powered Cognitive Radio Networks, *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, May 2014.
54. B. Koo and D. Park, Interference Alignment and Wireless Energy Transfer via Antenna Selection, *IEEE Commun. Lett.*, Apr. 2014.
55. A. Ikhlef, Optimal MIMO Multicast Transceiver Design for Simultaneous Information and Power Transfer, *IEEE Commun. Lett.*, Dec. 2014
56. X. Lu., Wireless Networks with RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey, *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, Nov. 2014. 57. R. Zhang and C. K. Ho, MIMO Broadcasting for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, May 2013.
58. S. De and R. Singhal, Toward Uninterrupted Operation of Wireless Sensor Networks, *IEEE Computer Mag.*, Sep. 2012.
59. L. Xiao et al., Dynamic Spectrum Access in Cognitive Radio Networks with RF Energy Harvesting, *IEEE Wireless Commun.*, June 2014.
60. A. O. Bicen, Spectrum-Aware and Cognitive Sensor Networks for Smart Grid Applications, *IEEE Wireless Commun.*, May 2012.
61. Σχήμα 6.8 <http://www.hindawi.com/journals/tswj/2014/815720/>
62. Texas Instruments Energy Harvesting & Solar Charging <http://tinyurl.com/y84vaoag>

63. D.Mmishra et al., Smart RF Energy Harvesting Communications: Challenges and Opportunities, IEEE Commun. Mag., Apr. 2015.

64. Σωτήριος Τέγος, Τεχνικές Ταυτόχρονης Ασύρματης Μεταφοράς Πληροφορίας και Ισχύος σε Δέκτες Χαμηλής Πολυπλοκότητας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Οκτώβριος 2017

65. Εξιιώσεις του Maxwell <https://tinyurl.com/ycuguztw>

66. D. Poulimeneas, T. Charalambous, N. Nomikos, I. Krikidis, D. Vouyioukass and M. Johansson, Delay- and diversity-aware buffer-aided relay selection policies in cooperative networks, IEEE Wireless Conference and Networking Conference. April 2016.

67. X. Zhou, R. Zhang, and C. K. Ho, "Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff," IEEE Trans. Commun., vol. 61, no. 11, pp. 4754–4767, 2013.

68. RF energy harvesting system Radio Frequency harvesting <https://tinyurl.com/y7n3gjw3>