

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Εφαρμοσμένων Επιστημών

Συστήματα Ασύρματων Επικοινωνιών

Μεταπτυχιακή Διατριβή



Καινοτόμες Λύσεις για Ασύρματη Φόρτιση Μη Επανδρωμένων Αεροχημάτων

Σπύρος Περικλέους

Επιβλέπων Καθηγητής

Δρ. Συμεών Νικολάου

Μαΐος 2020

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Εφαρμοσμένων Επιστημών

Συστήματα Ασυρμάτων Επικοινωνιών

Μεταπτυχιακή Διατριβή



Καινοτόμες Λύσεις για Ασύρματη Φόρτιση Μη Επανδρωμένων Αεροχημάτων

Σπύρος Περικλέους

Επιβλέπων Καθηγητής

Δρ. Συμεών Νικολάου

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών στα Συστήματα Ασυρμάτων Επικοινωνιών από τη Σχολή Εφαρμοσμένων Επιστημών του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου.

Μαΐος 2020

ΛΕΥΚΗ ΣΕΛΙΔΑ

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η εξέταση καινοτόμων λύσεων φόρτισης κινούμενου πολύπτερου κατακόρυφης άνωσης(Drone), το οποίο στην επιστημονική βιβλιογραφία αναφέρεται ως VTOL UAVs(Vertical Take Off and Landing - Unmanned Aerial Vehicle).

Η μεταπτυχιακή διατριβή περιλαμβάνει τη σπουδή και υλοποίηση δυο κύριων συστημάτων, τα οποία αποτελούν αναπόσπαστα μέρη της διαδικασίας ασύρματης μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, ειδικότερα όταν οι συσκευές δέκτες βρίσκονται σε κατάσταση κίνησης.

Κυριότερη εφαρμογή, αποτελεί αυτή του ραδιοανιχνευτή του ιπτάμενου αεροχήματος(drone), ή οποία μπορεί να χαρακτηριστεί ως καινοτόμος, καθώς πρόκειται για πρωτότυπη μέθοδο, η οποία εδράζεται στις αρχές λειτουργίας των συστημάτων ραδιοεντοπισμού(ραντάρ), αλλά εκμεταλλεύεται διαφορετικές παραμέτρους και χαρακτηρίζεται από παθητική λειτουργία και χαμηλό οικονομικό κόστος.

Η δεύτερη εξίσου σημαντική εφαρμογή, είναι αυτή της ασύρματης φόρτισης ενός ιπτάμενου αεροχήματος(drone), σε σχετικά μεγάλη απόσταση. Η υλοποίηση του συστήματος, παρουσιάζει εξίσου ιδιαίτερες προκλήσεις, καθώς απαιτεί άριστη κατανομή και καθοδήγηση πολλαπλών στενών δέσμων ακτίνων, υψηλή συγκέντρωση ισχύος εκπεμπόμενης ενέργειας στο στόχο, ακριβή καθοδήγηση και συντονισμό των πομπών, ώστε αυτοί να είναι συνεχώς σκοπευμένοι στον κινούμενο στόχο.

Το σενάριο της διατριβής, περιλαμβάνει επίσης τη σπουδή και υλοποίηση κατάλληλων διατάξεων κεραιών πομπού – δέκτη και ανάλογες τεχνολογικές εφαρμογές, σε λογισμικό και ηλεκτρονικά, που συνεισφέρουν στον έλεγχο και την ολοκληρωμένη λειτουργία του συστήματος εξ'αποστάσεως φόρτισης.

Η εξέταση των παραγόντων που επηρεάζουν τις παραπάνω διαδικασίες, αποτελούν πραγματική πρόκληση, καθώς κατά τη γνώση του ερευνητή, διαπιστώνεται έλλειψη επιστημονικά εδραιωμένων απαντήσεων και λύσεων, στις περιπτώσεις αυτές. Οι λιγοστές πειραματικές δοκιμές που διεξήχθησαν στο παρελθόν, αφορούσαν τη χρήση παλαιάς τεχνολογίας και συστημάτων με χαμηλότερες συχνότητες, η χρήση των οποίων βρισκόταν στο πνεύμα και τις δυνατότητες των ηλεκτρονικών διατάξεων της εποχής. Επιπρόσθετα, η εμφάνιση και χρήση των Drones, που έλαβε χώρα την τελευταία 10ετία, παρουσιάζει νέες προκλήσεις και ανάγκες, οι οποίες δεν έχουν ακόμα εξεταστεί, με κυριότερη αυτή της αύξησης του χρόνου πτήσεως, σε συνδυασμο με τη μείωση των μεγεθών και την εξέλιξη των κεραιών.

Επιπρόσθετα, θα πρέπει να αναφερθεί ότι, οι περιορισμοί στην ισχύ των ασυρμάτων εκπομπών, όπως αυτοί καθορίστηκαν από τους διεθνείς οργανισμούς ENSI, ITU, IEEE, CE, FCC [1], επαυξάνουν τις προκλήσεις και επιβάλλουν την ανάγκη, για καταβολή προσπαθειών εξεύρεσης οικονομικότερων, ασφαλέστερων και παραγωγικότερων λύσεων.

Συνεπώς, τα κύρια ερευνητικά ερωτήματα που σχετίζονται με τη διεξαγωγή της παρούσας διατριβής είναι:

- α. Κατά πόσο είναι δυνατή η ασύρματη μεταφορά ικανής ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας ώστε αυτή να φορτίζει ιπτάμενο αερόχημα(drone);
- β. Ποιές μέθοδοι μεταφοράς και μετατροπής ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας σε σταθερή τάση είναι οι καταλληλότερες και πώς αυτές θα υλοποιηθούν;
- γ. Ποιές τεχνολογίες μπορούν να συνδυαστούν προκειμένου να επιτευχθεί αυξημένη αποδοτικότητα του συστήματος ασύρματης φόρτισης;

Λέξεις Κλειδιά

Wireless Power Transfer(WPT), Microwaves Power Transfer(MPT), Wireless Power(WiPo), Beamforming, Beamsteering, Rectification, Rectenna, Power Transformation Efficiency, Witricity, Unmanned Aerial Vechicles(UAV).

Summary

The main purpose of the present thesis, is the study of finding innovative solutions for charging flying multicopters(drones) or UAV's (Unmanned Aerial Vehicles), as widely refered in scientific bibliography.

The thesis, embraces the study and realisation of two main systems, wich compose the long distance wireless power transfer(wpt) procedure, mainly because of the moving state of the target.

The main implementation, embraces radiodetection of a flying drone and can be assumed as state of the art, as it concerns a totally new method, wich is based in radar system's principles, but by taking advantage of different parametres. The method is also characterised by passive functioning and low cost.

The second main implementation, is the charging mechanism of the aerial vehicule(target) at guide long distance. The system's implementation, presents equally high challenges, as it requires almost perfect ray guidance of multiple rays and narrow beam gothering for energy concentration to the target's moving antenna element.

The thesis scenario, also embraces the study and implementation of appropriate antenna elements, for transmitting-receiving parts and relative technological implementations, in electronics and software, wich contribute in the control and complete functioning of the far distance rf charging system.

The study of the parametres wich affect the above mentioned procedures, are challenging enough, as in the knowledge of the researcher, there is a large gap of scientific and equally proved answers and solutions. The few cases of past experimental researches, refer to the usage of old technologies and systems, using low frequencies, fact that was common for the time period and electronic arrangements technology. In addition to all the above mentioned, the fact that drones appeared and have been widely used, during the last 10 years, presents new challenges and needs, wich have not yet been examined, with main one, the part of flying time extension, in accordance with the reduce of weight-dimensions and the progress in the antenna technologies.

Additionally, we shall refer the fact of the regulation's restrictements, due to the rf power emissions, as those have been defined from the worldwide organisations ENSI, ITU, IEEE, 3GPP, CE, FCC [1], that increase the challenges and amerce the need for supporting more effort to find cost effective, safer and more productive solutions.

Therefore, the main research questions wich are relevant to the present thesis, are:

- a. Is wireless power transfer(WPT) of sufficient electric energy amount possible to charge a flying drone?

b. Wich methods of WPT and electromagnetic energy transformation to DC power, are the most appropriate for the case and how will they be used?

γ. Wich technologies can be combined and in what way for acquiring the highest possible efficiency of the WPT system?

KeyWords

Wireless Power Transfer(WPT), Microwaves Power Transfer(MPT), Wireless Power(WiPo), Beamforming, Beamsteering, Rectification, Rectenna, Power Transformation Efficiency, Witricity, Unmanned Aerial Vechicles(UAV).

Ευχαριστίες

Θερμές ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή, Δρ. Συμεών Νικολάου, για το αδιάληπτο ενδιαφέρον, τη συνεχή και στοχευμένη καθοδήγηση που διέθεσε, σε όλη τη διαδικασία της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, σε συνδυασμό με τις πολλαπλές του υποχρεώσεις.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες και εκτίμηση για τους:

Δρ. Abdul Qudoss, ο οποίος με τις εξειδικευμένες γνώσεις και εμπειρίες του, στήριξε τις προσπάθειες κατασκευής των ανορθωτικών διατάξεων.

Μεταπτυχιακό φοιτητή Δαβίδ Χ'Χριστοδούλου, ο οποίος με τις εξειδικευμένες γνώσεις του, στήριξε το έργο κατασκευής κεραιών.

Ευχαριστίες επίσης, στη σύζυγο και τα παιδιά μου, που στερήθηκαν της ενεργής παρουσίας μου αρκετές φορές τα τελευταία δυο έτη, λόγω των αυξημένων υποχρεώσεων που επέβαλε ο συνδυασμός των σπουδών και της εργασίας μου.

Όλους τους διδάσκοντες καθηγητές και καθηγήτριες του ΑΠΚΥ και ιδιαίτερα το ΑΠΚΥ/Γραφείο Διασύνδεσης φοιτητών, οι οποίοι αποτέλεσαν το συνδεδετικό κρίκο στην πολύτιμη αλυσίδα μετάδοσης γνώσεων, καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο	Τίτλος Κεφαλαίου	Σελίδα
	Περίληψη	iv
	Λέξεις Κλειδιά	xi
	Πίνακες – Εξομοιώσεις	ix
	Εικόνες	
1.0	Εισαγωγή	
2.0	Ασύρματη Μεταφορά Ηλ. Ενέργειας	
	Ιστορική Αναδρομή	
	Τεχνικές Ασύρματης Μεταφοράς ΗΜ Ενέργειας	
3.0	Κεραίες	
	Κύρια Χαρακτηριστικά Κεραιών	
	Συχνότητα Λειτουργίας	
	Κέρδος Κεραιών	
	Ακτινοδιαμόρφωση	
	Πυκνότητα Ισχύος	
	Πολικότητα	
	Πρωτότυπες Κεραίες	
	Ελικοειδής Κεραία Συστήματος Εντοπισμού	
	Κεραία Πομπού Συστήματος Μεταφοράς Ισχύος	
	Κεραία Δέκτη Συστήματος Μεταφοράς Ισχύος	
	Ανιχνευτής Ιπτάμενου Στόχου	
	Μέθοδοι Ανίχνευσης και Γεοεντοπισμού	
	Τεχνική Περιγραφή - Λειτουργία Ανιχνευτή	
	Βάση Προσαρμογής Εξαρτημάτων Ανιχνευτή	
	Συγκρότημα Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων Ανιχνευτή	
	Σερβομηχανισμοί Κίνησης Ανιχνευτή	
	Ελικοειδείς Κεραίες Ανιχνευτή	
	Λογισμικό Λειτουργίας Ανιχνευτή	
5.0	Αυτόνομο Σύστημα Φόρτισης	
	Τεχνική Περιγραφή – Λειτουργία Συστήματος Φόρτισης	
	Πομπός και Συχνότητα Ασύρματης Φόρτισης	
	Κεραία Πομπού Φόρτισης	
	Σερβομηχανισμός Κατακόρυφης Κίνησης Συστήματος Φόρτισης	
	Φορέας Συστήματος Φόρτισης	
	Αλγόριθμος Αυτόνομης Διάταξης Φόρτισης	

Σύστημα Δέκτη Φόρτισης

Τεχνική Περιγραφή – Λειτουργία Δέκτη Ενέργειας

Κύκλωμα Ανορθωτή Τάσης

Δίοδοι Schottky

Τεχνική Περιγραφή - Υλοποίηση Ανορθωτή

Κεραία Δέκτη Διάταξης Φόρτισης

Πειραματική Διάταξη

Δοκιμή Μηχανισμού Ανίχνευσης

Δοκιμή Ασύρματης Μεταφοράς Ενέργειας σε

Rectenna

Δοκιμή Αυτόνομου Οχήματος Φόρτισης

0

Συμπεράσματα

Βιβλιογραφία

Συντομογραφίες

Πίνακες

Πίνακας	Περιγραφή	Σελίδα
1.	Τεχνικές και Χρήση WPT	
2.	Αυτόματος Υπολογιστής Επιστημονικής Ιστοσελίδας	33
3.	Πίνακας Απωλειών Ελευθέρου Χώρου σε Σχέση με τη Συχνότητα	
4.	Πίνακας Απωλειών Ελευθέρου Χώρου σε Σχέση με την Απόσταση	

Εικόνες

Εικόνα	Περιγραφή	Σελίδα
1.	Εφαρμογές Drones	
2.	Η Ασύρματη Φόρτιση Κυριαρχεί στο Σύγχρονο Περιβάλλον IoT/M2M/Cellular Com etc,	
3.	Ο πύργος του Τέσλα	
4.	Η Ηλεκτρομαγνητική Φύση των Ραδιοκυμάτων και το Διάνυσμα Poynting	
5.	Experiment in resonant inductive transfer by Tesla at Colorado Springs 1899	
6.	Τα πρώτα πειράματα του Brown σε Drones με ένα Έλικα	
7.	Μικροκυματική Μεταφορά Ενέργειας σε Αεροσκάφη	
8.	Περιγραφή των Εξελίξεων στην WPT	
9.	Επαγωγικό Σύστημα WPT με Πηνία	
10.	Χωρητικό Σύστημα WPT με Πυκνωτές	
11.	Διάταξη Ασύρματης Μεταφοράς Ενέργειας με Δέσμη Λειζερ	
12.	Τοπολογία Rectenna	
13.	Κατηγορίες Ασύρματης Μεταφοράς Ενέργειας	
14.	Τύπος του Friis	
15.	Το Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα και τα Μήκη Κύματος(λ)	
16.	Κέρδος Κεραίας και Κατευθυντικότητα	
17.	Πολυδιαυλικός Ανιχνευτής για Διαστημικό Ραντάρ Συνθετικής Διάταξης με Χρήση Ψηφιακής Ακτινοδιαμόρφωσης	
18.	Πυκνότητα Ισχύος σε Σχέση με την Απόσταση	
19.	Υλικά Κατασκευής και Ελικοειδής Κεραία Ραδιοεντοπιστή Drone 5.8 GHz	
20.	Υλικά Κατασκευής και Ελικοειδής Κεραία Πομπού Φόρτισης 900MHz	
21.	Υλικά Κατασκευής και Τυπωμένη Κεραία Δέκτη 900MHz	
22.	Διάταξη Ελικοειδών και Κύρια Μέρη Κεραίων Ραδιοεντοπιστή	44
23.	Κάτω μέρος Βάσης Ανιχνευτή με πλακέτα κυκλωμάτων διασύνδεσης Δε- κτών και Κεραίων	44
24.	Ηλεκτρική Διακλάδωση PCB Ανιχνευτή	45
25.	Δέκτες RX 5808 Ραδιοεντοπιστή Πειράματος, www.aliexpress.com	45
26.	Συχνότητες Καναλιών Δέκτη RX 5808	46
27.	Σερβομηχανισμοί FS90MG και τεχνικά χαρακτηριστικά	
28.	Τρισδιάστατη Εξομίωση και Διαστάσεις Κεραίας Ραδιοεντοπιστή	
29.	Διάταξη Ελικοειδών Κεραίων Ραδιοεντοπιστή Πειράματος	
30.	Διάγραμμα Ροής Ενεργειών Ραδιοεντοπιστή Πειραματικής Δοκιμής	
31.	Συνδεσμολογία Ραδιοεντοπιστή Πειραματικής Δοκιμής με την Εφαρμογή Cirqiuno.io	
32.	Αυτόνομο Όχημα Φόρτισης με Κατευθυντική Κεραία	
33.	Πομπός E840-DTU(GPRS-01)	
34.	Ελικοειδής Κεραία Φορτιστή 900MHz(α) και Χαρακτηριστικά Κεραίας(β)	

35.	Τρισδιάσταση Απεικόνιση Σχεδίασης και Χαρακτηριστικά	
36.	Συγκριτική Εξομοίωση και Εργαστηριακή Μέτρηση Συμφωνίας Απόκρισης	
37.	Σερβομηχανισμός FS90MG	
38.	Αυτόνομα Όχημα Φόρτισης με Κατευθυντική Κεραία	
39.	Συνδεσμολογία Αυτόνομου Φορέα Φόρτισης με την Εφαρμογή Cirquino.io	
40.	Διάγραμμα Ροής ενεργειών Διάταξης Φόρτισης Αυτόνομου Οχήματος Φόρτισης	
41.	Διάταξη Επιμέρους Κυκλωμάτων Διπλού Ανορθωτικού Δέκτη	
42.	Οι 3 Βασικές τοπολογίες Rectenna	
43.	Εξομοίωση συντονισμού S11 - συχνότητας και εξομοίωση αποδοτικότητας-φορτίου, σε σχέση με την λαμβανόμενη ισχύ	
44.	Εξομοιώσεις Αποδοτικότητας συντονισμού Τοπολογιών στα 900MHz, fullwave(αριστερά) και halfwave(δεξιά) στα 0, -10 και -20dBm	62
45.	Δίοδος Schottky Skyworks SMS 7630(αριστερά) και Broadcom HSMS 2850(δεξιά)	63
46.	Χαρακτηριστικά διόδου HSMS 2850	64
47.	Συγκριτική Εξομοίωση μεταξύ Ανορθωτικού Δέκτη με δίοδο Skyworks SMS 7630(αριστερά) και Broadcom HSMS 2850(δεξιά)	64
48.	Προσομοίωση Λήψης Trunet σε απόσταση 20μ, με πέντε πομπούς ισχύος	65
49.	Εξομοίωση Αποδοτικότητας Κυκλώματος Ανόρθωσης Πολλαπλασιαστή σε Σχέση με το Φορτίο και την Λαμβανόμενη Ισχύ	65
50.	Σχεδίαση Εξομοίωση και Χαρακτηριστικά Κυκλώματος Ανορθωτικού Πολλαπλασιαστή Τριών Σταδίων	66
51.	Κύκλωμα Ανόρθωσης Τριπλού Πολλαπλασιαστή	66
52.	Συγκριτικό Διάγραμμα Εξομοίωσης και Μετρήσεων Τριπλού Πολλαπλασιαστή	67
53.	Εξομοίωση Κυκλικής Εκτυπωμένης Κεραίας Φορτιστή	68
54.	Διαστάσεις και Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά Κυκλικής Εκτυπωμένης Κεραίας Δέκτη Φόρτισης	69
55.	Κυκλική Κεραία Δέκτη με Ενσωματωμένο Εκτυπωμένο Ανορθωτή στο Πίσω Μέρος	69
56.	Εξομοίωση Συμφωνίας Απόκρισης S11 στα 900MHz	67
57.	Πλήρες Κυκλώμα Ανορθωτικού Πολλαπλασιαστή τριών σταδίων και Εξομοίωση συμφωνίας S11-S21 για f=900 MHz	
58.	Δοκιμή Ανταπόκρισης Ραδιοανιχνευτή με Χρήση Κινούμενου Πομπού TX-	
59.	Προσομοίωση Εκπομπής Ενέργειας Trunet, σε Drone στην απόσταση 20μ, ύψος 10μ, από 5 οχήματα φόρτισης με ισχύ εκπομπής, 20W έκαστο	
60.	Πειραματική Δοκιμή Εκπομπής Ενέργειας σε Rectenna με αφή λυχνίας led στην απόσταση 2.5μ, με ισχύ εκπομπής 0.1W(20dBm)	
61.	Αυτόνομο Όχημα Φόρτισης με Ραδιοεντοπιστή	
62.	Δοκιμή ανίχνευσης και φόρτισης Drone DJI Phantom 3 Advanced με προσαρμοσμένη Rectenna	73

ΛΕΥΚΗ ΣΕΛΙΔΑ

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η ραγδαία ανάπτυξη των κινητών συσκευών, των συσκευών IoT, αλλά και γενικότερα των ασυρμάτων συσκευών, καθίσταται πλέον εμφανής σε όλους τους τομείς, είτε αυτοί αφορούν στην ιδιωτική χρήση, στη βιομηχανική, τη στρατιωτική, στις συγκοινωνίες, τις έξυπνες πόλεις κ.π.α.

Στα πλαίσια αυτά, αναπτύχθηκαν και διάφορες μορφές μη επανδρωμένων αεροχημάτων, τα οποία εξυπηρετούν μεταξύ άλλων, ανάγκες φωτογράφισης, χαρτογράφησης, στρατιωτικές εφαρμογές αλλά και πολλές άλλες ενδιαφέρουσες δραστηριότητες, οι οποίες σχετίζονται με υποστηρικτικό έργο, σε μια ευρεία γκάμα εργασιών, όπως πχ οι αγροτικές εργασίες, οι ταχυμεταφορές[Εικ.1α] ή οι κόμβοι υποστήριξης επικοινωνιών. Όλες οι παραπάνω δραστηριότητες οδήγησαν σε αξιοσημείωτη εμπορική ανάπτυξη του τομέα των Drones, με αποτέλεσμα σήμερα να παρουσιάζει εντυπωσιακή οικονομική δραστηριότητα[Εικ.1β] της τάξεως πολλών δισεκατομμυρίων Ευρώ.



(α)



(β)

Εικόνα 1, Εφαρμογές Drones, www.bbc.com, www.consilium.europa.com

Η ευρεία διάδοση και ανάπτυξη του συνόλου των προαναφερθέντων ασυρμάτων συσκευών, προϋποθέτει και την κινητικότητα του χρήστη/συσκευής, γεγονός που επηρεάζεται άμεσα και καθοριστικά από την τροφοδοσία αυτής, ώστε να λειτουργεί ανεπηρέαστα για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Συνεπώς, καθίσταται αυτονόητο πλέον γεγονός, ότι τα δισεκατομμύρια φορητών συσκευών που αναμένεται να χρησιμοποιηθούν τα επόμενα χρόνια[Εικ.2], στα πλαίσια των δραστηριοτήτων που προαναφέρθηκαν, σε συνδυασμό με τις τεχνολογίες των πολλά υποσχόμενων δικτύων 5G. επιβάλλεται να λειτουργήσουν με ενεργειακή αυτονομία, προς αποφυγή της υποχρέωσης συνεχούς φόρτισης. Η συνεχής σύνδεση τους σε ηλεκτρικό δίκτυο, θα καταργούσε ουσιαστικά τα προνόμια κινητικότητας που παρέχουν οι συσκευές.

Η ασύρματη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε τύπο συσκευής, σε κάθε περιβάλλον και περίπτωση, παρουσιάζει ιδιαιτερότητες, οι οποίες επιβάλλουν συνήθως την υλοποίηση διαφορετικών εφαρμογών φόρτισης ή και τροφοδότησης.



Εικόνα 2, Η Ασύρματη Φόρτιση Κυριαρχεί στο Σύγχρονο Περιβάλλον IoT/M2M/Cellular Com etc,

Στα πλαίσια που αναφέρθηκαν, εδράζεται η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, η οποία περιλαμβάνει τον τομέα της ανίχνευσης και ασύρματης φόρτισης ενός ιπτάμενου αεροχήματος(drone). Οι προκλήσεις θα αντιμετωπιστούν με πληθώρα εφαρμογών και τεχνολογιών, οι οποίες είναι δυνατό να χαρακτηριστούν ως καινοτόμες, τμηματικά αλλά και ως σύνολο, καθώς περιλαμβάνουν υλοποίηση των ακόλουθων εφαρμογών - διατάξεων:

- α. Ανιχνευτή Drone βασισμένο σε τεχνολογία radar στα 5.8 GHz
- β. Ασύρματη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με ραδιοκύματα 900 MHz, σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις(20m) μέσω ρομποτικού οχήματος φόρτισης.
- γ. Ρομποτικά ελεγχόμενο όχημα φόρτισης για εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας.
- δ. Καθοδήγηση και συγκέντρωση των ραδιοκυμάτων προς το αερόχημα(στόχο) και την κεραία μετατροπέα AC-DC.
- ε. Μετατροπή των ραδιοκυμάτων(AC) σε σταθερή τάση(DC) με τη χρήση αερομεταφερούμενου ανορθωτή τάσης(rectifier/rectenna) και αποδοτικών διατάξεων κεραιών.

Η συνδυασμένη χρήση των πιο πάνω πρωτότυπων διατάξεων, απέδειξε ότι η ασύρματη φόρτιση ιπτάμενων συσκευών είναι δυνατή, αν το πλήθος των επιγείων πομπών και η εκπεμπόμενη ισχύς είναι αρκετά μεγάλα. Η υλοποίηση όμως ανάλογης μορφής συστήματος, είναι αντι-

κειμενικά ασύμφορη με τα σημερινά δεδομένα, παρά το γεγονός ότι μια συνδυαστική συνεκμετάλλευση των ελεύθερων εκπομπών, όπως πχ των τηλεοπτικών και τηλεφωνικών σημάτων, ενδεχομένως να το καταστήσει πιο βιώσιμο.

Βέβαια, οι καλπάζουσες εξελίξεις της τεχνολογίας στους τομείς των ηλεκτρονικών, των κεραιών και των μεθόδων ραδιοεντοπισμού, αφενώς καθίστανται περισσότερο προσιτές με το πέρασμα του χρόνου και αφεταίρου, αφήνουν όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, αξιόλογες προοπτικές για καλύτερη και περισσότερο αποδοτική εκμετάλλευση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας.

Κεφάλαιο 2

Ασύρματη Μεταφορά Ηλ. Ενέργειας

W i r e l e s s P o w e r T r a n s

Η ασύρματη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ραδιοκυμάτων(WPT), μελετήθηκε ένα αιώνα προηγουμένως από τον Ν.Τεσλα [2], ενώ ήδη ο Marconi(1896) μελετούσε την ασύρματη μετάδοση πληροφοριών - wireless information transmission(WIT). Το γεγονός ότι οι ιδέες του Τέσλα[Εικ.3] υπήρξαν πολύ προχωρημένες για την εποχή αποτελεί πραγματικότητα. Σημαντικές εξελίξεις τις κατέστησαν δυνατές τα τελευταία μόλις χρόνια, λόγω της προόδου στον τομέα των ηλεκτρονικών και της μικροκυμματικής διάδοσης - microwave power transmission(MPT).

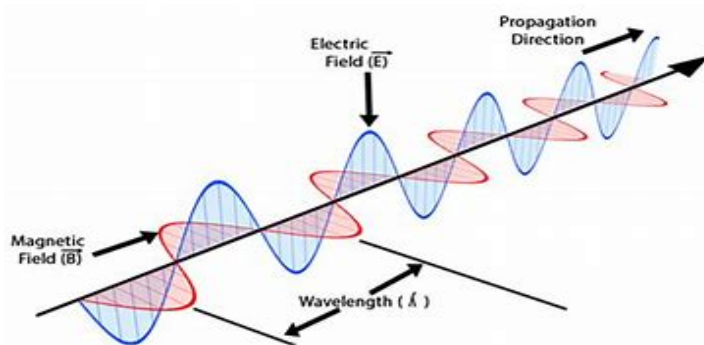


Εικόνα 3, Ο πύργος του Τέσλα, www.wikipedia.org

2.1 Ιστορική Αναδρομή

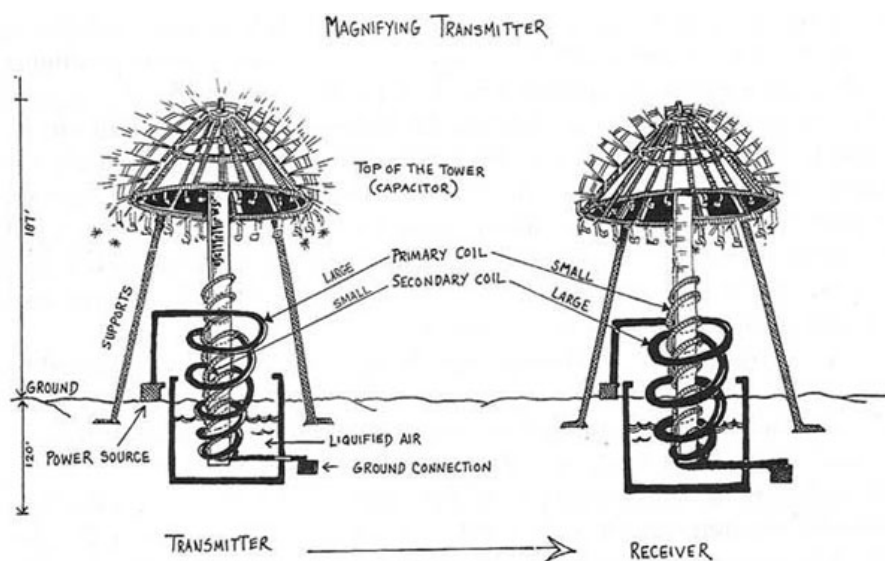
Το 1865 [3], ο James Maxwell απέδειξε ότι, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρουν ενέργεια και πληροφορίες, με την επινοήση ανάλογων μαθηματικών μοντέλων, τα οποία αποτελούν μέχρι σήμερα, τη βάση για την ανάλυση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Το 1884, ο John Poynting απέδειξε ότι, το λεγόμενο διάνυσμα poynting [3], που φαίνεται στην εικ.4, θα διαδραμάτιζε σημαντική παράμετρο στην προσπάθεια ποσοτικοποίησης της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας.



Εικόνα 4, Η Ηλεκτρομαγνητική Φύση των Ραδιοκυμάτων και το Διάνυσμα Poynting

Το 1888, ο Hertz [4] πέτυχε να επιδείξει πειραματικά για πρώτη φορά την ύπαρξη ραδιοκυμάτων με τη χρήση του ραδιοπομπού τύπου αναφλεκτήρα κενού (spark gap). Κατα την ίδια περίοδο, όταν οι Marchese Marconi και Reginal Fessenden προωθούσαν την επικοινωνία με ραδιοκύματα, ο Nicola Tesla εισηγήθηκε την ασύρματη διάδοση ενέργειας. Πραγματοποίησε τα πρώτα πειράματά του το 1899 και δήλωνε μεταξύ άλλων τα ακόλουθα:



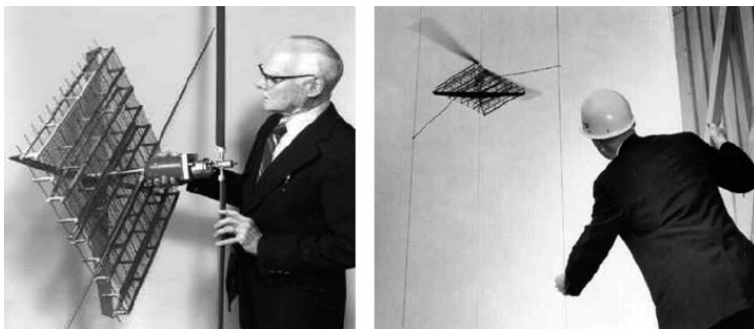
Εικόνα 5, Πείραμα Επαγωγικής Μεταφοράς του Τέσλα στο Κολοράντο Σπρινγς 1899 , <http://www.reformation.org/tesla-coils.jpg>

« Η Ενέργεια θα συγκεντρώνεται ανα το παγκόσμιο το προτιμότερο σε μικρές ποσότητες που θα κυμαίνονται από ένα κλάσμα ενός μέχρι μερικών ίππων. Μια από τις κυριότερες χρήσεις θα είναι ο φωτισμός απομακρυσμένων κατοικιών».

Στην ουσία, ο Τέσλα κατασκεύασε ένα γιγαντιαίο πηνίο, συνδεδεμένο με ένα ιστό κεραίας ύψους 200 ποδών με μια σφαίρα διαμέτρου 3 ποδών στην κορυφή. Η συσκευή ονομάστηκε Πύργος Τέσλα(Εικ. 5) και μέσω αυτής τροφοδότησε ισχύ 300kW στο πηνίο, το οποίο παλλόταν σε συχνότητα 150 kHz. Η ισχύς στη σφαίρα έφθασε τα 100MV και το πείραμα απέτυχε καθώς η εκπεμπόμενη ενέργεια διασκορπίστηκε σε όλες τις κατευθύνσεις, αφού το μήκος κύματος των 150 kHz έφτανε τα 21km. Στην περίοδο που ακολούθησε το πείραμα, κυριάρχησαν οι ασύρματες επικοινωνίες και η εξ' αποστάσεως ανίχνευση(radar).

Η εστίαση στην εκπεμπόμενη ισχύ και στην αύξηση της αποδοτικότητας διάδοσης, παρέπεμπε σε ψηλότερες συχνότητες από αυτήν του Τέσλα. Περί το 1940-50 σημειώθηκε αξιοσημείωτη πρόοδος στην παραγωγή μικροκυμάτων με συχνότητες 1-10GHz, καθώς επινοήθηκαν, το Magnetron και το Klystron [2], ίσως οι οικονομικότερες πλέον μέθοδοι εκπομπής μεγάλης ισχύος υψίσυχνων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Μετά το Β'ΠΠ η επινοήση μεγάλης ισχύος και απόδοσης μικροκυματικών αγωγών(tubes), προέκυψε από την ανάπτυξη της τεχνολογίας των ραντάρ.



Εικόνα 6, Τα πρώτα πειράματα του Brown σε Drones με ένα Έλικα, Brown W.C, The Microwave Powered Helicopter

Στη βάση των επιτευγμάτων του Β'ΠΠ, ο W.C. Brown παρουσίασε την πρώτη έρευνα [2] και ανάπτυξη περι τα 1960. Ο Brown ως πατέρας της ανορθωτικής διάταξης μετατροπής ραδιοκυμάτων σε ηλεκτρική ενέργεια(rectifying antenna/rectenna), χρησιμοποίησε για πρώτη φορά τις διόδους Shcotkky που αναλύονται στο κεφ. 7 και προέβηκε σε εκείνες τις στοχευμένες παρατηρήσεις και προτάσεις δια των τότε πειραμάτων του, που οδήγησαν στην αναζήτηση λύσεων και βελτιώσεων στο σήμερα.

Αρχικά, κατασκεύασε μια ανορθωτική κεραία(rectifying antenna) που ονόμασε «rectenna», για τη λήψη και την μετατροπή των μικροκυμάτων από εναλλασσόμενο σε σταθερό ρεύμα. Η αποδοτικότητα της πρώτης κεραίας έφθανε το 50% στα 4W DC και 40% στα 7W DC. Με αυτά, ο Brown τροφοδότησε ένα μοντέλο μικρού μονοέλικου ελικοπτερου το 1964 και ένα μεγαλύτερο

το 1968(Εικ.6), τα οποία στηρίζονταν σε κατακόρυφες ράγες συγκράτησης. Η επόμενη πρόκληση που αφορούσε εντοπισμό και φόρτιση ιπτάμενου αεροσκάφους αν και ξεκίνησε, δεν ολοκληρώθηκε λόγω ελλειπούς χρηματοδότησης και ενδιαφέροντος. Τα πειράματα συνεχίστηκαν και αξίζουν αναφοράς, καθώς οι μετρήσεις καθίστανται ικανές να εξηγήσουν μερικώς τη συμπεριφορά των ραδιοκυμάτων σε σχέση με τις τότε χρησιμοποιούμενες ηλεκτρονικές διατάξεις.

Ο Brown προσπάθησε να αυξήσει την απόδοση της μετατροπής DC/RF-RF/DC, με χρήση συχνότητας 2,45GHz. Η συνολική απόδοση έφτασε τα 26.5 %, με έξοδο 39W DC (Marshall Space Flight Centre 1970). Το 1975, η συνολική απόδοση έφτασε στα 54%, με έξοδο 495W DC, με τη χρήση του Magnetron της Raytheon Labs. Παράλληλα, μια άλλη ομάδα με επικεφαλής τους Brown και Dickinson, πέτυχε το μεγαλύτερο πείραμα μεταφοράς ενέργειας στο Venus Site JPL Goldstone Facility. Εκεί, η απόσταση μεταξύ της παραβολικής κεραίας πομπού, με διάμετρο 26μ.και της Rectenna, με διαστάσεις 3.4 χ 7.2μ, ανήλθε στο 1 μίλι. Το εκπεμπόμενο σήμα είχε συχνότητα 2.388 GHz, ισχύ της τάξεως των 450 kW από το klystron και η ακτινοβολούμενη ισχύς DC έφτασε τα 30kW, με απόδοση ακτινοβολίας τα 82.5 %.

Με βάση την έρευνα του Brown, ο P.E. Glasser πρότεινε το 1968 τη δημιουργία του Δορυφορικού Ηλιακού Συστήματος Ενέργειας(Solar Power Satellite, SPS). Το SPS αφορούσε την ασύρματη μεταφορά ενέργειας στο διάστημα μεταξύ πλανητών και θα λάμβανε ενέργεια από τον ήλιο, σε περιοχές που αυτός ακτινοβολεί 24ώρες το 24ωρο. Η ανάγκη για χρησιμοποίηση τεραστίων διαστάσεων κεραιών και η δυσκολία μεταφοράς τους στο διάστημα, άφησε προσωρινά τους επιστήμονες να ασχολούνται με την ασύρματη μετάδοση ενέργειας, αντι με το SPS [5], φωτίζοντας όμως αρκετά περισσότερο τις γνώσεις τους.

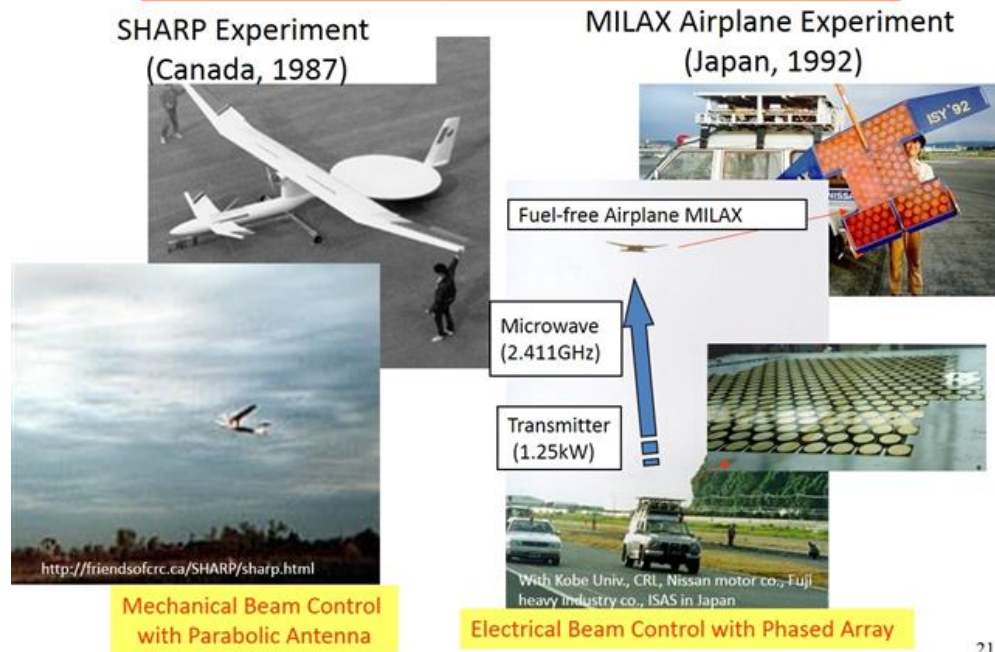
Οι πιο πάνω διαπιστώσεις, οδήγησαν ομάδες Ιαπώνων επιστημόνων περι τα τέλη του 20^{ου} αι., να διεξάγουν εκτεταμένες έρευνες στο διάστημα, όπως η ομάδα του Hiroshi Mutsumoto. Στα πειράματα αυτά, χρησιμοποιήθηκε κοινός magnetron μικροκυμάτων 800W, στα 2.45GHz.

Στην Ιαπωνία διεξήχθησαν αρκετά πειράματα ασύρματης μικροκυματικής φόρτισης [6], όπως οι πτήσεις αεροσκάφους χωρίς καύσιμα με τη χρήση για πρώτη φορά συμφασικών διατάξεων κεραιών στη συχνότητα των 2.4 GHz για το MILAX(Microwave Lifted Airplane) το 1992(Εικ.6), τα πειράματα MPT στο έδαφος με συχνότητα 2.45GHz, που διεξήθησαν από εταιρείες και πανεπιστήμια, κατά την περίοδο 1994-95(Εικ.6). Στην περίπτωση του MILAX το σύστημα εντοπισμού στόχου ήταν το Ιαπωνικό SHARP, το οποίο περιλάμβανε διατάξεις συμφασικών κεραιών. Πέραν των ΗΠΑ και της Ιαπωνίας,

ντυπωσιακό ήταν το επίτευγμα καναδικής εταιρίας το 1987, να τροφοδοτήσει ασύρματα ένα αεροπλάνο, διαστάσεων 2.4 X 4.7μ., με προσαρμοσμένη κεραία σε ύψος 150μ με 10kW στα 2.45 GHz(Εικ.7).

Το πανεπιστήμιο Kobe, σημερινό εθνικό ιαπωνικό ινστιτούτο τεχνολογίας επικοινωνιών και πληροφορίας, πέτυχε το 1995 τη μικροκυματική φόρτιση ενός ιπτάμενου αερόστατου που ονομάστηκε ETHER(Energy Transmission Toward High-altitude long Endurance airship Experiment). Η ερευνητική ομάδα, πέτυχε εκπομπή μικροκυμάτων με συχνότητα 2.45 GHz, ισχύος 10KW, σε αερόστατο που βρισκόταν σε αιώρηση ύψους 45μ από το επίπεδο του εδάφους. Σε αυτή την περίπτωση, οι ερευνητές χρησιμοποίησαν παραβολική κεραία και μικροκυματικούς σωλήνες(waveguide tubes).

MPT to Flying Drone (Airplane)



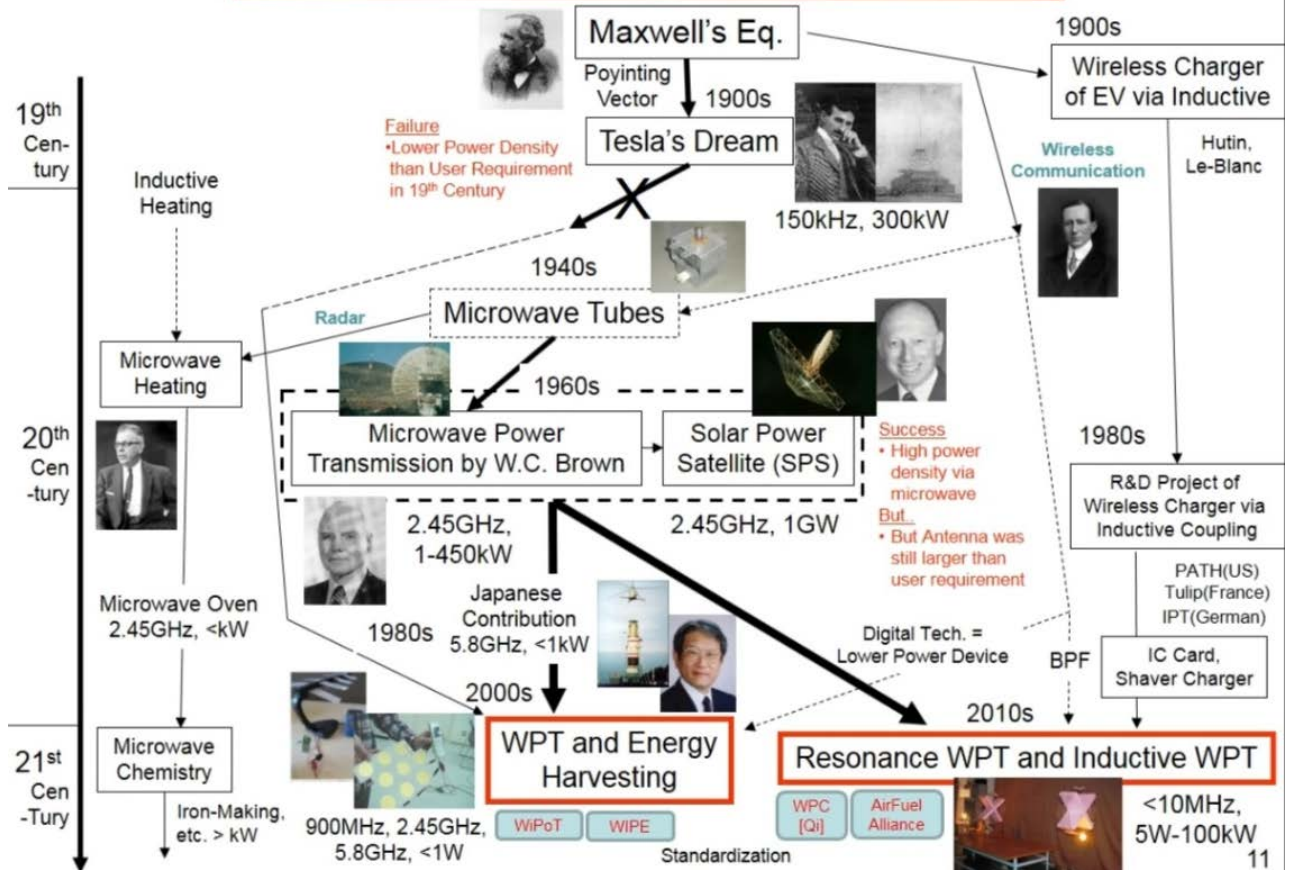
Εικόνα 7, Μικροκυματική Μεταφορά Ενέργειας σε Αεροσκάφη (ITU-R SM.2392-0 2016)

Στη συνέχεια, το Kobe σε συνεργασία με τον καθηγητή John Mankins από την Χαβάη, εκτέλεσαν πειραματικές δοκιμές το 2008, με εκπομπή 20 W στα 150km και χρήση συμφασικών διατάξεων κεραιών. Παρά το γεγονός ότι η ενέργεια δεν έφτασε στον στόχο, η εμπειρία της δοκιμής ώθησε στην πρόοδο της ερευνητικής ομάδας ένα χρόνο μετά, να εκτελέσει μια άλλη δοκιμή από αερόστατο στο έδαφος, με χρήση διφασικά ελεγχόμενων magnetrons. Το πείραμα απέβλεπε στην επίδειξη δυνατοτήτων MPT σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, κατέστη δυνατή η φόρτιση μιας κινητής τηλεφωνικής συσκευής, σε απόσταση 50μ., με τη συχνότητα των 2,45GHz.

Απώρεια της ανάπτυξης των ερευνών στο SPSS, αποτέλεσε και η πολυδιαδρομική τεχνική πολλαπλών κεραιών Phased Arrays [2], για καθοδήγηση των ακτίνων, ενώ οι νεότερες τεχνολογίες του πρωτοκόλου 802.11, MUMIMO, Beamforming, Multiple Access [3], ήδη υλοποιούνται στην κινητή τηλεφωνία. Οι εξελίξεις αυτές, αναπτρώνουν τις ελπίδες της αύξησης της αποδοτικότητας των συστημάτων WPT/MPT και επαναφέρουν 120 χρόνια μετά την ακαταλαβίστικη τότε προφητεία του Τέσλα περί συγκέντρωσης ενέργειας από πολλές μικρές εστίες !

Πέραν του έργου του Brown, ο οποίος συνόδευσε και κατέγραψε απο το αρχικό στάδιο μέχρι πρόσφατα, τις εξελίξεις[Εικ.8] στον τομέα της WPT, αξιοσημείωτη είναι η βιογραφία του πατέρα του εναλλασσόμενου ρεύματος, N. Τέσλα, η οποία προσφέρει εντυπωσιακές πληροφορίες για την εποχή, ενώ από πηγές του διαδικτύου, καθίσταται γνωστή η σημασία της σχέσης του με την αυτοκινητοβιομηχανία Tesla του Elon Musk και με σύγχρονες αμυντικές βιομηχανίες και εφευρέσεις, οι οποίες προέκυψαν από τα δικαιώματα του τελικού πτωχεύσαντα Τέσλα και των συνεργατών του.

History of Wireless Power Transfer



Εικόνα 8, Περιγραφή των Εξελίξεων στην WPT(Shinohara 2014 : 20)

2.2 Τεχνικές Ασύρματης Μεταφοράς ΗΜ Ενέργειας (WPT)

Η ασύρματη μεταφορά ενέργειας, μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες τεχνικές, οι οποίες εξαρτώνται από το κόστος, τις αποστάσεις, τα υλικά, το μέσο μετάδοσης, τη μεταδιδόμενη ενέργεια, το επιτρεπόμενο βάρος, τις διαστάσεις, κα.

Βασική κατηγοριοποίηση στις μεθόδους θα μπορούσε να αποτελέσει κατ' αρχήν η απόσταση εκπομπής - λήψης των ραδιοκυμάτων, με το διαχωρισμό της διάδοσης στο κοντινό πεδίο(nearfield) και στο μακρινό πεδίο(far field) [3], [7].

Τα όρια των 2 πεδίων δεν προσδιορίζονται ευκρινώς, καθώς μεταξύ τους παρεμβάλλεται και μια ενδιάμεση περιοχή μέσου πεδίου(Mid Field), αλλά το περιβάλλον διάδοσης μεταξύ των 2 ακραίων περιοχών είναι εκείνο που παρουσιάζει καθοριστικές διαφοροποιήσεις. Η ακτίνα κάλυψης του εκάστοτε πεδίου, καθορίζεται από τη ζώνη Fraunhofer ή Fresnel με βάση το μήκος κύματος(λ) δια της σχέσης:

$$D_f = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3.1)$$

Έτσι, εντός της ακτίνας που καθορίζεται από τη σχέση (3.1), το περιβάλλον διάδοσης αφορά στο κοντινό πεδίο, όπου η ενέργεια και τα κύματα διαδίδονται περισσότερο με επαγωγικό τρόπο, λόγω της άμεσης αλληλεπίδρασης των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων και δεν μπορούν να εξεταστούν με τη χρήση των κλασικών μοντέλων.

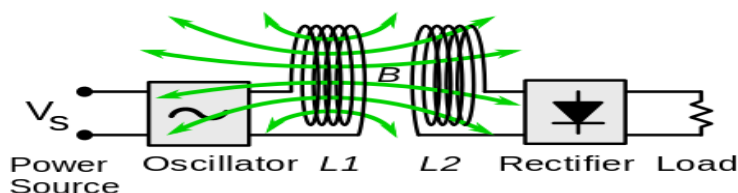
Στη ζώνη μακρινού πεδίου, εφαρμόζονται όλοι οι γνωστοί κανόνες και τα μοντέλα ραδιοδιάδοσης, καθώς τα ηλεκτρικά και μαγνητικά κύματα είναι πλέον κάθετα μεταξύ τους.

Σε συνάρτηση με τα παραπάνω, οι διάφορες τεχνικές ασύρματης μετάδοσης ηλεκτρικής ενέργειας[Εικ.13], κατανέμονται και εφαρμόζονται, αφού προηγηθεί ο ανάλογος ισολογισμός ζεύξης σε σχέση με τον πίνακα 1, όπου αναφέρονται τα πλεονεκτήματα της κάθε μεθόδου.

Αναλυτικότερα, οι κύριες μέθοδοι είναι οι ακόλουθες:

α. Επαγωγική Ζεύξη(Inductive Coupling)

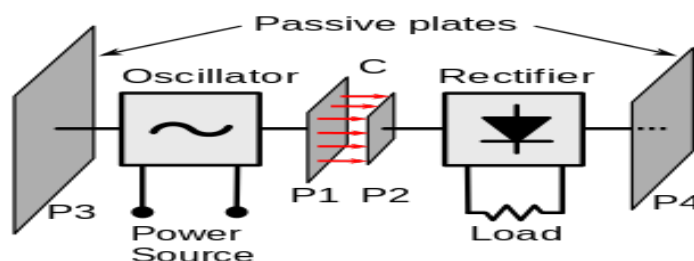
Στηρίζεται στα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται μεταξύ πηνίων[εικ.9], τα οποία βρίσκονται συνήθως στην περιοχή του πολύ κοντινού πεδίου(near field), με βάση τους νόμους των Αμπέρ και Φαραντεϊ. Η ενέργεια που διαπερνά το πηνίο δότη(sender coil), προκαλεί ένα μαγνητικό πεδίο που με τη σειρά του επάγεται στο πηνίο δέκτη, που βρίσκεται σε πολύ κοντινή απόσταση και δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο. Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται είναι της τάξης των λίγων MHz.



Εικόνα 9, Επαγωγικό Σύστημα WPT με Πηνία, www.wikipedia.com

β. Παλμική(Resonant) Επαγωγική(Μαγνητική) Ζεύξη

Με την πρόσθεση πυκνωτών στα πηνία δότη και δέκτη όπως φαίνεται στην εικ.10, αυτοί μετατρέπονται σε παλμικούς ταλαντωτές και η ενέργεια μεταδίδεται από τον ένα στον άλλο ταλαντωτή, μέσω ενός φίλτρου χαμηλής μικροκυμματικής ζώνης. Στην περίπτωση που στη θέση των πυκνωτών εφαρμόζονται επαγωγικές πλάκες που διαπερνούν ηλεκτρικό πεδίο, το φαινόμενο ονομάζεται μαγνητική παλμική ζεύξη(magnetic pulse coupling).

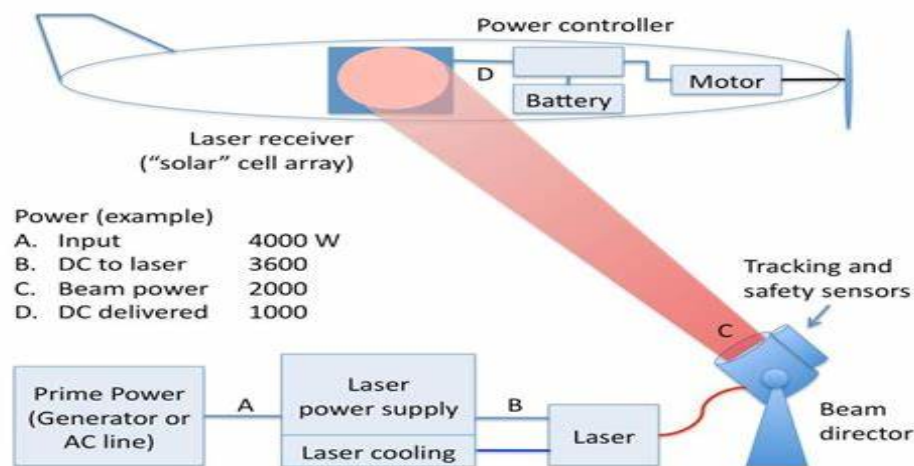


Εικόνα 10, Χωρητικό Σύστημα WPT με Πυκνωτές, www.wikipedia.com

Τα 2 πηνία ή ταλαντωτές, θεωρείται ότι βρίσκονται σε ηλεκτρομαγνητική ζεύξη στις περιπτώσεις επαγωγικής και παλμικής ασύρματης μεταφοράς ενέργειας. Η αποδοτικότητα της ζεύξης εξαρτάται από το γινόμενο των παραγόντων Q (δείκτης ποιότητας) και k (συντελεστής ζεύξης).

γ. Οπτική Μετάδοση Ενέργειας(OPT),

Αποτελεί παρακλάδι της WPT και εκμεταλλεύεται συχνότητες στα πλαίσια του ορατού φάσματος, όπως στην περίπτωση των υψηλής ισχύος ακτίνων λέιζερ, που παρουσιάζονται στην εικ.11 και στις υπέρυθρες ακτίνες που ακτινοβολούν φωτοβολταϊκές πλάκες. Πρόκειται για πολύ αποδοτικές και υποσχόμενες μεθόδους αλλά με μεγάλα κόστη και υψηλή επικινδυνότητα. Η χρησιμοποίηση υψηλής συγκέντρωσης και ισχύος ακτίνων λέιζερ, αποτελεί ουσιαστικά καταστροφικό όπλο(όπως και χρησιμοποιείται) με περιορισμούς όμως λόγω ανακλάσεων, διαθλάσεων και σκεδάσεων, αλλά και της υψηλής απορροφητικότητας που παρουσιάζεται από σύννεφα, βροχή, υγρασία και σκόνη, καθώς ακολουθούνται όλοι οι κανόνες της οπτικής διάδοσης του φωτός.



Εικόνα 11, Διάταξη Ασύρματης Μεταφοράς Ενέργειας με Δέσμη Λειζερ
www.wikipedia.com

Η φωτονική μέθοδος, παρά την υψηλή αποδοτικότητα που την χαρακτηρίζει, δεν κρίθηκε σκόπιμο να εξεταστεί λόγω υψηλού κόστους και των σοβαρότερων θεμάτων ασφαλείας που προκύπτουν στη διάδοση των ακτίνων λειζερ υψηλής ισχύος. Παραταύτα, η μικροκυμματική μέθοδος στα πλαίσια της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιείται στη διατριβή, είναι δυνατόν να συνδυαστεί στο μέλλον, με μια πιο κοστοβόρα και αποδοτική εφαρμογή εκπομπής λειζερ, μέθοδο που συνήθως εφαρμόζεται σε στρατιωτικές εφαρμογές υψηλής ακρίβειας.

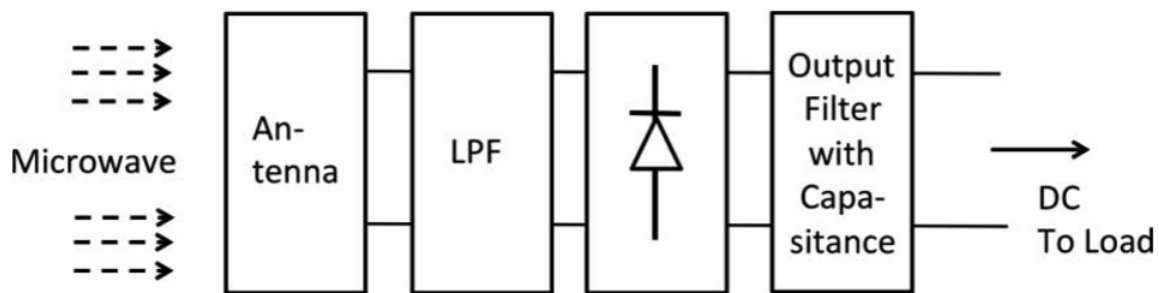
δ. Ασύρματη Ραδιοκυματική ή Μικροκυματική Μεταφορά Ενέργειας(WPT ή MPT)

Αποτελεί μέθοδο μετάδοσης από σημείο σε σημείο, από πολλά σημεία σε σημείο και από σημείο σε περισσότερα σημεία ή συνδυασμό. Εφαρμόζεται σε μεγαλύτερες αποστάσεις και συνήθως απαιτεί οπτική επαφή. Η WPT αφορά στη χρήση χαμηλών σχετικά συχνοτήτων κάτω του 1 GHz, ενώ η MPT αφορά μικροκυματικές συχνότητες άνω των 1GHz. Αμφότερες, εξαρτώνται κυρίως από τις απώλειες ελευθέρου χώρου(FSL) και άλλες δευτερεύουσας σημασίας απώλειες, οι οποίες παρουσιάζονται στα επιμέρους συστήματα. Η αποδοτικότητα των εν λόγω συστημάτων, αυξάνεται με την προσπάθεια μείωσης των απωλειών αυτών και την αύξηση της ισχύος, όπως και στα κλασικά συστήματα ραδιοεπικοινωνιών με μια όμως διαφορά. Η αποδοτικότητα δεν εξαρτάται και δεν αυξάνεται με το ρυθμό δεδομένων ή την κωδικοποίηση, καθώς αυτά δεν χρειάζονται παρά μόνο για ταυτόχρονη αποστολή δεδομένων και φόρτιση [5], κατάσταση που δεν θα εξεταστεί.

Βασική προϋπόθεση για την επίτευξη ασύρματης μεταφοράς σε μεγάλες αποστάσεις, αποτελεί η ύπρξη κατάλληλων ανορθωτικών διατάξεων και κεραιών για μετατροπή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας σε σταθερή τάση.

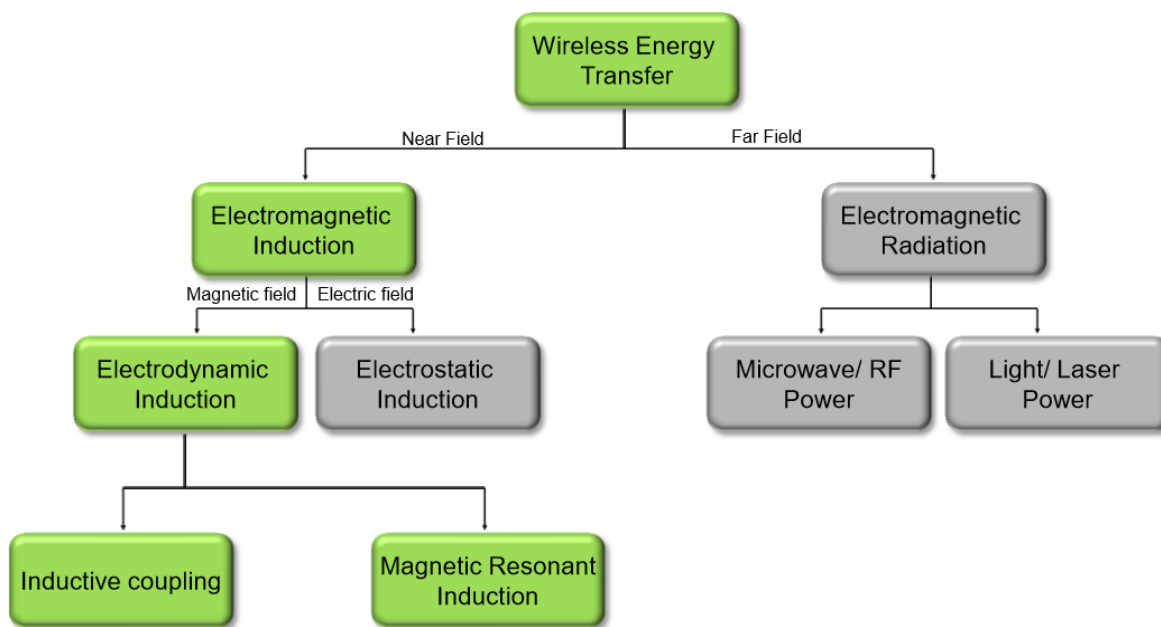
Η WPT που παρουσιάζεται στην εικ.12, εκμεταλλεύεται το σήμα φέροντος(carrier) το οποίο και μεταφέρει τη περισσότερη ενέργεια ενώ τυχόν εφαρμογή κωδικοποιήσεων μειώνει την εκπεμπόμενη ενέργεια. Για την περίπτωση της φόρτισης του Drone της μεταπτυχιακής διατριβής, επιλέχθηκε η μικροκυμματική μέθοδος, με χρήση συχνότητας 900 Mhz, λόγω της αυξημένης απόστασεως και των συνεπαγόμενων απωλειών ελευθέρου χώρου, του μειωμένου μεγέθους

διατάξεων, του μειωμένου κόστους και της ενδεχόμενης μελλοντικής εκμετάλλευσης ελεύθερων ραδιοκυμάτων από άλλες πηγές.



Εικόνα 12, Τοπολογία Ρεκτένα, ITU-R SM.2392-0 2016 :28

Στην Εικόνα 13, παρουσιάζονται σε μορφή δενδροδιαγράμματος οι διάφορες μέθοδοι ασύρματης μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και η σχέση μεταξύ τους.



Εικόνα 13, Κατηγορίες Ασύρματης Μεταφοράς Ενέργειας, Texas Instruments

Στον πίνακα 3, που ακολουθεί παρουσιάζονται οι διάφορες τεχνικές και η συνήθης χρησιμοποίησή τους.

Technology	Range	Directivity	Frequency	Antenna devices	Current and/or possible future applications
Inductive coupling	Short	Low	Hz – MHz	Wire coils	Electric tooth brush and razor battery charging, induction stovetops and industrial heaters.
Resonant inductive coupling	Mid-	Low	kHz – GHz	Tuned wire coils, lumped element resonators	Charging portable devices (Qi), biomedical implants, electric vehicles, powering buses, trains, MAGLEV, RFID, smartcards.
Capacitive coupling	Short	Low	kHz – MHz	Metal plate electrodes	Charging portable devices, power routing in large-scale integrated circuits, Smartcards, biomedical implants. ^{[4][5][6]}
Magneto dynamic coupling	Short	N.A.	Hz	Rotating magnets	Charging electric vehicles, biomedical implants.
Microwaves	Long	High	GHz	Parabolic dishes, phased arrays, rectennas	Solar power satellite, powering drone aircraft, charging wireless devices
Light waves	Long	High	≥THz	Lasers, photocells, lenses	Charging portable devices, powering drone aircraft, powering space elevator climbers.

Πίνακας 1, Τεχνικές και Χρήση WPT, www.wikipedia.com

Κεφάλαιο 3

Κεραίες

Η σημασία των κεραιών στην ορθή και αποτελεσματική διάδοση των ραδιοκυμάτων είναι καθοριστική, καθώς αποτελούν το κύριο μέσο διάδοσης και κατεύθυνσης της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Η απόδοση των κεραιών, εξαρτάται άμεσα από τα χαρακτηριστικά τους, μεταξύ των οποίων, τα υλικά κατασκευής, το μέγεθος, το κέρδος, η κατευθυντικότητα, η διαμόρφωση και το σχήμα [8].

Ο τύπος του Friis(Εικ.14) μπορεί να μας βοηθήσει να υπολογίσουμε τη συνολική λαμβανόμενη ενέργεια που μας απασχολεί:

Απώλεια Ελεύθερου Χώρου (Free-Space Loss)

The Friis Equation

Friis transmission formula: καθορίζει την απώλεια ελεύθερου χώρου μεταξύ δύο κεραιών κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες

Απώλεια διαδρομής
(Propagation loss):

$$\frac{P_r}{P_t} = G_a G_b \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2$$

Κέρδος κεραιάς εκπομπής, G_t Κέρδος κεραιάς λήψης, G_r Μήκος κύματος λ
Απόσταση μεταξύ κεραιών r

Σε πρακτικές συνθήκες ελεύθερου χώρου, η λαμβανόμενη ισχύς μπορεί να είναι μικρότερη από ότι προβλέπεται πιο πάνω εάν η πόλωση μεταξύ των κεραιών δεν είναι η ίδια

Εικόνα 14, Διαφάνειες Τηλεδιασκέψεων ΣΑΕ 611

Συνεπώς, μετατρέπεται σε:

=

$$\lambda^2 Gr^2 Gt^2 4\pi D^2 = \frac{ArAt}{Pt}$$

Όπου **P** η συνολική λαμβανόμενη ισχύς
λ το μήκος κύματος
Gr και **Gt** τα κέρδη των κεραιών
D η απόσταση μεταξύ Δέκτη/Πομποδέκτη
Ar και **At** η ενεργή επιφάνεια κεραίας
Pt η λαμβανόμενη ισχύς

Η σχέση (3.1) αποδικνύει ότι, μεγαλύτερο μήκος κύματος και κατ'επέκταση χαμηλότερη συχνότητα, αυξάνει εκθετικά στο τετράγωνο την ισχύ και αντίστροφα τις απώλειες. Ως εκ τούτου, η χρήση χαμηλότερων συχνοτήτων φαίνεται σε πρώτο στάδιο υποβοηθητική.

Από τις εξισώσεις διαπιστώνεται επίσης, ότι επλέκονται και άλλοι παράγοντες, όπως η απόσταση (**D** ή **r**), της οποίας καθε διπλασιασμός επιφέρει υποτετραπλασιασμό των απωλειών, αλλά και των κερδών των κεραιών (**Gt, Gr**), που με την αύξηση τους πολλαπλασιάζουν εκθετικά στο τετράγωνο την ισχύ, ενώ με το γινόμενο των δύο όπως φαίνεται στη σχέση (3.1), μπορούμε να μιλάμε για διπλό εκθετικό πολλαπλασιασμό.

Υπάρχουν και παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τη λαμβανόμενη ισχύ, που δεν περιγράφονται από τη βασική σχέση του Friss, όπως η πολικότητα, η οποία σε πολυπλοκότερα περιβάλλοντα, επηρεάζει σημαντικά τη λαμβανόμενη ισχύ και θα αναλυθεί στη συνέχεια.

Κύρια Χαρακτηριστικά Κεραιών

Τα κύρια χαρακτηριστικά των κεραιών αναφέρονται στο [8]. Αποτελούν βασικούς παράγοντες αποδοτικότητας στα συστήματα WPT-MPT και χρήζουν πολύ προσεγμένης διαχείρισης, καθώς οι απαιτήσεις ενέργειας για μεταφορά σημάτων στις τηλεπικοινωνίες είναι ουσιαστικά αμελητέες σε σχέση με τα απαιτούμενα επίπεδα ισχύος, για υλοποίηση ασύρματης μεταφοράς ενέργειας. Ανεξάρτητα όμως από το γεγονός αυτό, κατά την εξέλιξη της διατριβής, θα μας απασχολήσουν και τόσο μικρές ποσότητες ενέργειας καθώς, λόγω κυρίως των ισχύοντων περιορισμών στις ασύρματες εκπομπές, επιβάλλεται μοντελοποίηση σε αρκετά μικρότερες κλίμακες. Αυτό, δεν αναιρεί την ακρίβεια και την προσοχή με την οποία θα πρέπει να αντιμετωπίζονται τα εμπλεκόμενα στην WPT μεγέθη, όπως αναλύθηκε προηγουμένως, αλλά ούτε και αποτελεί μέτρο σύγκρισης με τα απαιτούμενα επίπεδα ενέργειας στον τομέα των τηλεπικοινωνιών καθώς, στην WPT, μας απασχολεί πολύ περισσότερο η ισχύς των σημάτων, ενώ στις τηλεπικοινωνίες κυρίως η ποιότητα.

Σημαντική χαρακτηριστική μέτρηση στα συστήματα WPT, αποτελεί το VSWR/SWR (voltage signal wave resistance), το οποίο αποτελεί τη σχέση που καταδικνύει την ικανότητα ταιριάσματος (matching) της αντίστασης διάδοσης σημάτων (impedance), μεταξύ των γραμμών ραδιοδιάδοσης και της κεραίας. Σχετίζεται με τον συντελεστή ανάκλασης (**S**) ως ακολούθως:

Σε κάθε δίκτυο-ζεύξη απαιτείται ταίριασμα(matching) των χαρακτηριστικών αντιστάσεων(impedance) των κυκλωμάτων που το συνθέτουν, ώστε να μεταδίδεται αποδοτικά το σύνολο της ενέργειας από άκρο σε άκρο. Η ασυμφωνία χαρακτηριστικών αντιστάσεων σε ένα δίκτυο, κύκλωμα ή ζεύξη προκαλεί απώλειες(επιστροφές) εξίσου σημαντικές με τις αντιστάσεις, που έχουν ως αποτέλεσμα, τη χαρακτηριστική μείωση της συνολικής αποδοτικότητας του συστήματος. Το S11, αφορά συντελεστές ανάκλασης δικτύων (Γ ή S) και στην περίπτωση αυτή, ερμηνεύεται ως τα ανακλώμενα κύματα μιας κεραίας έναντι της ίδιας, δηλαδή το ποσοστό της ενέργειας η οποία ανακλάται (επιστρέφεται και δεν ακτινοβολείται) από τη κεραία σε σχέση με το ποσοστό που της προσφέρεται. Η σχέση μεταξύ VSWR και S11(ή Γ) είναι:

V

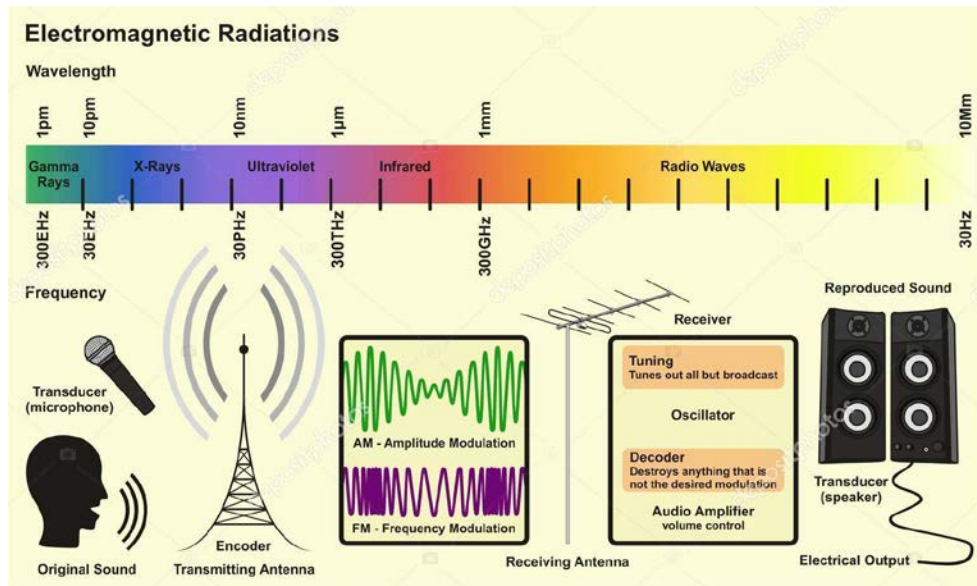
Όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.4) το VSWR έχει πάντοτε τιμή θετική και ελάχιστη τιμή το ραία ακτινοβολείται(100%), οπότε και παρουσιάζεται το επιθυμητό μηδενικό ποσοστό ανακλάσεων(ιδανική κατάσταση). Το VSWR συνήθως υπολογίζεται σε συνδυασμό με το επιδιωκόμενο εύρος ζώνης λειτουργίας της υπό εξέταση κεραίας, καθώς η συμπεριφορά των κεραίων, παρουσιάζει μη γραμμικές συμπεριφορές, σε σχέση με το εύρος ζώνης λειτουργίας. Ένα φανταστικό γραφικό υπολογισμού που χρησιμοποιείται ευρέως για την οπτική απεικόνιση του VSWR είναι το Smith Chart το οποίο και θα συναντήσουμε στη συνέχεια. Για να καταστεί πλήρως αντιληπτή η αντιστοιχία τιμών και η ορθότητα αναφοράς μεταξύ των εμπλεκόμενων τιμών και ποσοστών, παρατίθεται πίνακας αυτόματου υπολογισμού επιστημονικής ιστοσελίδας, όπου το ποσοστό ανακλώμενης ενέργειας αναφέρεται ως ξεχωριστή μέτρηση αλλά και σε λογαριθμική μορφή, όπως και η απώλειες ασυμφωνίας.

Enter VSWR:	Reflection Coefficient Γ	Reflected Power (%)	Reflected Power (dB)	Mismatch Loss (dB)
2 Calculate!	0.33	11.1	-9.54	0.51

Πίνακας 2, Αυτόματος Υπολογιστής Επιστημονικής Ιστοσελίδας www.antenna-theory.com

3.2 Συχνότητα Λειτουργίας

Το μήκος κύματος(λ) εξαρτάται από τη συχνότητα όπως παρουσιάζεται στην εικ.15 και τη σχέση (3.3). Είναι αυτό, που επηρεάζει σημαντικά τις απώλειες. Επηρεάζει όμως και το μέγεθος μιας κεραίας, καθώς με μια τρίτη αναδρομή στη σχέση(4.1), αντιλαμβανόμαστε ότι το A(ενεργή επιφάνεια κεραία [9]ς) αντικαθιστά το λ στη διπλανή τροποποιημένη σχέση. Ο λόγος είναι απλός, καθώς το A προφανώς σχετίζεται με το λ . Υπολογίζεται δε με τη σχέση (3.2) και αποτελεί ουσιαστικά τη σχέση από την οποία προκύπτει ο υπολογισμός του κέρδους μιας κεραίας.



Εικόνα 15, Το Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα και τα Μήκη Κύματος(λ), <https://gr.depositphotos.com>

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G = \frac{c^2}{f^2} \times \frac{G}{4\pi}$$

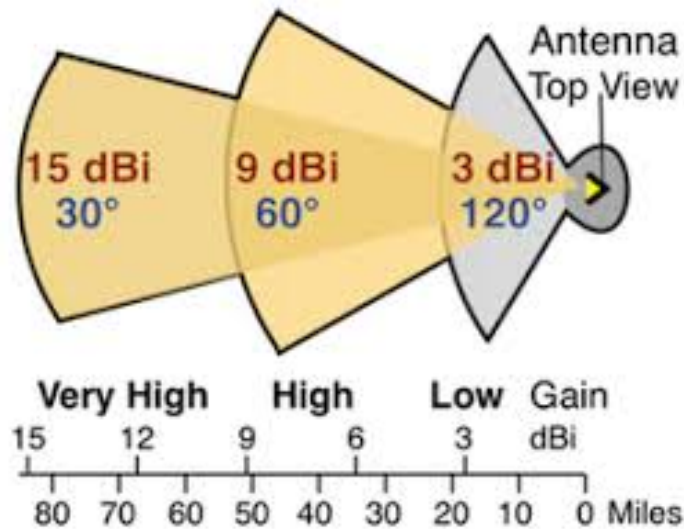
Όπου

$$\lambda = c/f \text{ με } c = 3 \times 10^8 \text{ (ταχ. φωτός)}$$

Κέρδος Κεραιών

Η σημασία των παραγόντων κέρδους, G_t (πομπού) και G_r (δέκτη), σε σχέση με τις απώλειες ελευθέρου χώρου αναλύθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, ενώ υπολογισμός του κέρδους διενεργείται με τη σχέση(3.2) η οποία εξαρτάται κατά κύριο παράγοντα από την διάμετρο(A) της κεραίας και τη συχνότητα(f) ή το μήκος κύματος(λ). Ως κέρδος κεραίας, καλείται η σχέση της συγκέντρωσης της ισχύος σε τομέα, συγκριτικά με την ισχύ που εκπέμπεται από μια ισοτροπική κεραία ή άλλως σε αζιμουθιακό τομέα εύρους 360 μοιρών. Συνήθως, μετρείται σε μονάδες db ή dBi, καθώς αποτελεί λόγο ισχύος και όσο μεγαλύτερη είναι τόσο στενότερη η γωνία της δέσμης των ακτίνων, φαινόμενο που στη ραδιοκυματική ονομάζεται κατευθυντικότητα.

Στην Εικ.16, φαίνεται η σχέση του κέρδους κεραίας(G) με την κατευθυντικότητα και αποδοτικότητα, ενώ ταυτόχρονα διαπιστώνεται η σημασία των 2 παραγόντων στην αύξηση της εμβέλειας κάλυψης. Κάθε υποδιπλασιασμός της γωνιάς συνεπάγει εκθετική αύξηση κέρδους.



Εικόνα 16, Κέρδος Κεραίας και Κατευθυντικότητα, www.electronics.stackexchange.com

Η υψηλή κατευθυντικότητα των ακτίνων, είναι αυτή που προσφέρει ουσιαστικά την υψηλή συγκέντρωση ενέργειας στο δέκτη. Η επιτευξη συγκέντρωσης του συνόλου της εκπεμπόμενης ενέργειας, σε μικρή επιφάνεια κεραίας, δύναται αφενώς να καταστεί πλήρως εκμεταλλεύσιμη απο το δέκτη και αφετέρου μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε μικρότερες και ταυτόχρονα ελαφρύτερες επιφάνειες κεραιών, όπως επιβάλλουν οι συνθήκες φόρτισης ενός αεροχήματος.

Ακτινοδιαμόρφωση

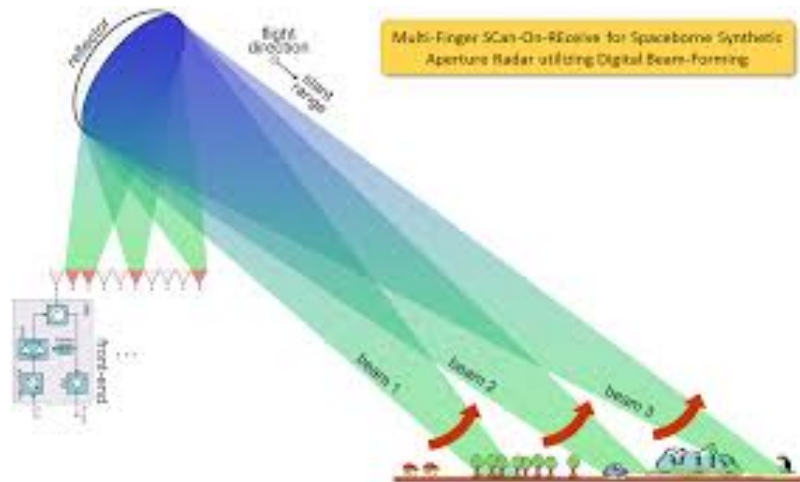
Είναι γνωστά τα οφέλη της ακτινοδιαμόρφωσης, όπου συνήθως η χρήση πολλαπλών στοιχειοκεραιών με εφαρμογή μετατοπιστών φάσης σε κάθε στοιχείο ή κύκλωμα δικτύου ακτινοδιαμόρφωσης, όπως αυτό που παρουσιάζεται στην εικ.17, επιτυγχάνεται συγκεντρωτική παραλαβή της δέσμης ακτίνων στο δέκτη. Για να επιτευχθεί η ακτινοδιαμόρφωση, απαιτείται η γνώση του παράγοντα r (απόσταση μεταξύ στοιχειοκεραίας πομπού και σημείου λήψης του δέκτη), των δύο γωνιών (θ και φ) μεταξύ τους και το D (directivity- r, θ, φ) που αποτελεί το μοτίβο διάταξης στοιχειοκεραιών του πομπού.

Λόγω της δυσκολίας υπολογισμού του μοτίβου είναι δυνατή η κατακράτηση της τιμής της απόστασης (r) και ο υπολογισμός της ακτινοδιαμόρφωσης $E(\theta, \varphi)$ με τη βοήθεια του Array Fac-

$$E(\theta, \varphi) = D(\theta, \varphi) A(\theta, \varphi)$$

Ο συντελεστής διάταξης A (array factor) εξαρτάται από τη θέση, το πλάτος και τη φάση των στοιχειοκεραιών και όχι στο τύπο τους.

Ιδιαίτερη αξία, κατέχει η συμφασική αξιοποίηση των ραδιοκυμάτων, καθώς λανθασμένη ή



Εικόνα 17, Πολυδιαυλικός Ανιχνευτής για Διαστημικό Ραντάρ Συνθετικής Διάταξης με Χρήση Ψηφιακής Ακτινοδιαμόρφωσης www.ike.kit.edu

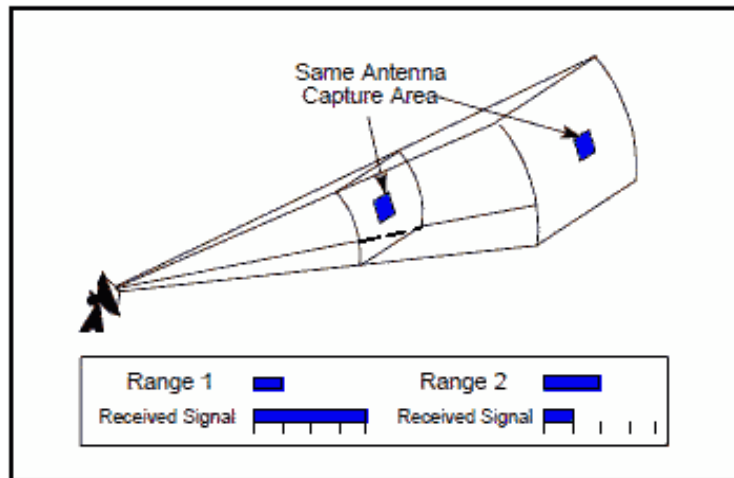
μη ακριβής διαμόρφωση οδηγεί σε καταστροφική παρά αποδοτική συμβολή των ραδιοκυμάτων [3]. Η διαδικασία κατασκευής και ρύθμισης συμφασικών διατάξεων περιλαμβάνει εξειδικευμένες τεχνικές, κατάλληλο λογισμικό και υψηλό κόστος. Η τεχνολογίες αυτές υλοποιούνται στα πλέον σύγχρονα ραντάρ σάρωσης και καθοδήγησης αντιαεροπορικών συστημάτων, μαχητικών αεροσκαφών, ναυτικών μονάδων ακριβείας, αλλά και στις δορυφορικές διαστημικές επικοινωνίες. Τα γνωστά αντιαεροπορικά συστήματα PATRIOT (Phased Array TRack To Inter-χεώς μεταβαλλόμενων μεθόδων σάρωσης σε τεράστιες αποστάσεις με πολύ υψηλά κέρδη κεραιών που πλησιάζουν ακόμα και τα 50dBi [10]

Με το πέρασμα του χρόνου, την ωρίμανση των τεχνολογιών και την ευρύτερη παραγωγή υλικών, οι τεχνικές αυτές καθίστανται ευρύτερα διαθέσιμες και οικονομικά πιο προσιτές, ενώ η κατασκευή απλών συμφασικών διατάξεων μικροκεραιών, δεν φαίνεται να είναι απαγορευτική στις μέρες μας.

Πυκνότητα Ισχύος

Αποτελεί σημαντικό παράγοντα στα συστήματα MPT, καθώς αφορά στη λήψη εκ μέρους της κεραίας δέκτη, της μέγιστης δυνατής εναπομείνουσας ισχύος, σε δεδομένη απόσταση. Το υψηλό κέρδος κεραιών και η ακτινοδιαμόρφωση, επιβάλλουν ακριβή στόχευση του δέκτη, προκειμένου να ληφθεί η μέγιστη δυνατή ισχύς σε περιορισμένο σημείο. Τα υψηλής απόδοσης συστήματα MPT, που είναι ικανά να τροφοδοτούν μέσες τουλάχιστον ενεργειακές ανάγκες (70-W

α
π
α
ι
τ
ο
ύ
ν
π



Εικόνα 18, Πυκνότητα Ισχύος σε Σχέση με την Απόσταση, www.rccafe.com

Συνεπώς, καθίσταται εύκολα αντιληπτό ότι, για την επίτευξη της υψηλότερης δυνατής πυκνότητας, θα πρέπει να υπολογίζεται η γωνία που σχηματίζεται από το κέρδος(κατευθυντικότητα) στην εκάστοτε απόσταση του δέκτη και να καταβάλλεται προσπάθεια όπως αυτή κατανέμεται πλήρως, στη διαθέσιμη επιφάνεια της κεραίας δέκτη. Αυτό φυσικά θα απαιτήσει μια ισορροπία μεταξύ των 2 παραμέτρων που περιορίζεται και από τα διαθέσιμα μεγέθη και αποστάσεις και θα αναλυθεί στη συνέχεια.

Πολικότητα

Η πολικότητα κεραιών και ραδιοκυμάτων, αφορά στα διαφορετικά επίπεδα διάδοσης των συνισταμένων διανυσμάτων του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Πέραν της συνήθους γραμμικής πόλωσης(οριζόντιας ή κάθετης) κατά τις οποίες τα δύο πεδία ως γνωστό είναι κάθετα μεταξύ τους, υπάρχουν και οι περιπτώσεις της κυκλικής και ελλειπτικής πόλωσης, όπου τα δύο πεδία διαφέρουν σε φάση κατά 90° μεταξύ τους.

Μεταξύ διαφορετικών πολώσεων γραμμικά πολωμένων κεραιών και μεταξύ τους κλίση γωνίας φ , η απόδοση μετάδοσης χαρακτηρίζεται από τον συντελεστή απωλειών πολικότητας(PLF), με τη σχέση:

$$PLF = \cos^2 \varphi$$

Αντίστοιχα, η απώλεια λήψης μεταξύ μιας γραμμικά πολωμένης κεραίας, σε σχέση με μια κυκλικά πολωμένη, χαρακτηρίζεται από τη σχέση (4.7), ανεξαρτήτως κλίσης.

$$PLF(\text{Κάθετη προς Κυκλική}) = 0.5 = -3dB$$

Με γνώμονα τα πιο πάνω, οι συντελεστές των εξισώσεων (3.6) και (3.7) μπορούν να εισαχθούν κατά περίπτωση στη σχέση του Friis (3.1), για συνυπολογισμό των ολικών απωλειών ή και της λαμβανόμενης ισχύος, σε περιπτώσεις με διαφορετική πολικότητα.

Συνεπώς, καθίσταται αντιληπτό το γεγονός ότι η επιδίωξη χρησιμοποίησης κυκλικής πόλωσης, στις περιπτώσεις μετακίνησης των κεραιών σε διάφορα επίπεδα, αποτελεί προϋπόθεση αποδοτικής μετάδοσης και αποκλείει τις παραπάνω απώλειες. Η επιδιωκόμενη πολικότητα αποτελεί και οδηγό για την επιλογή των κατάλληλων τύπων κεραιών, γεγονός που θα διαπιστωθεί στη συνέχεια.

Πλέον των παραπάνω, θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι κυκλικά πολωμένες κεραιές χαρακτηρίζονται από δεξιόστροφη και αριστερόστροφη πόλωση. Η δεξιόστροφη, παρουσιάζει την ιδιότητα ανακλώμενη, να μετατρέπεται σε αριστερόστροφη. Έτσι, αποτρέπεται ο επηρεασμός από διάφορες ανακλάσεις που βρίσκονται στο περιβάλλον του οπίσθιου μέρους της κεραιάς, καθώς αυτές δεν λαμβάνονται από την κεραιά και δεν προκαλούν παρεμβολές.

Πρωτότυπες Κεραιές

Στα πλαίσια των αναγκών της διατριβής σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν τρία είδη κεραιών, δύο ελικοειδείς και μια τυπωμένη επίπεδη κεραιά. Ο ανιχνευτής ιπτάμενου στόχου λειτουργεί στα 5.8 GHz και χρησιμοποιεί ένα δέκτη που αποτελείται από τέσσερις(4) ελικοειδείς κεραιές, οι οποίες υλοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τρισδιάστατο εκτυπωτή για να επιτευχθεί η ακριβής απόσταση μεταξύ των διαδοχικών σπειρών και να διατηρούνται αμετάβλητα κατά την μηχανική περιστροφή του ανιχνευτή. Για την μεταφορά ισχύος χρησιμοποιήθηκε η συχνότητα της. Στην ενότητα παρουσιάζονται οι σχεδιαστικές λεπτομέρειες και η απόδοση των τριών(3) τύπων κεραιών που υλοποιήθηκαν για τις ανάγκες της μεταπτυχιακής διατριβής.

.1 Ελικοειδής Κεραιά Συστήματος Εντοπισμού

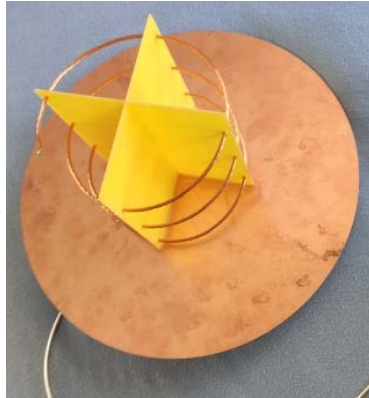
Μια κεραιά με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και λιγότερο γνωστή, είναι η ελικοειδής κεραιά που φαίνεται στη εικ.19. Διαθέτει υψηλή κατευθυντικότητα, κυκλική δεξιόστροφη πόλωση, σε συνδυασμό με μειωμένο βάρος - διαστάσεις και χαρακτηρίζεται από απλότητα στην κατασκευή και χαμηλό κόστος. Οι λόγοι αυτοί, οδήγησαν στην επιλογή σχεδίασης και ένταξης της στις πειραματικές δοκιμές για τις περιπτώσεις των κεραιών του ανιχνευτή, ο οποίος αναλύεται στο Κεφ.4. Η εν λόγω κεραιά αποτελείται από χάλκινο καλώδιο ανάλογης διαμέτρου, βάση περιέλιξης εκτυπωμένη σε τρισδιάστατο εκτυπωτή για εξασφάλιση ακρίβειας στις αποστάσεις περιέλιξης των χάλκινων σπειρών, χάλκινη κυκλική πλάκα ως βάση για καλύτερη αντιμετώπιση των επιστρεφόμενων ανακλάσεων. Τα λοιπα στοιχεία θα αναλυθούν στο Κεφ.4.



Εικόνα 19, Υλικά Κατασκευής και Ελικοειδής Κεραιά Ραδιοεντοπιστή Drone 5.8 GHz

3.7.2 Κεραία Πομπού Συστήματος Μεταφοράς Ισχύος

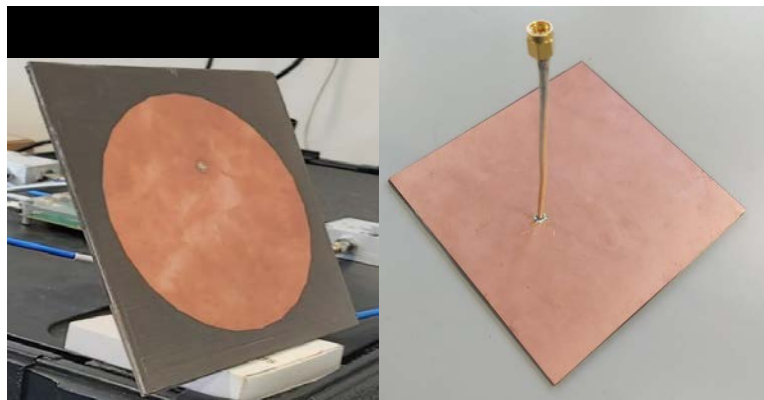
Κατά όμοιο τρόπο, για τις ανάγκες του πομπού μεταφοράς ισχύος επιλέχθηκε η ελικοειδής κεραία της Εικ.20 για τη συχνότητα των 900MHz. Η χαμηλότερη συχνότητα απαίτησε μεγαλύτερες διαστάσεις κεραίας ενώ τα υλικά και η τεχνική κατασκευής παραμένουν τα ίδια με το 3.7.1 και θα αναλυθούν περαιτέρω στο Κεφ. 5 μαζί με το σύστημα μεταφοράς ισχύος.



Εικόνα 20, Ελικοειδής Κεραία Πομπού Φόρτισης 900MHz

3.7.3 Κεραία Δέκτη Συστήματος Μεταφοράς Ισχύος

Οι κεραία στην Εικ. 21, είναι οι λεγόμενη τυπωμένη κεραία και χαρακτηρίζεται από σχετικά καλές επιδόσεις σε συνδυασμό με πολύ μικρές διαστάσεις και χαμηλό κόστος. Η δυνατότητα ψηφιακής εκτύπωσης ή χάραξης κυκλωμάτων σε λεπτές πλάκες χαλκού και άλλων αγωγίμων μετάλλων ή αγωγίμων πλακών PCB(Printed Circuit Boards), με ειδικούς εκτυπωτές, χημική επεξεργασία ή χάραξη, καθιστά πλέον σχετικά εύκολη και προσιτή την κατασκευή τους. Η προσεκτική και εξειδικευμένη μελέτη - σχεδίαση κατασκευής, σε συνδυασμό με τις ιδιότητες των μονωτικών υλικών που χρησιμοποιούνται για τη γείωση,



Εικόνα 21, Υλικά Κατασκευής και Τυπωμένη Κεραία Δέκτη 900MHz

αποτελούν προϋπόθεση για την επίτευξη υψηλών επιδόσεων. Η κυκλική εκτυπωμένη κεραία, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί για τις ανάγκες της πειραματικής δοκιμής, ως κεραία δέκτη

φόρτισης, προσαρμοσμένη στο Drone[Εικ 62], όπως αναλύεται στο Κεφ. 6. Οι πολύ μικρές διαστάσεις, η κυκλική πολικότητα, το μειωμένο βάρος σε συνδυασμό με την σχετικά ικανοποιητική κάλυψη τομέα και κέρδος, αλλά και η δυνατότητα τυχόν μελλοντικής σύνθεσης πολλαπλής διάταξης κεραιοστοιχείων προς αύξηση του κέρδους, επίτευξη κατευθυντικότητας και συνδυασμό MIMO, ικανοποιεί επαρκώς τις συνθήκες χρήσης και περαιτέρω εκμετάλλευσης των χαρακτηριστικών της.

Κεφάλαιο 4

Ανίχνευτης Ιπτάμενου Στόχου

Η μέθοδος ανίχνευσης στόχου, αποτελεί πρωταρχικό παράγοντα για την επίτευξη, της ασύρματης φόρτισης, καθώς στις περιπτώσεις όπου ο δέκτης κινείται, θα πρέπει να ανιχνεύεται και να ακολουθείται με επαρκή ακρίβεια, προκειμένου οι στενές δέσμες ακτίνων που εκπέμπονται, να κατευθύνονται αποκλειστικά σ' αυτόν. Για την περίπτωση των δοκιμών, επιδιώχθηκε η αποκόμιση υψηλού κέρδους κεραιών εντοπισμού, ώστε να εξασφαλιστεί περισσότερη ακρίβεια και ορθός διαχωρισμός στον εντοπισμό της κατεύθυνσης, χωρίς όμως να αφήνονται κενοί τομείς ανίχνευσης.

Οι μέθοδοι εντοπισμού θέσης, πέραν των ραντάρ και του GPS, απασχολούν έντονα τους ερευνητές τα τελευταία χρόνια, κυρίως για τον εντοπισμό των χρηστών και εξυπηρέτηση - εξατομίκευση των αναγκών τους σε ένα περιβάλλον ανεπαίσθητων υπολογισμών (ubiquitous computing). Επιπρόσθετα, καθίστανται χρήσιμες στον υπολογισμό της θέσης των κεραιών, ώστε αυτές ή οι ακτίνες, να μπορούν να κατευθυνθούν με ακρίβεια.

.1 Μέθοδοι Ανίχνευσης και Εντοπισμού

Οι μέθοδοι ανίχνευσης και εντοπισμού, εδράζονται σε 3 βασικές μετρήσεις [12]:

- Τ
- η Το χρόνο άφιξης των σημάτων TOA (Time of Arrival)
- Τη γωνιά άφιξης των σημάτων AOA (Angle of Arrival)
- λ

Το RSSI, αποτελεί τη μέτρηση της ισχύος εκπομπής και περιλαμβάνει το σύνολο των σημάτων και παρεμβολών του αεροχήματος και περιβάλλοντος στην επιλεχθήσα συχνότητα.

Θ προσδιορισμός θέσεως με τις αναφερόμενες στη βιβλιογραφία μεθόδους RSSI, χρησιμοποιεί τα στοιχεία θέσεως γνωστών και σταθερών σημείων εκπομπής σήματος και την Ευκλείδεια σχέση [13], για υπολογισμό του πλησιέστερου σημείου ή της ακριβούς θέσης. Για προσδιορισμό θέσης δύο επιπέδων χρειάζονται τρία σημεία, ενώ για τρισδιάστατο προσδιορισμό θέσης, είναι αναγκαίες μετρήσεις από τέσσερα τουλάχιστον στοιχεία. Περισσότερα στοιχεία επαυξάνουν την ακρίβεια προσδιορισμού θέσης.

ν

Πια τις ανάγκες της μεταπτυχιακής διατριβής, επινοήθηκε μια πρωτότυπη συνδυαστική μέθοδος εντοπισμού. Η προαναφερθείσα μέθοδος, αποτελεί καινοτομία, καθώς οι βιβλιογραφικές αναφορές για τη χρήση του RSSI, περιλαμβάνουν τη συνδυαστική ή αποκλειστική χρήση των μεθόδων του τριμερισμού, τριγωνοποίησης και της Ευκλείδειας εξίσωσης.

χ

ύ

τ

ω

ν

Η παθητική προτεινόμενη μέθοδος ραδιοεντοπισμού, λειτουργεί με απλή συνεχή συγκριτική χρήση του σήματος ισχύος RSSI σε συνδυασμό με τη διαφορική λειτουργία δύο τουλάχιστον δεκτών για κάθε επίπεδο.

Στην περίπτωση αυτή, δεν απαιτείται η υποβοήθηση με λήψη επιπλέον γνωστών παραμέτρων ή σταθερών σημείων, όπως αναφέρεται στο [12], αλλά μέσω του RSSI, εντοπίζεται ο στόχος και ανιχνεύεται δια της συνεχούς σύγκρισης μέσω αλγορίθμου, των ισχυροτέρων σημάτων σε κάθε επίπεδο και κατεύθυνση. Η γωνιά άφιξης, αν και δεν είναι αναγκαία για τη λειτουργία του εντοπιστή, λαμβάνεται αυτούσια μέσω της ακριβούς ανάγνωσης της γωνιάς των σερβομηχανισμών, οι οποίοι καθοδηγούν τις βάσεις στήριξης κεραιών εντοπισμού, για ακοπούς αποστολής των στοιχείων θέσης του στόχου στα οχήματα φόρτισης και μόνο.

Οι λόγοι που επιλέχθηκε η παραπάνω μέθοδος είναι:

- Χαμηλό κόστος
- Λειτουργία σε εσωτερικά περιβάλλοντα και χωρίς υποβοήθηση GPS
- Δυνατότητα εφαρμοσμένης σπουδής ιδιαίτερων χαρακτηριστικών κεραιών λήψης
- Δυνατότητα εφαρμοσμένης σπουδής ιδιαίτερων χαρακτηριστικών δεκτών, διαφορισμού κεραιών, αυτόματης αναζήτησης καναλιού με χρήση έξυπνων ηλεκτρονικών ανοικτού κώδικα χαμηλού κόστους(Arduino)
- Δυνατότητα επέκτασεων της διάταξης ραδιοεντοπισμού
- Παθητική Λειτουργία(χωρίς εκπομπές)

Τεχνική Περιγραφή - Λειτουργία Ανιχνευτή

Ο ανιχνευτής ιπτάμενου στόχου που φαίνεται στην εικ. 22β, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε με μικρό βάρος(250gr) και διαστάσεις 20X20X20εκ, ώστε να καθίσταται εύκολη η προσαρμογή του σε αυτόνομο όχημα. Είναι ικανός να εντοπίζει και να ανιχνεύει ιπτάμενο αερόχημα το οποίο κινείται με ταχύτητα μέχρι και 80 χαω, με ακρίβεια 5°. Αν και σχεδιάστηκε για ανάγκες ανίχνευσης σε αποστάσεις μέχρι 25μ, οι δοκιμές απέδειξαν ότι μπορεί να ανταποκριθεί σε αποστάσεις εκατοντάδων μέτρων.

Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην εκμετάλλευση της ισχύος των λαβανομένων σημάτων RSSI που εκπέμπονται από το αερόχημα για τη μετάδοση του σήματος ζωντανής εικόνας στο χειριστή. Συγκεκριμένα μια διάταξη τεσσάρων κατευθυντικών κεραιών με υψηλό κέρδος ενωμένες σε αντίστοιχο αριθμό δεκτών με υψηλή ευαισθησία, καλύπτει την οριζόντια και κατακόρυφη περιοχή σε τομέα 180°. Ένα ζεύγος κεραιών ευθύνεται για την ανίχνευση του οριζόντιου τομέα και το άλλο για τον κατακόρυφο τομέα. Με τη χρήση έξυπνου αλγορίθμου και ενός μικροεπεξεργαστή οι τιμές RSSI των λαμβανομένων σημάτων τυγχάνουν συνεχούς σύγκρισης μεταξύ των δύο κεραιών σε κάθε επίπεδο με την τεχνική του διαφορισμού και δίνονται ανάλογες εντολές στους σερβομηχανισμούς να ακολουθούν συνεχώς το σήμα με την ισχυρότερη ισχύ σε κάθε επίπεδο.

Για την λειτουργία του ραδιοεντοπιστή, επιλέχθηκε η συχνότητα των 5.8 GHz, συχνότητα στην οποία εκπέμπουν τα πλείστα σύγχρονα drones με μέγιστη ισχύ, όπως καθορίζεται από το CE, τα 20dBm.

Τα κύρια μέρη του είναι:

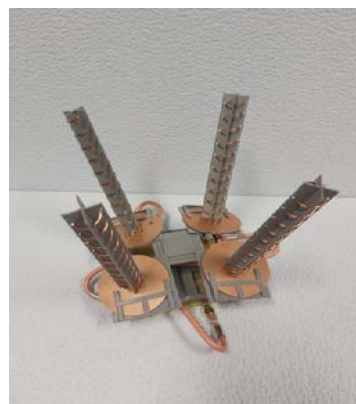
- Βάση Προσαρμογής Κεραιών, Ηλεκτρονικών και Σερβομηχανισμών, Εικ.27

Ηλεκτρονική Πλακέτα Κυκλωμάτων Διασύνδεσης Κεραιών, Δεκτών και Σερβο-μηχανισμών, Εικ.24

- Τέσσερεις(4) Δέκτες TX 5808, Εικ.23, 25
- Δύο(2) Σερβομηχανισμοί Οριζόντιας και Κατακόρυψης Κίνησης, Εικ.27
- Τέσσερεις(4) Ελικοειδείς Κεραίες για συχνότητα 5.8 GHz, Εικ 22β
- Μικροεπεξεργαστής Arduino UNO
- Ξηρό Στοιχείο LiPo 2S 11.3V



(α)

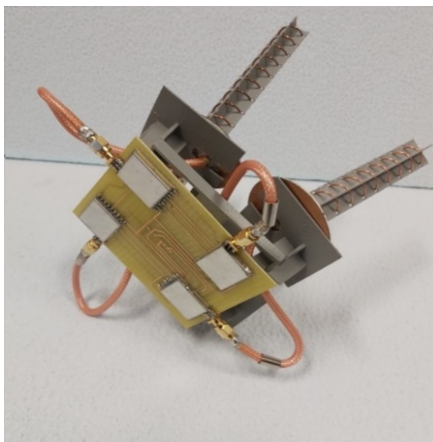


(β)

Εικόνα 22, Διάταξη Ελικοειδών και Κύρια Μέρη Κεραιών Ραδιοεντοπιστή

4.3 Βάση Προσαρμογής Εξαρτημάτων Ανιχνευτή

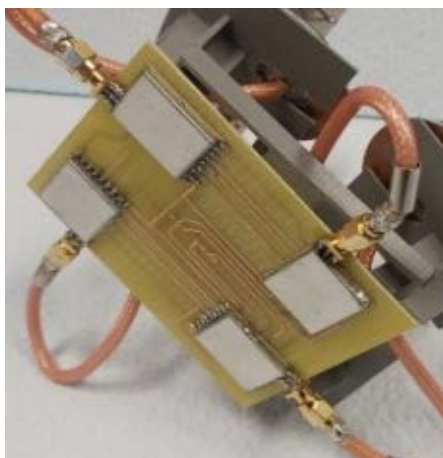
Για την κατασκευή της βάσης στήριξης χρησιμοποιήθηκε τρισδιάστατος εκτυπωτής με βασικό υλικό πλαστικό επαρκούς σκληρότητας και αντοχής, για σταθερή και γεωμετρικά ορθή προσαρμογή των τεσσάρων κεραιών μέσω των κυκλικών ανακλαστήρων τους, όπως φαίνεται στην Εικ.22β. Επιπρόσθετα, το κάτω μέρος της βάσης, σχεδιάστηκε και εκτυπώθηκε κατά τρόπο ώστε να καθίσταται δυνατή η ακριβής προσαρμογή των σερβομηχανισμών οριζόντιας περιστροφής και κατακόρυφου ανύψωσης, αλλά και της πλακέτας κυκλωμάτων, η



Εικόνα 23, Κάτω μέρος Βάσης Ανιχνευτή με πλακέτα κυκλωμάτων διασύνδεσης Δεκτών και Κεραιών οποία περιλαμβάνει τη συνδεσμολογία των τεσσάρων δεκτών, όπως αυτή φαίνεται στην Εικ.

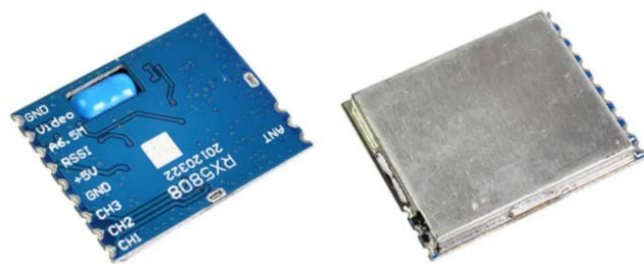
Συγκρότημα Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων Ανιχνευτή

Η ηλεκτρονική πλακέτα εκτυπώθηκε σε εκτυπωτή με χρήση υλικού FR4 και σκοπό έχει την λειτουργική και ορθά δομημένη διασύνδεση των δεκτών, των κεραιών και των σερβομηχανισμών με τον μικροεπεξεργαστή. Πλέον των ανωτέρω περιλήφθηκε κατάλληλη ηλεκτρική διακλάδωση όπως αυτή παρουσιάζεται στην Εικ.24, ώστε να καθίσταται δυνατή η αυτόματη ανίχνευση και επιλογή καναλιού από έκαστο δέκτη, ενέργεια που ρυθμίζεται μέσω του αλγορίθμου στον μικροεπεξεργαστή.



Εικόνα 24, Ηλεκτρική Διακλάδωση PCB Ανιχνευτή

Για τις ανάγκες της λήψης των ραδιοκυμάτων και της τιμής του RSS, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις 8κάναλοι δέκτες TX5808, Εικ.25 που λειτουργούν στη συχνότητα των 5.8GHz και έχουν ευαισθησία -90dBm. Οι δέκτες αυτοί χαρακτηρίζονται από πολύ μικρό μέγεθος και βάρος.



Εικόνα 25, Δέκτες RX 5808 Ραδιοεντοπιστή Πειράματος, www.aliexpress.com

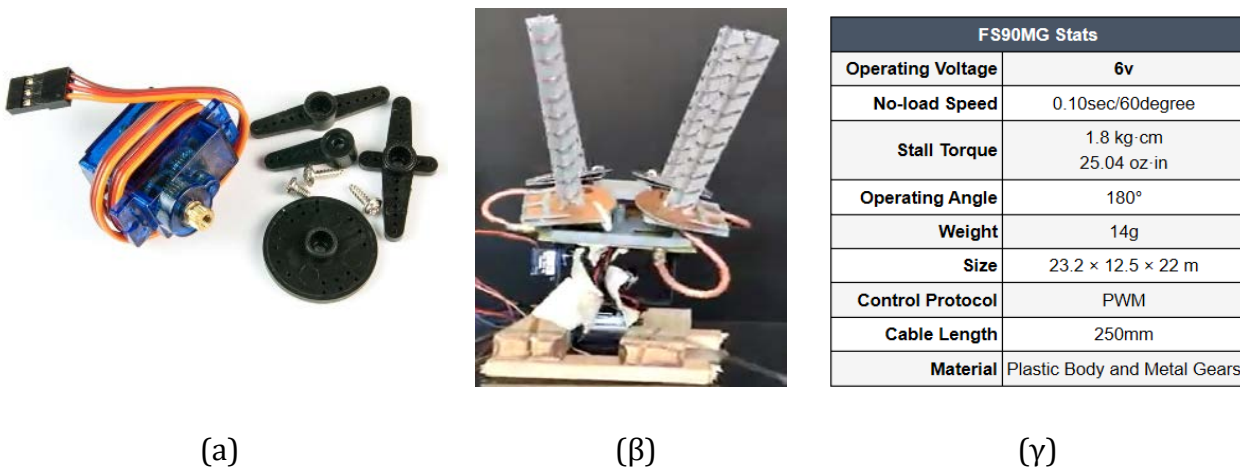
Οι συχνότητες και τα κανάλια λειτουργίας των δεκτών παρουσιάζονται στην Εικ. 26

Channel number	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	
RX frequency(MHz)	5705	5685	5665	5645	5885	5905	5925	5945	
Pin level	CH1	0	1	0	1	0	1	0	1
	CH2	0	0	1	1	0	0	1	1
	CH3	0	0	0	0	1	1	1	1

Εικόνα 26, Συχνότητες Καναλιών Δέκτη RX 5808, www.aliexpress.com

Σερβομηχανισμοί Κίνησης Ανιχνευτή

Οι σερβομηχανισμοί που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι FS90MG[Εικ.27α] έχουν χαμηλές απαιτήσεις τροφοδοσίας, μεταλλικά γρανάζια και διαθέτουν ικανότητα ροπής στρέψης βάρους μέχρι βάση στήριξης κεραιών έτσι ώστε με τη λήψη των σημάτων κατεύθυνσης μέσω του μικροεπεξεργαστή να κατευθύνουν συνεχώς τις κεραιές προς το στόχο και να εξαγάγει η τιμή των οριζοντίων και κατακορύφων γωνιών.



(α)

(β)

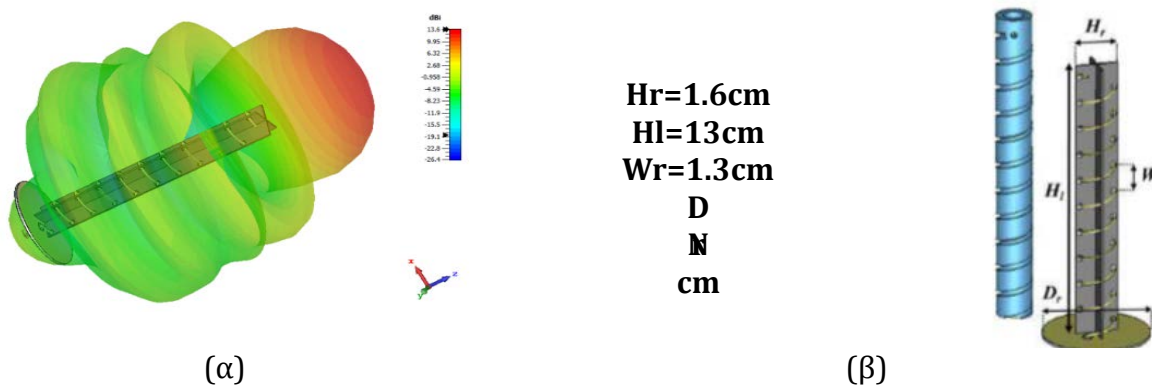
(γ)

Εικόνα 27, σερβομηχανισμοί FS90MG και τεχνικά χαρακτηριστικά

Ελικοειδείς Κεραίες Ανιχνευτή

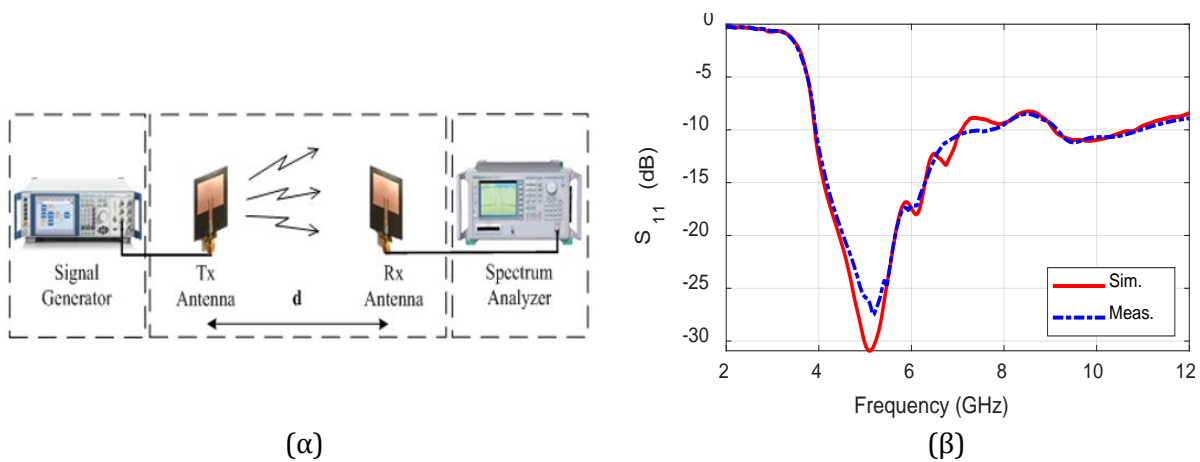
Οι τέσσερις(4) ελικοειδείς κεραίες που παρουσιάζονται στην Εικ.28, σχεδιάστηκαν και εξομοιώθηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού CST Software. Κατασκευάστηκαν με μερική βοήθεια του τρισδιάστατου εκτυπωτή, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση πλαστικών βάσεων περιέλιξης των σπειρωμάτων με υψηλή ακρίβεια ώστε να τηρούνται οι ακριβείς διαστάσεις μεταξύ των σπειρών. Χρησιμοποιήθηκε επίσης για την κοπή των κυκλικών ανακλαστήρων από χαλκό.

Οι κεραίες σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν ώστε να έχουν υψηλό κέρδος, στενήκατευθυντικότητα και ελαφριά κατασκευή σε συνδυασμό με σχετικά μικρές διαστάσεις, ώστε να καθίσταται αφενός δυνατή η προσαρμογή τους στη βάση στήριξης και αφεταίρου η ικανοποιητική ανίχνευση των ραδιοκυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις με κάλυψη τομέα 180μοιρών σε κάθε επίπεδο(οριζόντιο και κατακόρυφο). Έχουν μήκος 13εκ, διάμετρο 1.6εκ, κέρδος 14.5 dBi και βάρος 40 γρ. έκαστη. Για την κατασκευή των σπειρών χρησιμοποιήθηκε καλώδιο χαλκού με διάμετρο 1χιλ, για την κατασκευή του κυκλικού ανακλαστήρα ο οποίος χρησιμεύει για τη στήριξη του ελικοειδούς σπειρώματος και την καλύτερη απορροφητικότητα των ραδιοκυμάτων χρησιμοποιήθηκε πλάκα χαλκού πάχους 1χιλ. Χρησιμοποιήθηκε επίσης προσαρμογέας κλωμάτων. Η τρισδιάστατη απεικόνιση απόδοσης και κέρδους της κεραίας παρουσιάζεται στην Εικ. 28α και οι διαστάσεις στην Εικ. 28β.



Εικόνα 28, Τρισδιάστατη Εξομείωση και Διαστάσεις Κεραίας Ραδιοεντοπιστή

Η σχέση εξομείωσης(κόκκινο) συμφωνίας απόκρισης και μετρηθείσας(μπλέ) S11, παρουσιάζεται στην Εικ 29β και καταδικνύει ότι, για τη συχνότητα των 5.8GHz, η συμφωνία

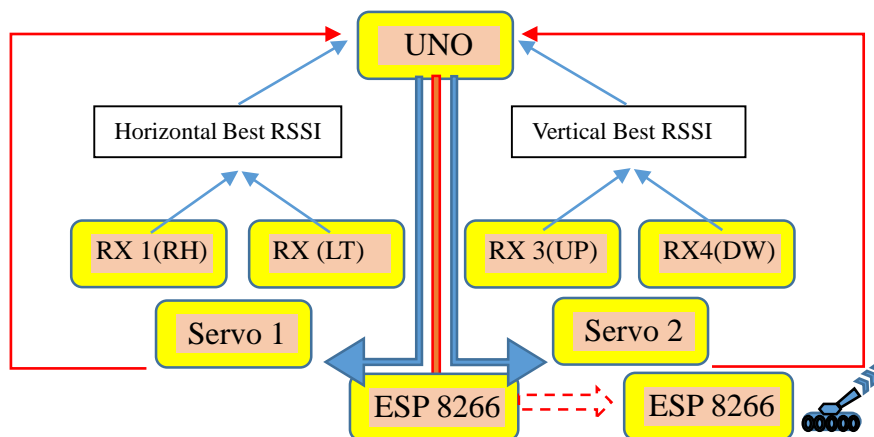


Εικόνα 29, Διάταξη Ελικοειδών Κεραιών Ραδιοεντοπιστή Πειράματος

απόκρισης κυμαίνεται στα -30dB. Το δε μέγιστο εύρος συχνοτήτων στο οποίο παρουσιάζεται ικανοποιητική συμφωνία απόκρισης(-10dB), είναι της τάξεως των 3GHz, γεγονός που αποδικνύει τα άριστα χαρακτηριστικά απόδοσης της κεραίας. Τα παραπάνω επιβεβαιώθηκαν και με εργαστηριακές μετρήσεις με τη χρήση γεννήτριας συχνοτήτων και VNA(Vector Network όπως ήταν αναμενόμενο μικρές αποκλίσεις όπως αυτές φαίνονται στο διάγραμμα της εικ.29β, χωρίς όμως να τροποποιούνται τα χαρακτηριστικά επιδόσεων της κεραίας.

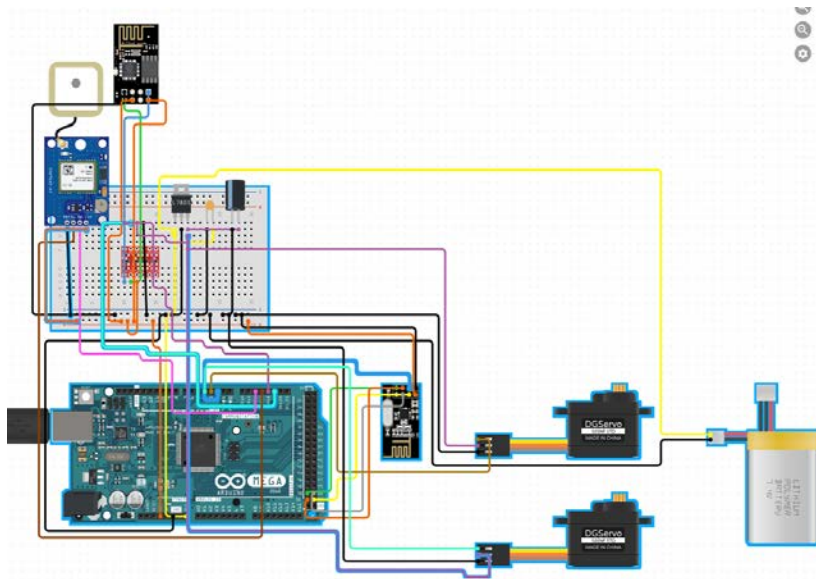
4.7 Λογισμικό Λειτουργίας Ανιχνευτή

Με λογισμικό ανοικτού κώδικα(Arduino IDE) και τη βοήθεια των διαθέσιμων βιβλιοθηκών, συντάχθηκε αλγόριθμος, ο οποίος μέσω της μητρικής(Arduino UNO), επιλέγει αυτόματα το πιο δυνατό κανάλι, συγκρίνει με συνδυασμό διαφορισμού κεραιών τα λαμβανόμενα σήματα από τις τέσσερις κεραιές, σε οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο, και δίνει εντολές στα μοτέρ, να ακολουθούν το πιο δυνατό σήμα σε κάθε κατεύθυνση. Η διαδικασία, παρουσιάζεται στο διάγραμμα της Εικ. 30.



Εικόνα 30, Διάγραμμα Ροής Ενεργειών Ραδιοεντοπιστή Πειραματικής Δοκιμής

Η σχεδίαση, συνδεσμολογία, και η εξομοίωση διενεργήθηκαν με το λογισμικό Cirquino.io και παρουσιάζονται μαζί με τα υλικά, στο διάγραμμα της Εικ. 31.



Εικόνα 31, Συνδεσμολογία Ραδιοεντοπιστή Πειραματικής Δοκιμής με την Εφαρμογή Cirquino.io

Οι λαμβανόμενες τιμές RSSI στους 4 δέκτες του ραδιοεντοπιστή, ελέχθησαν για την ομοιομορφία τους σε διάφορες αποστάσεις και περιβάλλοντα. Στον αλγόριθμο, εισάχθηκαν ανάλογες τροποποιήσεις για εξισορρόπηση των μικροκατασκευαστικών κυρίως διαφορών, οι οποίες προέκυψαν στην κάθε κεραία, λόγω των συγκολλήσεων και των χιλιοστομετρικών διαφορών στις διαστάσεις των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

Κεφάλαιο 5

Αυτόνομο Σύστημα Φόρτισης

Για τη φόρτιση του αεροχήματος, επιλέχθηκε πομπός συχνότητας 900 MHz για τους λόγους που θα αναλυθούν στη συνέχεια. Η ισχύς περιορίστηκε στο 1W, λόγω των ισχύοντων περιορισμών στις ασύρματες εκπομπές, αλλά μπορεί να αναβαθμιστεί εύκολα με τη χρήση ενισχυτών. Σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε επίσης, αντίστοιχη ελικοειδής κεραία υψηλού κέρδους και κατευθυντικότητας, η οποία προσαρμόστηκε σε σταθεροποιούμενη βάση κίνησης στον κατακόρυφο άξονα, με κατάλληλο σερβομηχανισμό. Όλα τα υλικά προσαρμόστηκαν σε αυτόνομο ερπυστριοφόρο οχήμα(chargebot) το οποίο υπήρχε στο εργαστήριο και αναπτύχθηκε στα πλαίσια άλλου συνδυαζόμενου ερευνητικού προγράμματος [14], στο οποίο συμμετέχω.

Οι αρχικές δοκιμές και ρυθμίσεις, προηγήθηκαν σε μικρότερων διαστάσεων μοντέλο, το οποίο κατασκευάστηκε εξολοκλήρου για τις ανάγκες της διατριβής. Με τη βοήθεια μητρικής Arduino Mega και λογισμικού ανοικτού κώδικα, κατέστη δυνατή η εκμετάλλευση των στοιχείων του ανιχνευτή ιπάμενου στόχου, ώστε σε συνδυασμό με αδρανειακή μονάδα μέτρησης που εγκαταστάθηκε στο αυτόνομο όχημα αυτό να κατευθύνεται αρχικά κατά μέτωπο στο στόχο.

Στη συνέχεια η κεραία φόρτισης, λαμβάνει την κατακόρυφη γωνία κλίσης, ώστε να στοχεύει το αερόχημα και το αυτόνομο όχημα κινείται κατά μέτωπο προς το στόχο, μέχρι η γωνία να καταστεί σχεδόν κάθετη, γεγονός που σημαίνει ότι έχει ληφθεί η βέλτιστη θέση μετάδοσης και η μικρότερη απόσταση από το στόχο αερόχημα.

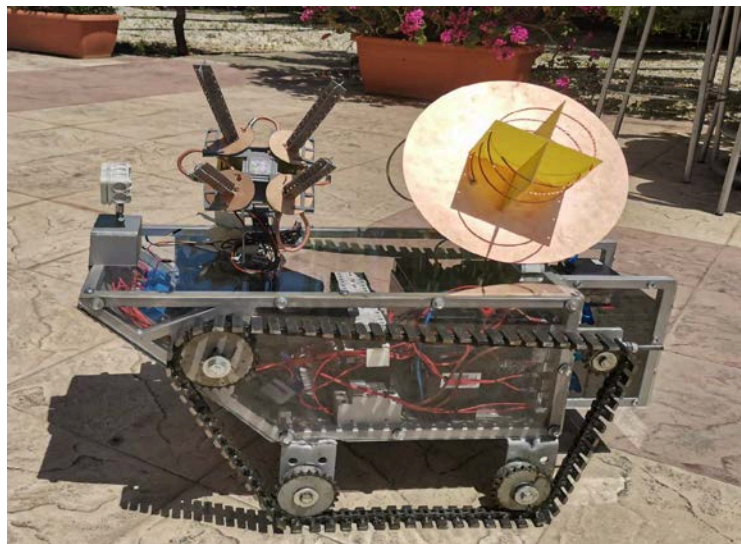
Η συνδυασμένη λειτουργία του συστήματος ανίχνευσης και του συστήματος φόρτισης επί του αυτόνομου οχήματος, επέβαλε τροποποιήσεις, καθώς αρχικά καταβλήθηκε επίπονη προσπάθεια εγκατάστασης των συστημάτων σε διαφορετικούς φορείς, πράγμα όμως που καθιστούσε αδύνατη την εξασφάλιση επαρκούς ακρίβειας σκόπευσης του αεροχήματος, λόγω των αυξημένων απωλειών ολίσθησης κατά τη κίνηση του οχήματος φόρτισης. Έτσι, αποφασίστηκε η συνεγκατάσταση των συστημάτων στο ίδιο αυτόνομο όχημα με αποτέλεσμα να χρειαστεί μεγαλύτερη κατασκευή, η οποία εξασφαλίστηκε. Η συνεγκατάσταση των συστημάτων ανιχνευτή, φόρτισης και αερομεταφερόμενου δέκτη, καθιστούν δυνατή την ανίχνευση, παρακολούθηση και στοχευμένη με ακρίβεια εκπομπή της δέσμης ακτίνων φόρτισης στην αερομεταφερόμενη κεραία δέκτη φόρτισης.

Τεχνική Περιγραφή – Λειτουργία Συστ. Φόρτισης

Το σύστημα φόρτισης της Εικ.32 είναι συνεγκατεστημένο στο αυτόνομο όχημα και σκοπό έχει να επεξεργάζεται τα στοιχεία θέσης του ανιχνευτή ώστε, να κατευθύνεται και να κινείται προς

το στόχο, να κατευθύνει την κεραία φόρτισης προς το στόχο και να εκπέμπει την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια προς την κεραία δέκτη του αεροχήματος, ώστε να το φορτίζει. Αποτελείται από:

- Πομπό E840-DTU(GPRS-01), συχνότητας 900MHz και ισχύος 1w, που παρουσιάζεται στην Εικ. 33
- Ελικοειδή κεραία 900MHz, Εικ.34(α,β)
- Σερβομηχανισμό κατακόρυφης κίνησης κεραίας FS90MG, Εικ.37
- Βάση στήριξης, Εικ.32
- Αυτόνομο όχημα φορέα, Εικ.32



Εικόνα 32, Αυτόνομα Όχημα Φόρτισης με Κατευθυντική Κεραία

Πομπός και Συχνότητα Ασύρματης Φόρτισης

Για την επιλογή της συχνότητας φόρτισης, διεξάχθησαν μετρήσεις και ισολογισμοί που κατέδειξαν ότι, οι απώλειες διάδοσης ελευθέρου χώρου στην απόσταση των 25μ, είναι χαρακτηριστικά υψηλές(dBm). Παρά το γεγονός ότι, η χρήση υψηλότερων μικροκυματικών συχνοτήτων θα υποβοηθούσε κατά πολύ το πείραμα, λόγω των μικρότερων διαστάσεων των απαιτούμενων κεραιών και της υψηλότερης κατευθυντικότητας, που παρουσιάζουν ανάλογες διατάξεις, επιλέχθηκε τελικά η συχνότητα των 900MHz, ώστε να ικανοποιηθεί αφενός η μερική προσομοίωση των μικροκυματικών συχνοτήτων(1GHz και άνω) και αφεταίρου να γίνει εκμετάλλευση των μειωμένων σχετικά απωλειών στις χαμηλότερες συχνοτήτες.

$$L_{FSL} (dB) = 10 \log \left(\frac{P_T}{P_R} \right) = 32.5 + 20 \log R_{km} + 20 \log F_{MHz}$$

Για την καλύτερη αντίληψη της δράσης του φαινομένου, συντάχθηκε ο πίνακας 2, με υπολογισμό των απωλειών σε σχέση με τη συχνότητα όπως αυτά προκύπτουν από την εξίσωση υπολογισμού απωλειών ελ. χώρου (5.1), ο οποίος καθίσταται χρήσιμος για την αιτιολόγηση των αποτελεσμάτων και στα υπόλοιπα υποσυγκροτήματα του συστήματος φόρτισης.

Πίνακας Απωλειών Ελευθέρου Χώρου σε Σχέση με τη Συχνότητα					
Συχνότητα	λ	Ισχύς	Απόσταση	Απώλειες Ελ. Χώρου	Λαμβ. Ισχύς(dB)
900 MHz		1 Watt	20 m	37.55 dB	W
1.2 GHz		1 Watt	20 m	40.04 dB	-10.04(9.905e-05W)
2.4 GHz		1 Watt	20 m	46.06 dB	-16.42(2.282e-05W)
5.8 GHz		1 Watt	20 m	53.73 dB	-24.021(3.96E-06W)

Πίνακας 3

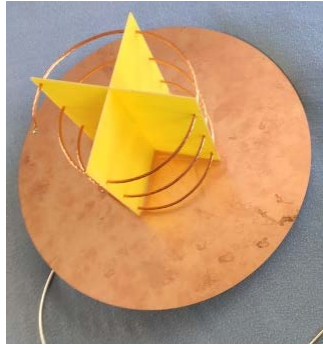
Λαμβανομένων υπόψη και των περιορισμών εκπομπών, ως πομπός φόρτισης επιλέχθηκε ο E840-DTU(GPRS-01), ο οποίος διαθέτει αρχική ισχύ 30dBm(1W).



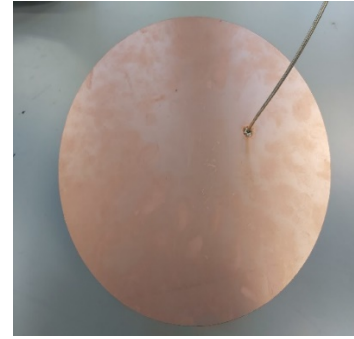
Εικόνα 33, E840-DTU(GPRS-01) [Power] : 30~33dBm, www.aliexpress.com

5.3 Κεραία Πομπού Φόρτισης

Με τη βοήθεια του λογισμικού CST, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε η ελικοειδής κεραία υψηλής κατευθυντικότητας και κέρδους 9.4 dBi. Για την κατασκευή της κεραίας που παρουσιάζεται στην Εικ. 34(α), χρησιμοποιήθηκαν πλάκα χαλκού πάχους 1.5χιλ ως ανακλαστήρας, χάλκινο έλασμα πάχους 1χιλ για την σπειροειδή περιέλιξη, καλώδιο κεραίας και προσαρμοστήρας SMA. Η κεραία, έχει κυκλική δεξιόστροφη πολικότητα και χαρακτηρίζεται από υψηλή αποδοτικότητα μετάδοσης, καθώς στο μεταβαλλόμενο τρισδιάστατο περιβάλλον κίνησης του δέκτη και του αυτόνομου οχήματος φορέα, οι ασυμφωνίες τυχόν άλλων γραμμικών πολικιοτήτων, θα επέφεραν σημαντικές επιπρόσθετες απώλειες. Κατά τη διαδικασία σχεδίασης διενεργήθηκε τρισδιάστατη εξομοίωση κέρδους και κατευθυντικότητας, όπως αυτή παρουσιάζεται στην Εικ.

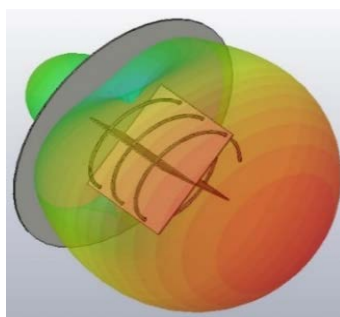


(α)

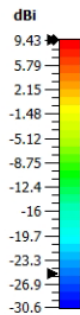


(β)

Εικ. 34, Ελικοειδής Κεραία Φορτιστή 900MHz(α) και Χαρακτηριστικά Κεραίας(β)

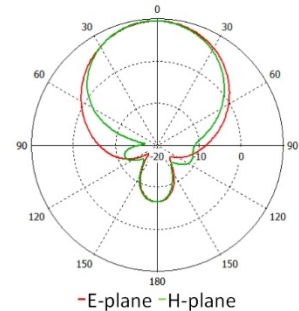


(α)



farfield (f=0.9) [1]	
Type	Farfield
Approximation	enabled (kR >> 1)
Component	Abs
Output	Realized Gain
Frequency	0.9 GHz
Rad. Effic.	-0.06962 dB
Tot. Effic.	-0.2005 dB
Rlzd. Gain	9.428 dBi

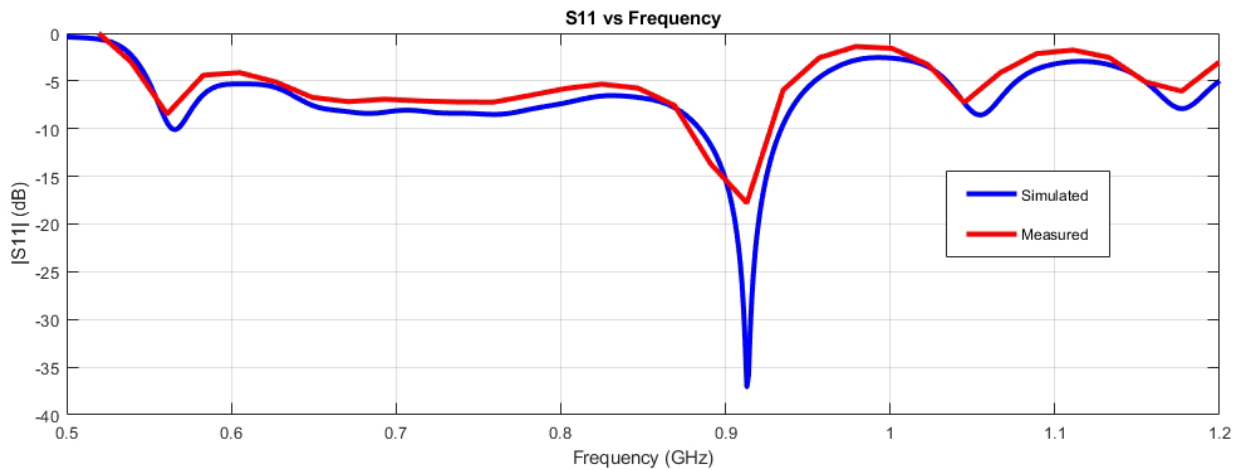
(β)



(γ)

Εικόνα 35, Τρισδιάσταση Απεικόνιση Σχεδίασης και Χαρακτηριστικά

Στη συνέχεια η κεραία εξομοιώθηκε για τη συμφωνία απόκρισης S11 και υποβλήθηκε σε εργαστηριακές μετρήσεις με τη χρήση VNA. Συγκριτικό γράφημα των εξομοιώσεων(μπλέ) και μετρήσεων(κόκκινο), παρουσιάζονται στην Εικ.38, όπου καταδικνύεται η άριστη σχετικά απόκριση συμφωνίας S11 στη συχνότητα των 900 MHz και ικανοποιητικό εύρος ζώνης που κυμαίνεται στα 70 MHz. Η εξομοιωθείσα απόκριση S11, κατέδειξε συμφωνία σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα ισχύος που κυμάνθηκαν στα -30dB σε σχέση με την αντίστοιχη εργαστηριακή μέτρηση που κυμάνθηκε στα -18dB. Αμφότερες όμως βρίσκονται πολύ πιο κάτω από το όριο των



Εικόνα 36, Συγκριτική Εξομίωση και Εργαστηριακή Μέτρηση Συμφωνίας Απόκρισης S11

5.4 Σερβομηχανισμός Κατακόρυφης Κίνησης Συστ. Φόρτισης

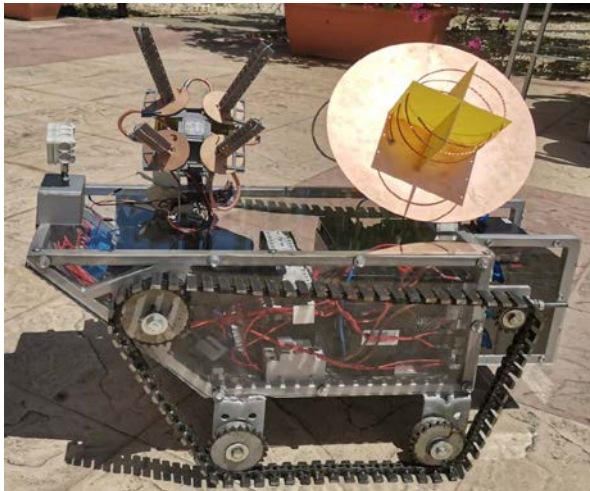
Ο σερβομηχανισμός[εικ.37] που χρησιμοποιήθηκε είναι ο FS90MG. Έχει χαμηλές απαιτήσεις τροφοδοσίας(5V), μεταλλικά γρανάζια και διαθέτουν ικανότητα ροπής στρέψης βάρους μέχρι 1,8κιλά, με υψηλή ακρίβεια τήρησης γωνιών και σταθερότητας. Σε αυτόν προσαρμόστηκε η βάση στήριξης κεραίας, έτσι ώστε με τη λήψη των σημάτων κατεύθυνσης μέσω του μικροεπεξεργαστή, να ρυθμίζει την κατακόρυφη κλίση της κεραίας προς το στόχο.



Εικόνα 37, Σερβομηχανισμός FS90MG

5.5 Φορέας Συστήματος Φόρτισης

Η κεραία και ο πομπός προσαρμόστηκαν σε σταθεροποιούμενη βάση(gimbal) η οποία φέρει σερβομηχανισμό κατακόρυφης κλίσης με ροπή βάρους 1.8κιλών. Όλα τα συστήματα συνεγκαταστάθηκαν σε αυτόνομο όχημα, όπως παρουσιάζεται στην Εικ.38.



Εικόνα 38, Αυτόνομα Όχημα Φόρτισης με Κατευθυντική Κεραία

Το αυτόνομο όχημα έχει διαστάσεις 50X40X40εκ και βάρος 20κιλά. Το πλαίσιο κατασκευάστηκε από μέταλλο και φέρει μοτέρ υαλοκαθαριστήρων φορτηγού για την κίνηση των ερπυστριών. Οι ερπύστριες φτιάχτηκαν με τροποποίηση αλυσίδας μοτοσικλέτας στην οποία συγκολλήθηκαν πέλματα για καλύτερη πρόσφυση, ενώ οι τροχοί στήριξης και κίνησης κατασκευάστηκαν από υλικά ψησταριάς. Για την τροφοδότηση των φερόμενων κυκλωμάτων φέρει 2 μπαταρίες αυτοκινήτου, μια για κάθε ερπύστρια σε συνδυασμό και με τα υπόλοιπα συστήματα.

Το αυτόνομο όχημα φορέας, καθοδηγείται και κατευθύνει την κεραία και τα άλλα οχήματα φόρτισης ώστε να πλησιάζουν συνεχώς και να στοχεύουν το αερόχημα δέκτη, με τη βοήθεια έξυπνων αλγορίθμων, για να αυξάνεται η πυκνότητα ισχύος στην κεραία του δέκτη. Οι εντολές δίνονται μέσω μιας μητρικής Arduino Mega, στην οποία προσαρμόστηκαν τα εξής ηλεκτρονικά βοηθήματα:

GPS UBLOX για την ακριβή καταγραφή της θέσης του
- IMU για την καταγραφή γωνιάς, επιτάχυνσης και κλίσης

L293N Motor Controller τύπου γέφυρας «H», για έλεγχο των μοτέρ

S
e
r
v
o

Kg για έλεγχο και καθοδήγηση της κεραίας φόρτισης

HC-02 Bluetooth Controller για επέμβαση στην κατεύθυνση και παρακολούθηση κινήσεων μέσω εφαρμογής Android

E

S

P - Οθόνη LED για εύκολη παρακολούθηση και έλεγχο δεδομένων θέσεως και λειτουργίας

8

Η

6

Η σχεδίαση, συνδεσμολογία και η εξομοίωση, διενεργήθηκαν με το λογισμικό Circuito.io και παρουσιάζονται στο διάγραμμα της Εικ.39

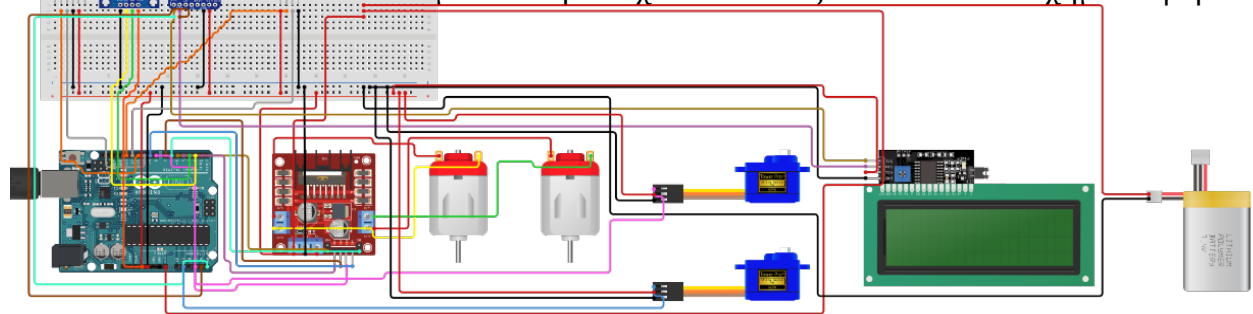
Ultrasonic Sensor για υποβοήθηση της αυτονομίας με αναγνώριση εμποδίων και ανακατεύθυνση του οχήματος

F

i

Co

μετάδοση στοιχείων θέσεως στα υπόλοιπα οχήματα φόρτισης

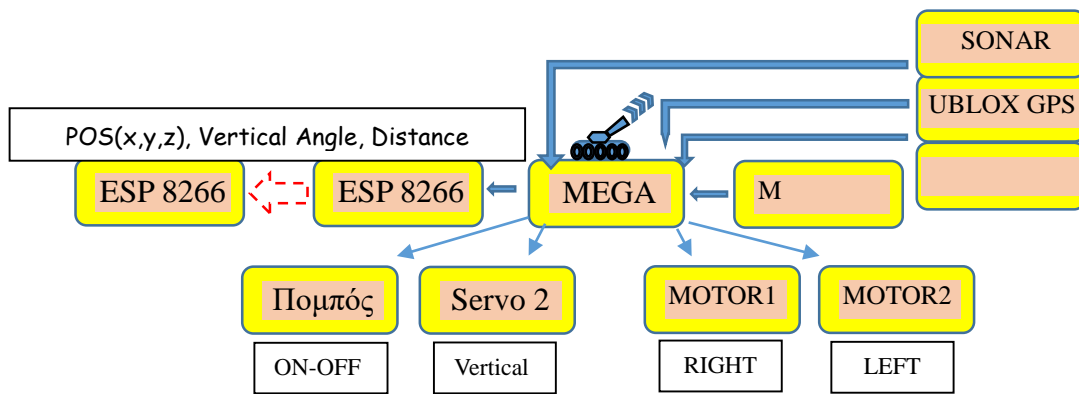


Εικόνα 39, Συνδεσμολογία Αυτόνομου Φορέα Φόρτισης με την Εφαρμογή Circuito.io

Αλγόριθμος Αυτόνομης Διάταξης Φόρτισης

Οι αλγόριθμοι λειτουργίας συντάχθηκαν σε περιβάλλον Arduino IDE. Μέσω του αλγορίθμου, εκτελούνται οι παρακάτω κύριες λειτουργίες, οι οποίες και παρατίθεται στο διάγραμμα της Εικ.40:

- Λήψη από σερβομηχανισμό οριζόντιας κίνησης ανιχνευτή, της γωνιάς αζιμουθίου και εντολή περιστροφής οχήματος σε σχέση με την IMU γωνιά για ευθυγράμμιση προς το στόχο
- Λήψη από σερβομηχανισμό κατακόρυφης κίνησης ανιχνευτή, της γωνιάς ανύψωσης και εντολή ανύψωσης κεραίας φορτιστή για κλίδωμα στόχου(targetlock)
- Ευθύγραμμη κίνηση φορέα με αναγνώριση εμποδίων και επαναχάραξη διαδρομής σε περίπτωση αντιμετώπισης εμποδίου από sonar, μέχρι η γωνία ανύψωσης να καταστεί 85°
- Ενεργοποίηση-Απενεργοποίηση Πομπού Φόρτισης
- Αποστολή στοιχείων σε άλλα οχήματα μέσω WiFi module
- Παρακολούθηση και παρέμβαση με τηλεχειρισμό μέσω Bluetooth και εφαρμογής Android



Εικόνα 40, Διάγραμμα Ροής ενεργειών Διάταξης Φόρτισης Αυτόνομου Οχήματος Φόρτισης

Κεφάλαιο 6

Σύστημα Δέκτη Φόρτισης

Για τη μετατροπή των ραδιοκυμάτων σε σταθερή τάση DC, διαδικασία η οποία λαμβάνει χώρα στις περιπτώσεις WPT-MPT, είναι αναγκαία κατάλληλη διάταξη, ώστε να μετατρέπονται τα ραδιοκύματα σε ηλεκτρισμό πιο αποδοτικά [2]. Αυτή η εξειδικευμένη ανορθωτική διάταξη, ονομάζεται ανορθωτής τάσης – rectifier. Το κύκλωμα περιλαμβάνει ανάλογης κατασκευής εξειδικευμένη κεραία. Το σύνολο της διάταξης με την κεραία ονομάστηκε από τον Brown που θα αναλυθεί στη συνέχεια.

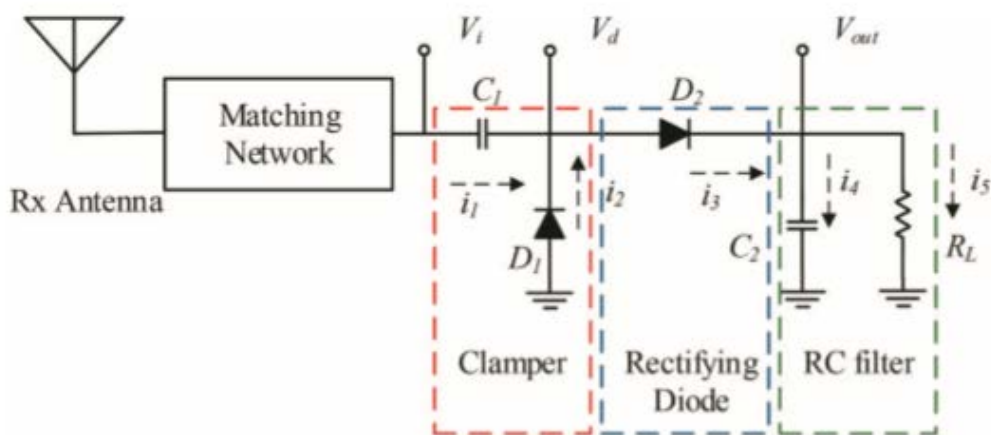
6.1 Τεχνική Περιγραφή – Λειτουργία Δέκτη Ενέργειας

Το σύστημα δέκτη ενέργειας αποτελείται από το κύκλωμα ανόρθωσης ή πολλαπλασιασμού τάσης, κατάλληλη κεραία και το φορτίο το οποίο θα εξυπηρετηθεί. Σκοπός του εν λόγω συστήματος είναι η συνεχής λήψη της περισσότερης δυνατής ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας από τους πομπούς φόρτισης, η μετατροπή της ενέργειας σε σταθερή τάση, ο πολλαπλασιασμός της τάσης και η παροχή σταθερής ηλεκτρικής τάσης για τη φόρτιση του αεροχήματος. Για τις ανάγκες της διατριβής επιλέχθηκε το drone της DJI, Phantom 3. Διαθέτει για τις ανάγκες τροφοδοσίας του ξηρό στοιχείο LiPo 3s 15.8v, 4400mAh και απαιτεί ελάχιστη ενέργεια φόρτισης περι τα κατηγορίας”(20-100W) για σκοπούς ασύρματης φόρτισης, σύμφωνα και με το πρότυπο φωνα με την ITU, δεν έχει ακόμα παρουσιαστεί οποιαδήποτε λύση WPT-MPT σε αυτήν την κατηγορία, παρά τις πολυάριθμες συσκευές ασύρματης φόρτισης για χαμηλής κατανάλωσης συσκευές και κοντινές αποστάσεις που χρησιμοποιούν τις επαγωγικές ή χωρητικές μεθόδους και έχουν ήδη κυκλοφορήσει ευρέως στο εμπόριο. Στο εν λόγω drone προσαρμόστηκε ανορθωτής τριών σταδίων για τον τριπλασιασμό της τάσης σε συνδυασμό με τυπωμένη κεραία για λήψη των ραδιοκυμάτων. Όλα μαζί αποτελούν τη rectenna, για την υλοποίηση της οποίας υπήρξε μεγάλος προβληματισμός λόγω των περιορισμών που θα αναφερθούν στη συνέχεια.

Κύκλωμα Ανορθωτή Τάσης

Η σύνθεση του συστήματος, περιλαμβάνει ως βασικό υλικό ηλεκτρονικές διόδους, πυκνωτές, ανορθωτές και γραμμικές ή σωληνωτές γραμμές τροφοδοσίας, υλικά τα οποία προσαρμόζονται ή εκτυπώνονται σε αγώγιμες πλάκες.

Ένα κύκλωμα ανορθωτή τάσης ασύρματης φόρτισης, αποτελείται από 3 βασικά υποσυγκροτήματα και τα επιμέρους ηλεκτρονικά που έχουν προαναφερθεί, όπως παρουσιάζονται στην εικ. 41.



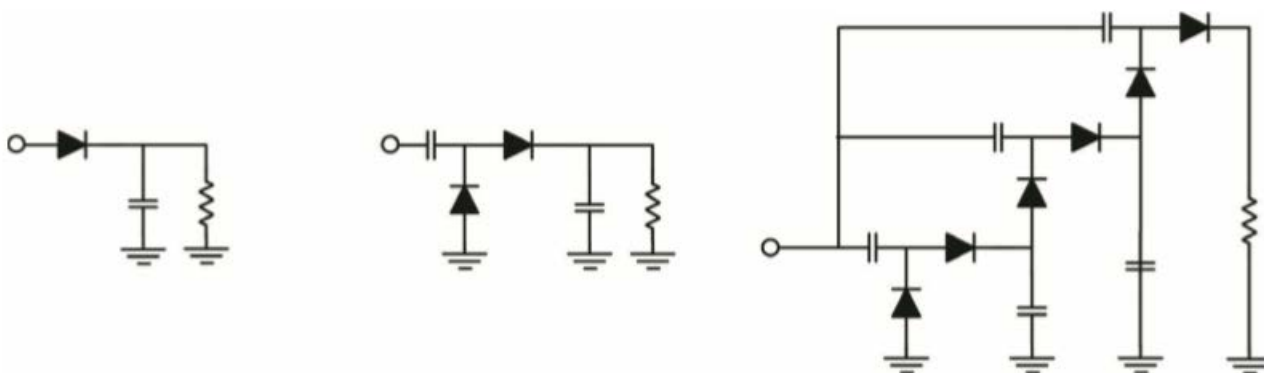
Εικόνα 41, Διάταξη Επιμέρους Κυκλωμάτων Διπλού Ανορθωτικού Δέκτη

Το φίλτρο χαμηλής διέλευσης(εικ.41, κόκκινος τομέας), περιλαμβάνει συνήθως κατάλληλο πυκνωτή χαμηλής χωρητικότητας, αποκόπτει τις χαμηλές μη αναγκαίες συχνότητες αλλά και τις επιστρεφόμενες ανακλάσεις της κεραίας.

Το φίλτρο υψηλής διέλευσης(εικ.41, πράσινος τομέας) που συνήθως διαθέτει χαμηλής χωρητικότητας πυκνωτή για αποκλεισμό των ψηλότερων συχνοτήτων από την καθορισμένη και μεταφορά σταθεροποιημένης κατα το δυνατό τάσης στο φορτίο.

Οι διόδους που χρησιμοποιούνται(εικ. 41, κυανός τομέας), αποτελούν το βασικό ηλεκτρονικό μέσο, δια του οποίου η RF ενέργεια μετατρέπεται σε σταθερή ηλεκτρική τάση. Οι συγκεκριμένες αυτές διόδους, έχουν πολύ χαμηλή τάση ενεργοποίησης και αντοχή λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες, χαρακτηριστικά τα οποία εξυπηρετούν τη λήψη και την ανόρθωση των μικρών ποσοτήτων ενέργειας, που μεταδίδονται στις περιπτώσεις MPT(0-450μV). Συνήθεις τύποι διόδων για εφαρμογές MPT, είναι οι διόδους κατηγορίας Schottky, ενώ άλλες παραπλήσιες κατηγορίες, αποτελούν οι ευρύτερα γνωστές MOFSET και FET, οι οποίες έχουν κάπως υψηλότερη τάση ενεργοποίησης.

Υπάρχουν ποικίλες τοπολογίες ανορθωτικών διατάξεων για εξυπηρέτηση διαφορετικών καταστάσεων. Οι 3 βασικές διατάξεις, είναι αυτές της μονής διόδου (single stage), του διπλασιαστή τάσης (voltage doubler) και του πολλαπλασιαστή τάσης (voltage multiplier), όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 42, από αριστερά προς τα δεξιά. Ο μονός ανορθωτής περιλαμβάνει μια δίοδο και ένα πυκνωτή. Ο διπλασιαστής δύο και δύο, ενώ ο πολλαπλασιαστής ισάριθμα με το συντελεστή ζεύγη. Όλα περιλαμβάνουν αντίσταση.



Εικόνα 42, Οι 3 Βασικές τοπολογίες Rectenna

Η πιο ευρέως χρησιμοποιημένη τοπολογία, είναι αυτή της μονής διόδου, καθώς αποτελεί το απλούστερο σύστημα. Η λειτουργία της μονής διόδου, ανάγεται στο γεγονός ότι αυτή μετατρέπει (rectifies) μόνο το ήμισυ (halfwave rectification) του ημιτονικού RF κύματος, αλλά παρουσιάζει μεγαλύτερες διακυμάνσεις και απαιτεί πρόσθετα φίλτρα εξομάλυνσης με τις ανάλογες απώλειες, σε αντίθεση με τις άλλες δύο τοπολογίες, οι οποίες μετατρέπουν ολόκληρο το σήμα (fullwave), προσφέροντας υψηλότερες τάσεις και πιο σταθερό σήμα DC.

Έτσι, η τοπολογία διπλής ανόρθωσης, παρουσιάζει συνήθως, την υψηλότερη αποδοτικότητα, καθώς κάθε επιπρόσθετο κομμάτι στους λοιπούς πολλαπλασιαστές, συνοδεύεται από ανάλογες απώλειες, οι οποίες επηρεάζουν καθοριστικά τη συνολική αποδοτικότητα του συστήματος. Ανεξάρτητα από την γενικευμένη αυτή διαπίστωση, η καταλληλότητα της τοπολογίας εξαρτάται κυρίως από το φορτίο που θα ικανοποιηθεί και την ισχύ που θα λαμβάνεται.

Στις περιπτώσεις όπου η λαμβανόμενη ισχύς είναι ισχυρότερη και απαιτείται υψηλή τιμή τάσης, ενδύκνεται η χρήση πολλαπλασιαστών με αντάλλαγμα (tradeoff) τη μείωση της αποδοτικότητας.

Για την επιλογή της καλύτερης δυνατής τοπολογίας για τις ανάγκες της διατριβής, διεξήχθησαν δοκιμές, υπολογισμοί και εξομοιώσεις, προκειμένου να καταλήξουμε στην επιλογή της καταλληλότερης τοπολογίας (υψηλότερη αποδοτικότητα). Για τη συχνότητα εκπομπής των τις απώλειες ελευθέρου χώρου, υπολογίστηκε στα 1 mW (0 dBm). Επιπρόσθετα, για τις ανάγκες πτήσης του Drone μας, υπολογίστηκε η ανάγκη παροχής φορτίου 60-70W, ενώ για τη φόρτιση της μπαταρίας του που μας απασχολεί, κρίθηκε αναγκαία η παροχή ελάχιστης ισχύος της τάξης των 20W.

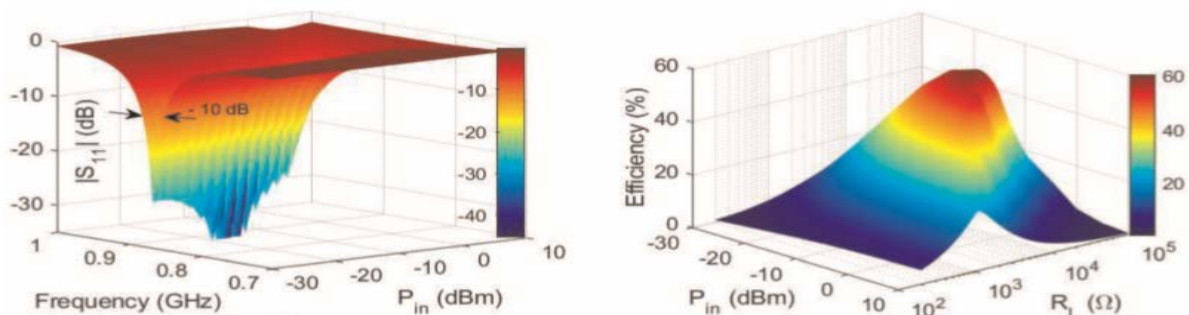
Το γεγονός της αντιμετώπισης ιδιαίτερων προκλήσεων στον τομέα της αποδοτικότητας του παρεχόμενου φορτίου, υπήρξε αναμενόμενο, καθώς ως γνωστό, τα drones, φέρουν πολλούς έλικες, με αντίστοιχο αριθμό μοτέρ, τα οποία παρουσιάζουν υψηλές και συνεχόμενες καταναλώσεις, σε σχέση με τα μονοκινητήρια αεροσκάφη αλλά και τις δυνατότητες υποβοήθησης που τους παρέχει η άνωση των σταθερού τύπου πτερύγων.

Παραταύτα, καταβλήθηκε προσπάθεια με τα υλικά χαμηλού κόστους και ισχύος τα οποία είχαμε στη διάθεση μας, να προβούμε σε εξαγωγή πρακτικών αποτελεσμάτων κλίμακας, προς εξυπηρέτηση του σκοπού ο οποίος αρχικά καθορίστηκε, έχοντας σε γνώση το γεγονός ότι η ανορθωτές τάσης δεν παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά.

Τα παραπάνω στοιχεία, καθιστούν σχεδόν μονόδρομη την επιλογή κάποιας μορφής τοπολογίας ανορθωτικού πολλαπλασιαστή, η οποία όμως θα έπρεπε να εξεταστεί επιμελώς και να υποστηριχθεί επαρκώς, καθώς εμπλέκονται και οι παράγοντες συμφωνίας απόκρισης της συχνότητας σε σχέση με την απόδοση και το φορτίο. Η διαδικασία εξομοίωσης του (S_{11}), αποτελεί τον έταίρο κύριο παράγοντα στήριξης της ενδεχόμενης επιλογής μας, γι αυτό και πραγματοποιήθηκαν εξομοιώσεις με μονή και διπλή τοπολογία για να διαπιστωθεί η ανταπόκριση τους, έχοντας υπόψη ότι, το drone θα μετακινείται και θα παρουσιάζει επιπρόσθετα αυξομειώσεις στη λαμβανόμενη ισχύ.

Μια λύση για την καλύτερη αντιμετώπιση της αυξομείωσης ισχύος, είναι η ρύθμιση της τοπολογίας μας, ώστε αυτή να έχει αυξημένη ευαισθησία σε ευρύτερη ζώνη συχνοτήτων. Ο αποσυντονισμός της διόδου είναι εύκολος, καθώς αυτή λειτουργεί με ακρίβεια σε συγκεκριμένο στενό εύρος ζώνης, με αποτέλεσμα διακυμάνσεις στη λαμβανόμενη ισχύ να επιφέρουν διατάραξη του (S_{11}) και γενικότερα μείωση της αποδοτικότητας της διόδου.

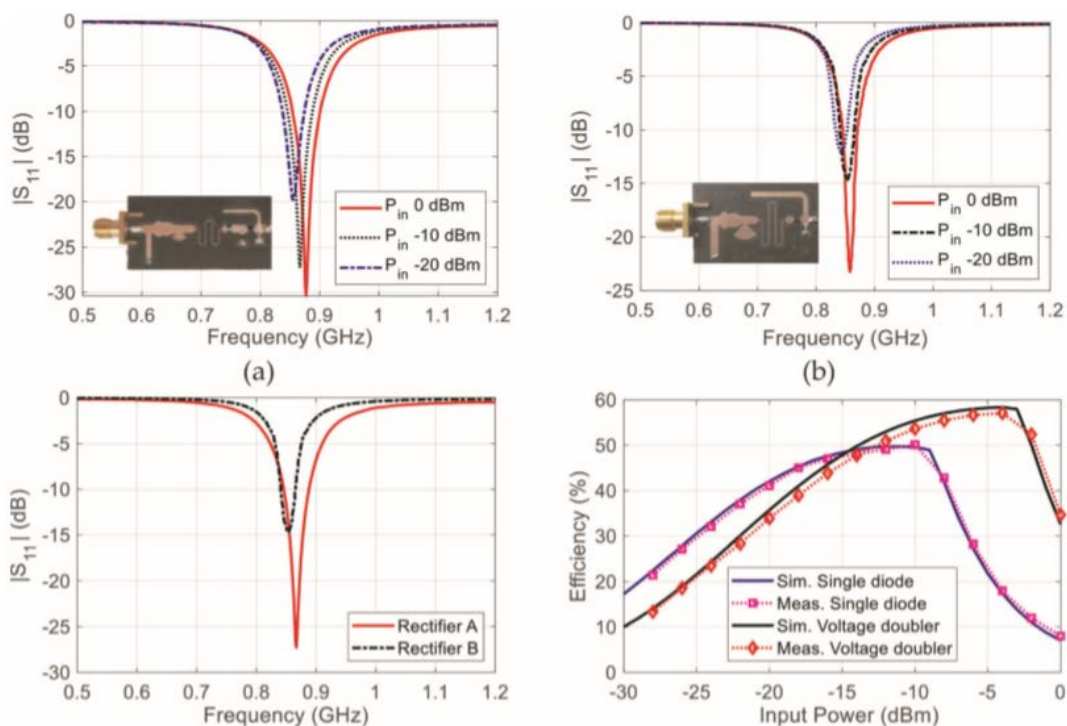
Στην εικόνα 43, φαίνεται η εξομοίωση συντονισμού στα -10dB (αριστερά), όπου διακρίνεται ότι η μεταβολή της ισχύος εισόδου επηρεάζει αρνητικά το συντονισμό(S_{11}), με αποτέλεσμα να προκαλείται μετατόπιση του λειτουργικού εύρους ζώνης συχνότητας.



Εικόνα 43, Εξομοίωση συντονισμού S_{11} - συχνότητας και εξομοίωση αποδοτικότητας-φορτίου, σε σχέση με την λαμβανόμενη ισχύ

Στα δεξιά της εικ.44, η εξομοίωση περιέλαβε το φορτίο της συσκευής που θα χρησιμοποιηθεί, σε συνδυασμό με την ισχύ εισόδου και καταδικνύει ότι, η μεταβολή του φορτίου προκαλεί χαρακτηριστική μείωση της αποδοτικότητας.

Κατασκευάστηκαν επίσης δύο τοπολογίες-rectenna, εξομοιώθηκαν και μετρήθηκαν στο εργαστήριο με χρήση γεννήτριας συχνοτήτων και VNA. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι, η δίοδος μονής διαδρομής(halfwave), θα ήταν περισσότερο κατάλληλη για στατική λειτουργία πομπού και δέκτη, αλλά όχι για τις περιπτώσεις μεταβολής ισχύος. Τα αποτελέσματα των δοκιμών, απέδειξαν επίσης την αστάθεια που παρουσιάζεται με την αλλαγή ισχύος η οποία παρατηρείται με την τροποποίηση αποστάσεων και τον αποσυντονισμό(εικ.44, άνω μέρος). Στην εικόνα (κάτω δεξιά), παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών και εξομοιώσεων, όπου διαφαίνεται ότι για ισχύ εισόδου υψηλότερη από -15 dBm, ο πολλαπλασιαστής ισχύος ανταποκρίνεται με μεγαλύτερη αποδοτικότητα που κυμαίνεται στο 60%.



Εικόνα 44, Εξομοιώσεις Αποδοτικότητας συντονισμού Τοπολογιών στα 900MHz, fullwave(αριστερά) και halfwave(δεξιά) στα 0, -10 και -20dBm

Δίοδοι Schottky

Οι δίοδοι Schottky, χρησιμοποιήθηκαν ευρύτερα ως βελτιωμένοι αντικαταστάστες στις πρώτες παρωχημένες πλέον θερμικές διόδους, που συνόδευαν τα αρχικά συστήματα MPT-WPT. Βασική αρχή λειτουργίας όλων των διόδων, αποτελεί η ύπαρξη ανόδου και καθόδου με την παρεμβολή υψηλής ποιότητας μονωτικών υλικών, που συνήθως είναι τα σιλικονούχα καρβίδια αρσενίου, πυριτίου και άνθρακα. Κατά το τρόπο αυτό, ηλεκτρόνια μεταδίδονται από την κάθοδο στην άνοδο, όταν η τάση ενεργοποίησης της διόδου εξασφαλιστεί, ενώ όταν αυτή υπερβεί το ορισθέν όριο, η δίοδος αρχικά υπολειτουργεί με μείωση της αποδοτικότητας της και στη συνέχεια καταστρέφεται, λόγω αύξησης της θερμοκρασίας πέραν του ανεχόμενου ορίου. Σε περίπτωση μη εξασφάλισης της απαιτούμενης ισχύος(κατοφλίου) ενεργοποίησης η δίοδος ενεργεί ως διακόπτης μη επιτρέποντας τη διέλευση φορτίου.

Για τις ανάγκες των πειραματικών δοκιμών, είχαμε στη διάθεση μας τις διόδους τύπου

SMS και Broadcoms HSMS που παρουσιάζονται στην εικ 45, οι οποίες καλούνται και ως surface

Προτιμήθηκε η πρώτη(Skywork SMS 7630), λόγω της συμπερίληψης της στις βιβλιοθήκες του προγράμματος εξομοίωσης AVS, αλλά και φυσικά επειδή υποστηρίζει την τάση ενεργοποίησης, η οποία εκτιμήθηκε ότι θα λαμβάνεται, διαδικασία που υλοποιήθηκε με πολλαπλές εξομοιώσεις στο λογισμικό Trunet Wireless.



Εικόνα 45 , Δίοδος Schottky Skyworks SMS 7630(αριστερά) και Broadcom HSMS 2850(δεξιά),

H
Y

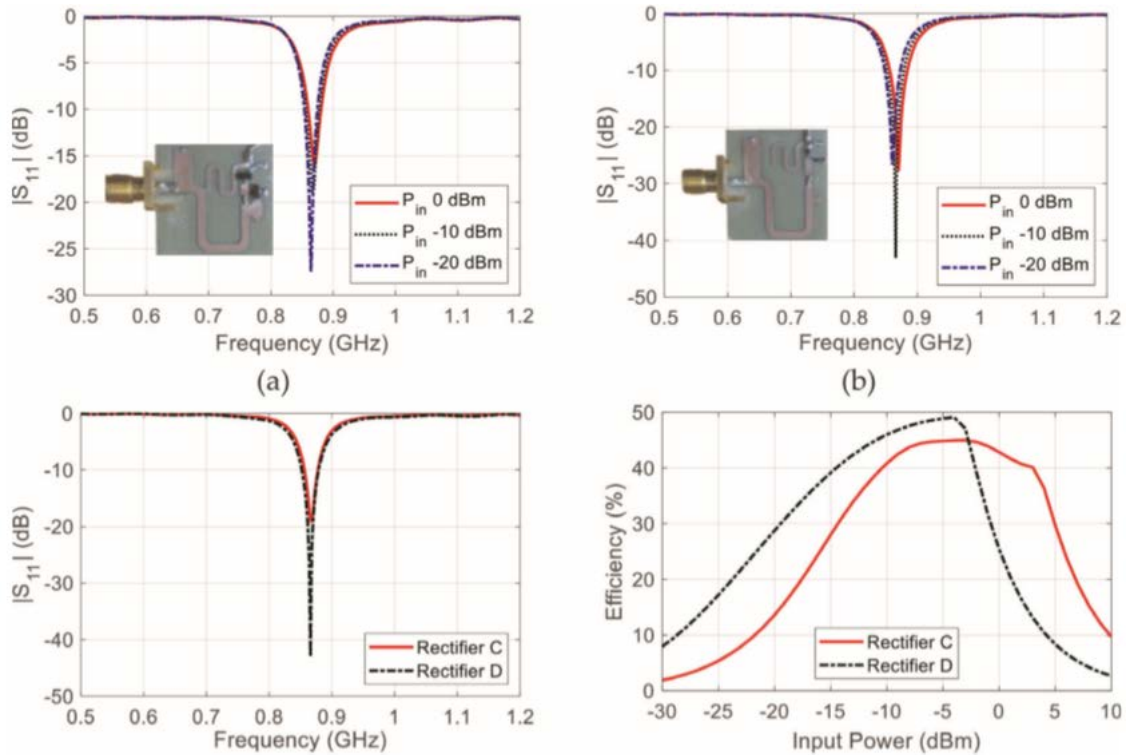
SOT-23/SOT-143 DC Electrical Specifications, $T_C = +25^\circ\text{C}$, Single Diode

Part Number HSMS-	Package Marking Code	Lead Code	Configuration	Maximum Forward Voltage V_F (mV)		Maximum Reverse Leakage, I_R (μA)	Typical Capacitance C_T (pF)
				$I_F = 0.1 \text{ mA}$	$I_F = 1.0 \text{ mA}$		
2850	P0	0	Single	150	250	175	0.30
2852	P2	2	Series Pair ^[1,2]				
2855	P5	5	Unconnected Pair ^[1,2]				
Test Conditions				$I_F = 0.1 \text{ mA}$	$I_F = 1.0 \text{ mA}$	$V_R = 2\text{V}$	$V_R = -0.5\text{V to } -1.0\text{V}$ $f = 1 \text{ MHz}$

Notes:
 1. ΔV_F for diodes in pairs is 15.0 mV maximum at 1.0 mA.
 2. ΔC_T for diodes in pairs is 0.05 pF maximum at -0.5V.

Εικόνα 46, Χαρακτηριστικά διόδου HSMS 2850, www.digchip.com

Από τις εξομοιώσεις, εκτιμήθηκαν οι μέσοι όροι ισχύος κατα απόσταση και διαπιστώθηκε η καλύτερη συμφωνία με τη τάση ενεργοποίησης της διόδου Skywork SMS7630, που κυμαίνεται από 60-120 μV (τάση κατάρρευσης 2V), σε σύγκριση με τη δίοδο Broadcom HSMS 2850, η οποία ενεργοποιείται σε τάσεις 150-250 μV (τάση κατάρρευσης 3.8V).

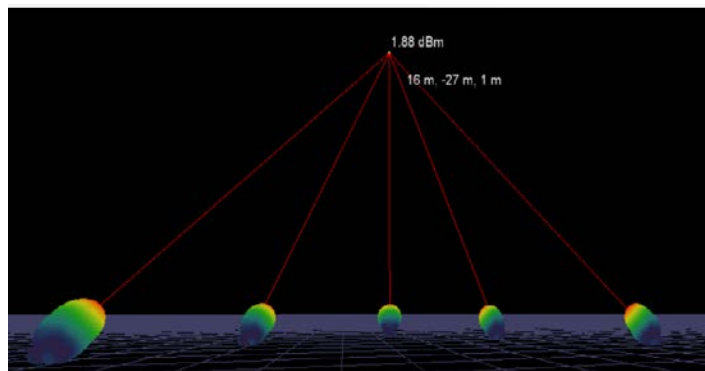


Εικόνα 47, Συγκριτική Εξομοίωση μεταξύ Ανορθωτικού Δέκτη με δίοδο Skyworks SMS 7630(αριστερά) και Broadcom HSMS 2850(δεξιά)

Στην εικ. 47, παρουσιάζονται εξομοιώσεις και συγκριτικά αποτελέσματα, στο λογισμικό AVS, μεταξύ των δύο τύπων διόδων σε ανορθωτές που κατασκευάστηκαν, για το σκοπό αυτό.

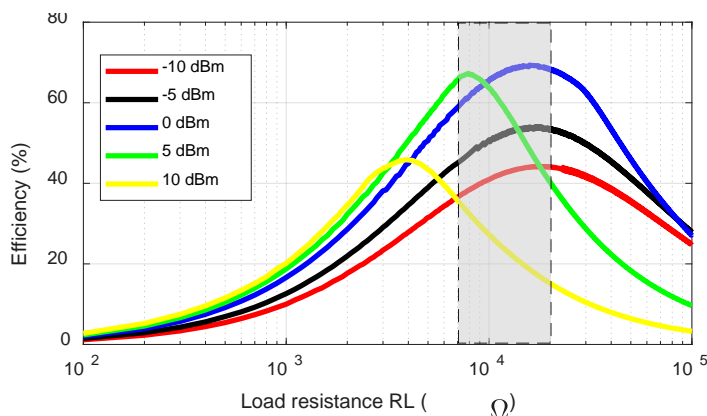
6.2.2 Τεχνική Περιγραφή και Υλοποίηση Ανορθωτή

Το κύκλωμα ανόρθωσης τάσης, κατασκευάστηκε με βάση εξομοιώσεις, για την καλύτερη απόδοση στη συχνότητα των 900MHz και για λαμβανόμενη ισχύ τα 0 dBm(1.54 mW), η οποία εκτιμήθηκε ότι θα ληφθεί στην απόσταση των 20μ., κατόπιν εξομοιώσεων που εκτελέστηκαν στο λογισμικό Trunet(Εικ.48). Επίσης, ως δεδομένο λήφθηκε το γεγονός ότι θα χρησιμοποιηθεί πομπός ισχύος 1W, πράγμα που καθορίστηκε λόγω των περιορισμών εκπομπών και εισαγωγών.



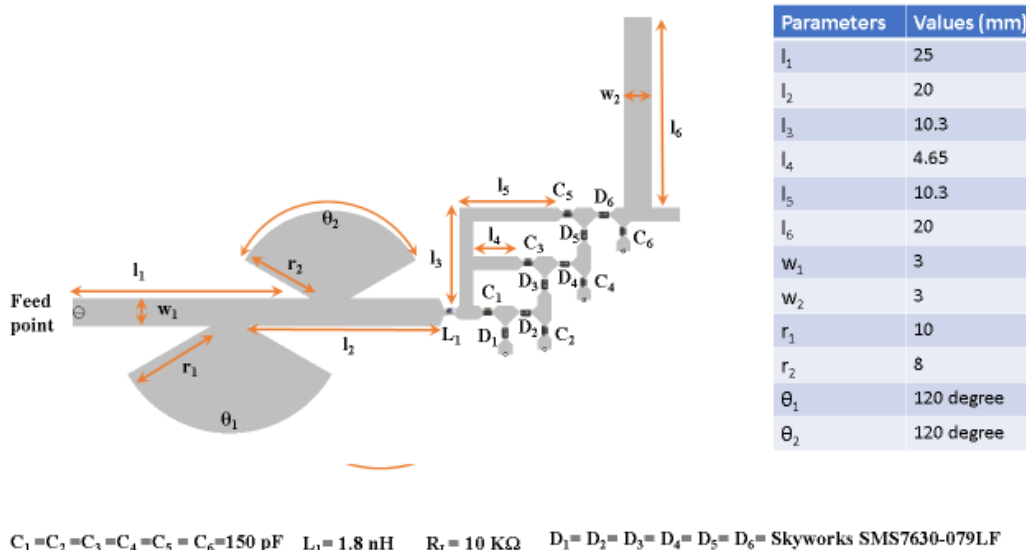
Εικόνα 48, Προσομοίωση Λήψης Trunet σε απόσταση 20μ, με πέντε πομπούς ισχύος 1watt

Τελικά επιλέχθηκε η κατασκευή ενός πολλαπλασιαστή τριών σταδίων, ως μια προσπάθεια να αποκομιστεί η υψηλότερη δυνατή τάση για εξυπηρέτηση του υπολογιζόμενου φορτίου σε συνδυασμό με σχεδιαστικούς βελτιωτικούς παράγοντες οι οποίοι θα αντιμετωπίσουν τη πρόκληση της αποδοτικότητας του συστήματος. Οι προσομοιώσεις αποδοτικότητας του ανορθωτικού πολλαπλασιαστή τριών σταδίων, οι οποίες φαίνονται στην εικ.49, για το υπολογισθέν φορτίο των 10κΩ, κατέδειξαν ότι για ισχύ εισόδου 1mW, εξασφαλίζεται η καλύτερη αποδοτικότητα που κυμαίνεται στο 68-70%.



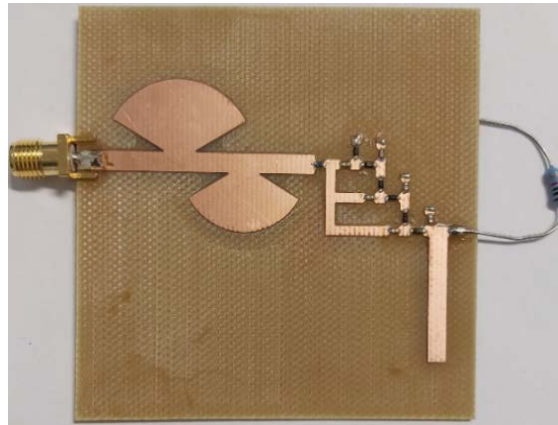
Εικόνα 49, Εξομοίωση Αποδοτικότητας Κυκλώματος Ανόρθωσης Πολλαπλασιαστή σε Σχέση με το Φορτίο και την Λαμβανόμενη Ισχύ

Η επιλογή κατασκευής του ανορθωτή τάσης τριών σταδίων, ο οποίος εκτιμήθηκε ότι θα εξυπηρετήσει τις ανάγκες της διατριβής για παροχή υψηλής τάσης, στηρίχθηκε και στην καλύτερη απόκριση στις μεταβολές της λαμβανόμενης ισχύος που επιβάλλουν οι συνθήκες συνεχούς μετατόπισης του Drone. Οι διαστάσεις και τα επιμέρους κυκλώματα που χρησιμοποιήθηκαν, παρουσιάζονται στην εικ.50.



Εικόνα 50, Σχεδίαση Εξομοίωση και Χαρακτηριστικά Κυκλώματος Ανορθωτικού Πολλαπλασιαστή Τριών Σταδίων

Με βάση τις εκτιμήσεις των εξομοιώσεων, κατασκευάστηκε αρχικά ο πρωτότυπος ανορθωτής της Εικ.51 και διενεργήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές και μετρήσεις.

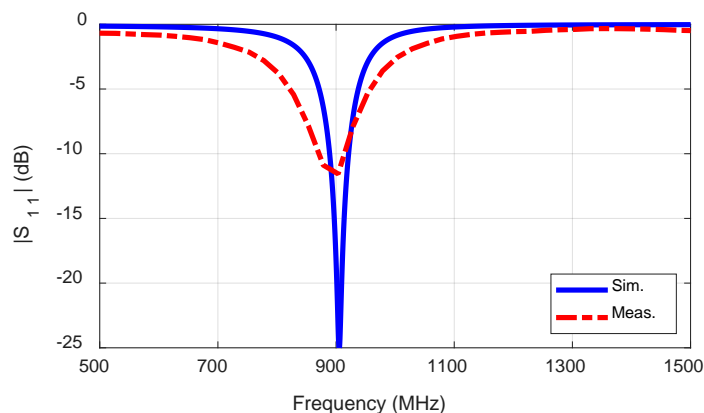


Εικόνα 51, Κύκλωμα Ανόρθωσης Τριπλού Πολλαπλασιαστή

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής:

- Πλάκα FR-4
- Δίοδοι Schottky FR-7654
- Πλάκα Χαλκού πάχους 1χιλ
- Αντίσταση 4κΩ
- Προσαρμογέας Κεραίας Εισόδου SMA(Subminiature Version A)

Η εξομοίωση απόκρισης S_{11} σε συνδυασμό με τις μετρήσεις, παρατίθενται στην Εικ.52. Το τελικό αποτέλεσμα κατέδειξε ικανοποιητική συμφωνία απόκρισης σε μεγαλύτερο εύρος ζώνης συχνοτήτων(200MHz) από το εκτιμώμενο πράγμα που εξυπηρετεί τις επιδιώξεις μας. Η δε συμφωνία απόκρισης S_{11} κυμάνθηκε σε τιμές αρκετά πιο κάτω των -10dB με τις μετρήσεις εργαστηρίου να είναι μεν υψηλότερες από τις εξομοιωθήσες αλλά σε πολύ ευρύτερη ζώνη συχνοτήτων, γεγονός που ευνοεί περισσότερο τις καταστάσεις συχνών μεταβολών των λαμβανόμενων τιμών ενέργειας, που παρουσιάζονται στην περίπτωση των μετακινήσεων του αεροχήματος της διατριβής.



Εικόνα 52, Συγκριτικό Διάγραμμα Εξομοίωσης και Μετρήσεων Τριπλού Πολλαπλασιαστή

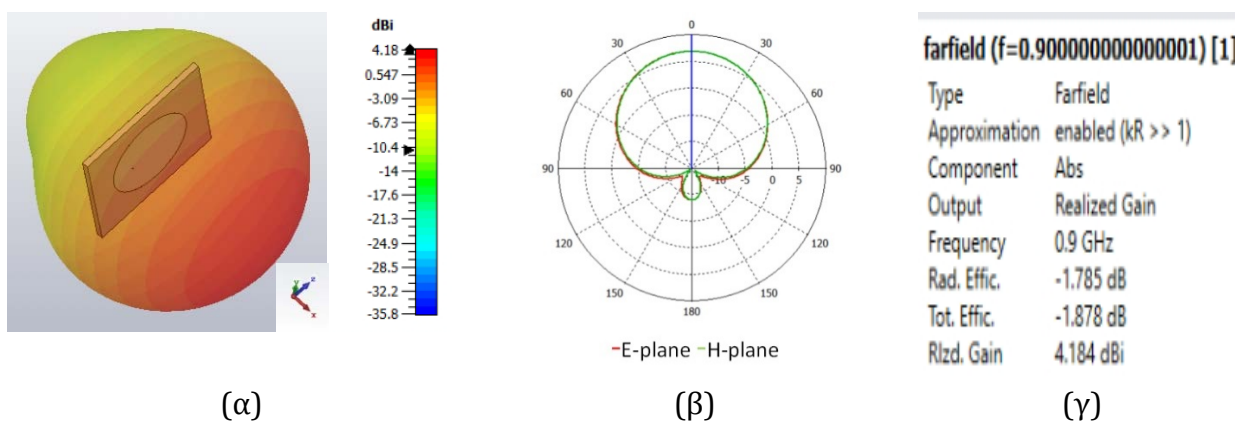
Πέραν των κατ'έξοχήν βελτιώσεων στα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά των κυρίων μερών της τοπολογίας, που είχε ως σκοπό την εξασφάλιση της υψηλότερης δυνατής αποδοτικότητας, καταβλήθηκε προσπάθεια για περαιτέρω βελτίωση του κατασκευαστικού μέρους της τοπολογίας, σε σχέση με τα ακόλουθα:

- Συνδεσμολογία κεραίας – ελαχιστοποίηση απωλειών και συμφωνία κυκλωμάτων με μικροταινιακές οδεύσεις χωρίς συγκολλήσεις και επιπρόσθετα καλώδια.
- Χρήση κυκλικών αποσβεστών(circular lumps) αντί πυκνωτών σε ενιαία επιφάνεια για αποφυγή συγκολλήσεων και μείωση μεγέθων.

Αφού δοκιμάστηκε ο πρωτότυπος ανορθωτής, καταβλήθηκε επιπρόσθετη προσπάθεια βελτίωσης της απόδοσης και επιλέχθηκε η ενσωμάτωση με εκτύπωση του ανορθωτή στην κεραία του δέκτη αντί της σύνδεσης του υφιστάμενου ανορθωτή στην κεραία. Η διαδικασία θα αναλυθεί στη συνέχεια, καθώς ο ανορθωτής εντάχθηκε επιτυχώς σε ενιαίο κύκλωμα με την κεραία σχηματίζοντας τη λεγόμενη rectenna.

6.3 Κεραία Δέκτη Διάταξης Φόρτισης

Για τη λήψη των ραδιοκυμάτων απο τον ανορθωτή, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε κεραία μικρών διαστάσεων, με υψηλή κατευθυντικότητα, μειωμένο βάρος και κυκλική πόλωση, ώστε να καθίσταται δυνατή η προσαρμογή της στο αερόχημα. Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4, ανάλογα πλεονεκτήματα προσφέρουν οι εκτυπωμένες κεραίες τύπου patch. Μεταξύ των ορθογώνιων και κυκλικών κεραίων, επιλέχθηκε η κυκλική, καθώς επιδιώχθηκε η ευκολότερη εξασφάλιση κυκλικής πολικότητας, η οποία υποβοηθά στην πλήρη λήψη των ραδιοκυμάτων από τον κινούμενο σε τρία επίπεδα, ιπτάμενο στόχο. Σε διαφορετική περίπτωση, η αλλαγή θέσης σε τρεις κατευθύνσεις, θα οδηγούσε σε χαρακτηριστική μείωση των λαμβανομένων σημάτων. Η τρισδιάστατη εξομοίωση κέρδους κατευθυντικότητας, παρατίθεται στην εικόνα 53(α). Στην Εικ.53(β) παρουσιάζεται η εξομοίωση διαγράμματος ακτινοβολίας οριζοντίου και κατακόρυφου επιπέδου, ενώ τα λοιπά χαρακτηριστικά φαίνονται στην Εικ 53(γ).



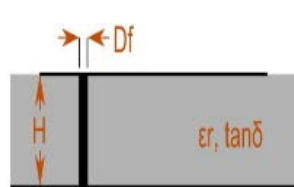
Εικόνα 54, Εξομοίωση Κυκλικής Εκτυπωμένης Κεραίας Φορτιστή

Η κεραία αποτελείται από τρία στρώματα, την κυκλική πλάκα χαλκού Εικ.54(α) στο ενδιαμέσο μέρος ως άνοδο καλυμμένη με το μαύρο φύλλο μονωτικού υλικού Rogers 5808($\epsilon_r=2,2$) στο άνω

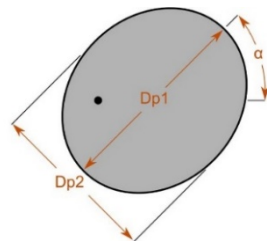
μέρος για βελτίωση της ακτινοβολίας. Άλλο ένα φύλλο Roger's 5808 τοποθετήθηκε ως ενδιάμεσο στρώμα στο κάτω μέρος ως διαχωριστής, ενώ στον πυθμένα τοποθετήθηκε φύλλο με ακρίβεια στους τρεις δίσκους και την μικροταινία του ανορθωτή από την οποία πέρασε κατακόρυφα το καλώδιο γείωσης το οποίο συγκολλήθηκε με τις μικρότερες δυνατές διαδρομές και απώλειες. Οι διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στην Εικ.54.

Dp1	127.5mm	Sf	24mm	Er	2.2
Dp2	124.4mm	H	3.15mm	tanδ	0.0009
Df	1.2mm	A	62.96°	F	900MHz

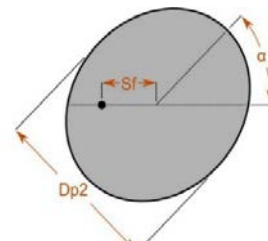
(a)



β)



γ)



δ)

Εικόνα 54, Διαστάσεις και Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά Κυκλικής Εκτυπωμένης Κεραίας Δέκτη Φόρτισης

Τα κύρια μέρη και η πραγματική κεραία, παρουσιάζονται στην εικ. 55.



(α)



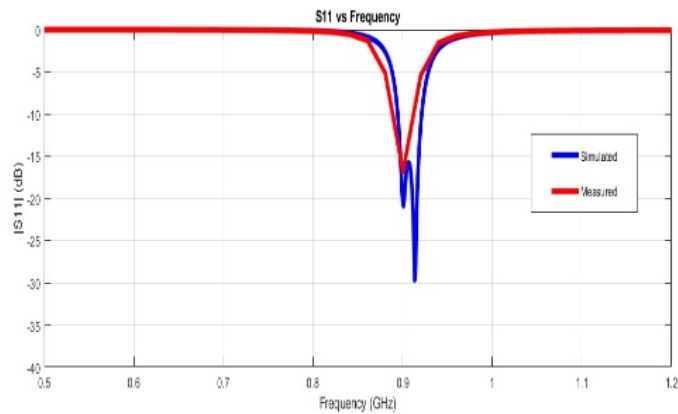
(β)



(γ)

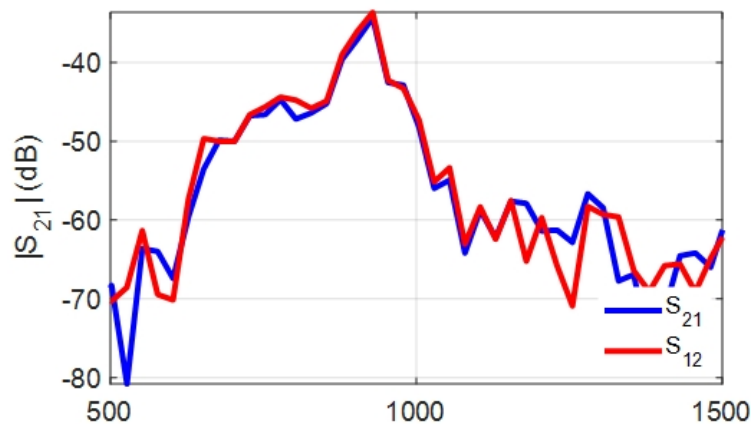
Εικόνα 55, Κυκλική Κεραία Δέκτη με Ενσωματωμένο Εκτυπωμένο Ανορθωτή στο Πίσω Μέρος

Η εξομοίωση συμφωνίας απόκρισης S11 σε συνδυασμό με τις μετρήσεις, παρατίθενται στην Εικ.56. Το τελικό αποτέλεσμα κατέδειξε ικανοποιητική συμφωνία απόκρισης σε μεγαλύτερο εύρος ζώνης συχνοτήτων (200MHz) από το εκτιμώμενο πράγμα που εξυπηρετεί τις επιδιώξεις μας. Η δε συμφωνία απόκρισης S11 κυμάνθηκε στα -18dB, με τις μετρήσεις εργαστηρίου να είναι μεν υψηλότερες από τις εξομοιωθήσες αλλά σε ίσο εύρος ζώνης συχνοτήτων, που ανέρχεται σε 50MHz.



Εικόνα 56, Εξομοίωση Συμφωνίας Απόκρισης S11 στα 900MHz

Η εξομοίωση συμφωνίας απόκρισης S12(ερυθρό) και S21(κυανό) που παρουσιάζεται στην Εικ.57, αφορά σε έλεγχο συμφωνίας της κεραίας με τον ανορθωτή και αντίστροφα, διαδικασία η οποία καταδικνύει το ταίριασμα(matching) ανορθωτή – κεραίας που αποτελεί ισχυρή ένδειξη υψηλής αποδοτικότητας. Το τελικό αποτέλεσμα κατέδειξε ικανοποιητική συμφωνία απόκρισης και ομοιομορφία σε μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων(400MHz), γεγονός που εξυπηρετεί τον κατασκευαστικό στόχο της ευρυζωνικής ανταπόκρισης της ρεκτένα με χαμηλές επιστροφές και υψηλή αποδοτικότητα μετάδοσης.



Εικόνα 57, Πλήρες Κυκλώμα Ανορθωτικού Πολλαπλασιαστή τριών σταδίων και Εξομοίωση συμφωνίας S11-S21 για f=900 MHz

Οι εξομοιώσεις και οι μετρήσεις, κατέδειξαν ότι με εκπεμπόμενη ισχύ ενός πομπού 1W(30 dBm), σε απόσταση 20μ και ύψος 10μ, με τις κεραίες που κατασκευάστηκαν, είναι δυνατή η λήψη, 1.88 dBm ανά κελί, στην επιφάνεια της κεραίας με διαστάσεις 20X20εκ. Ο συνυπολογισμός για πέντε πομπούς, διενεργήθηκε με εξαγωγή αποτελεσμάτων στο λογισμικό Trunet και κατέδειξε ότι συνολικά θα ληφθούν 0.0007W, όπως φαίνεται στην Εικ. 48.

Διενεργήθηκαν αρκετές εξομοιώσεις οι οποίες κατέδειξαν ότι 5 πομποί με ισχύ 1000W έκαστος μπορούν να αποφέρουν στο δέκτη ισχύ της τάξεως των 20W.

Κεφάλαιο 7

Πειραματική Διάταξη

Σκοπός της πειραματικής διάταξης είναι η πρακτική υλοποίηση ανίχνευσης και ασύρματης μεταφοράς ενέργειας σε ιπτάμενο μη επανδρωμένο αερόχημα.

Για την ικανοποίηση των πιο πάνω αναγκών, πέραν των εξομοιώσεων και δοκιμών των επιμέρους συστημάτων, που ήταν διαρκής κατά την εξέλιξη τους και αναλύθηκαν στα επι μέρους κεφάλαια, υλοποιήθηκαν τα εξής:

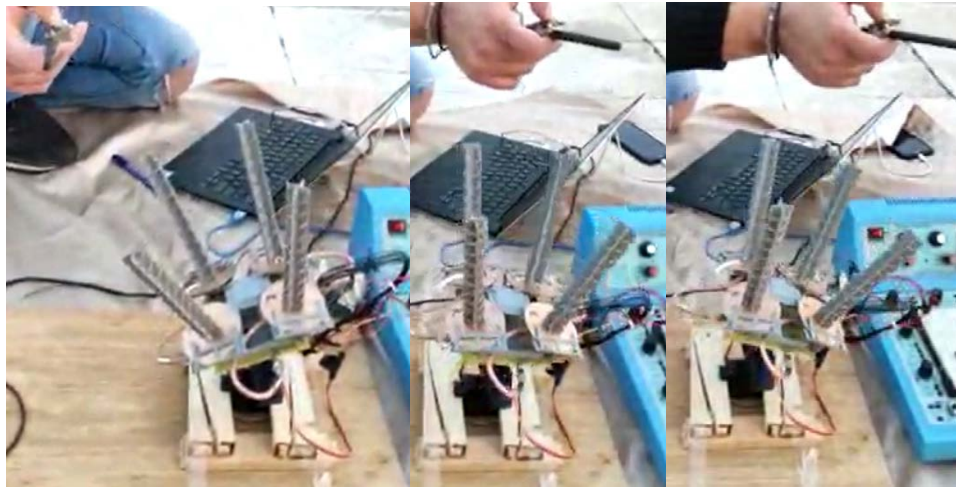
- Δοκιμή μηχανισμού ανίχνευσης και δοκιμή ανίχνευσης μη επανδρωμένου αεροχήματος
- Δοκιμή και μέτρηση ασύρματης μεταφοράς ισχύος σε rectenna και δοκιμή ασύρματης μεταφοράς ισχύος σε αερομεταφερόμενη rectenna
- Λήψη εργαστηριακών μετρήσεων από διαδικασία δοκιμής ασύρματης μεταφοράς ισχύος
- Δοκιμή αυτόνομου οχήματος φόρτισης

Λόγω των περιοριστικών μέτρων, τα οποία επιβλήθηκαν εξ' αιτίας του κορονοϊού, δεν ήταν δυνατή η τελική διεξαγωγή ορισμένων πειραματικών δοκιμών, σε εξωτερικούς χώρους με τη χρήση Drone και υψηλής ισχύος πομπών. Δυστυχώς, οι πομποί φόρτισης, οι οποίοι παραγγέλθηκαν από το εξωτερικό, δεν παραδόθηκαν. Το σενάριο όμως προσαρμόστηκε και εξομοιώθηκαν πρακτικά οι πειραματικές δοκιμές, με εργαστηριακά όργανα όπου αυτό ήταν αναγκαίο, ενώ στις υπόλοιπες περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν οι πραγματικοί μηχανισμοί και τα συστήματα, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια.

Δοκιμή Μηχανισμού Ανίχνευσης

Το σύστημα της Εικ. 58, δοκιμάστηκε εκτεταμένα, αρχικά στο έδαφος και διάφορες αποστάσεις, με τη χρήση ως στόχου πομπού Boscam 5.8Ghz, ισχύος 200mW(Tx5808) και πέτυχε τον εντοπισμό και ανίχνευση στόχου. Στη συνέχεια, το σύστημα δοκιμάστηκε με προσαρμογή του πομπού σε μη επανδρωμένο αερόχημα, σε διαφορετικά περιβάλλοντα και αποστάσεις. Οι δοκιμές κατέδειξαν την ικανότητα του ανιχνευτή για εντοπισμό κινούμενου

αεροχήματος με ταχύτητα μέχρι και 45χ.α.ω, σε αποστάσεις μέχρι τα 100μ και ακρίβεια 5°. Το σύστημα κατέδειξε δυνατότητες πολύ μεγαλύτερης εμβέλειας εντοπισμού αλλά δυστυχώς δεν κατέστησαν δυνατές περαιτέρω δοκιμές λόγω των περιορισμών. Παρά τα πιο πάνω το αρχικό όριο των 25μ. που τέθηκε ως στοχος υπερκαλύφθηκε.



Εικόνα 58, Δοκιμή Ανταπόκρισης Ραδιοανιχνευτή με Χρήση Κινούμενου Πομπού TX-5808 (Βιντεοκλιπ εργαστηριακών Δοκιμών)

Δοκιμή Ασύρματης Μεταφοράς Ενέργειας σε Rectenna

Για την εξακρίβωση των ενεργειακών αναγκών του Drone που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές και τον καθορισμό της πειραματικής διάταξης σε συνδυασμό με τον τύπο του ανορθωτή τάσης που κατασκευάστηκε, λήφθηκαν τα στοιχεία της μπαταρίας και του κατασκευαστή. Διαπιστώθηκε ότι, οι ενεργειακές ανάγκες φόρτισης ενός μέσου drone βάρους 1,5κ και διαστάσεων 35X35, που κυμαίνονται στα 20W, δεν μπορούν να ικανοποιηθούν με απλή πειραματική διάταξη και μειωμένη ισχύ εκπομπής, η οποία καθορίστηκε στο 1W, λόγω των περιορισμών ασφαλείας που ισχύουν για τις ασύρματες εκπομπές. Οι μετρήσεις υπολογίστηκαν θεωρητικά στις διάφορες αποστάσεις και παρουσιάζονται στον πίνακα 3. Για διάφορες αποστάσεις και επίπεδα ισχύος, στη συχνότητα των 900 MHz, με $G_t=14\text{dBi}$ και $G_r=8\text{dBi}$, λήφθηκαν οι παρακάτω υπολογισμοί:

Ισχύς Εκπομπής(W)	Ισχύς Εκπομπής(dBm)	Free Space Loss(dB)	Απόσταση(m)	RSSI(dBm)	RSSI(W)
		35.54	20	-0.1210	0.000972
		29.52	10	5.8995	0.003890
		23.50	5	11.9202	0.015560
		9.52	1	25.8995	0.389005
5	37		20	3.858360	0.002431
			10	9.878960	0.009725
			5	15.89956	0.038900
			1	29.87896	0.972514
10	40		20	6.868660	0.004862
			10	12.88926	0.019450
			5	18.90986	0.077801
			1	32.88926	1.945028

Πίνακας 4, Υπολογισμός Απωλειών Ελευθέρου Χώρου σε Σχέση με την Απόσταση
 Η διαδικασία προσομοιώθηκε στο λογισμικό `trunet wireless` με πέντε(5) πομπούς, και ισχύ

W έκαστος, όπως φαίνεται στην εικ.59, με αποτέλεσμα τη λήψη ενέργειας 1.88w για 1 πομπό σε απόσταση 20μ. και 10.98w για πλήθος πέντε(5) πομπών.



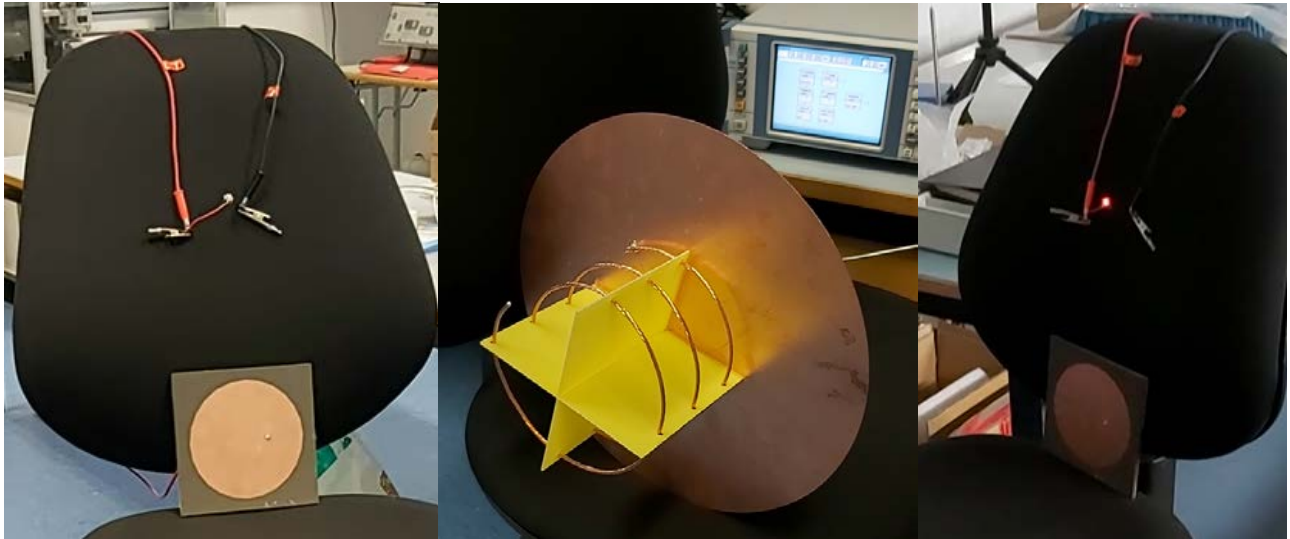
Εικόνα 59, Προσομοίωση Εκπομπής Ενέργειας Trunet, σε Drone στην απόσταση 20μ, ύψος 10μ, από 5 οχήματα φόρτισης με ισχύ εκπομπής, 20W έκαστο

Στη συνέχεια διενεργήθηκε πρακτική υλοποίηση μικρότερης κλίμακας στο εργαστήριο, με χρήση γεννήτριας συχνοτήτων και ισχύ 0.1 W(20dBm), της ελικοειδούς κεραίας πομπού και της κυκλικής εκτυπωμένης κεραίας, προσαρμοσμένης στον ανορθωτή 3 σταδίων που παρουσιάστηκαν στα κεφ. 4,5 και 6 αντίστοιχα. Στον ανορθωτή τάσης, προσαρμόστηκε λυχνία led κόκκινου χρώματος, η οποία άναψε σε απόσταση 2μ. Η διαδικασία παρουσιάζεται στην εικ.58. Η μετρηθείσα ενέργεια στην έξοδο, ανήλθε σε 5mW. Η τάση εισόδου στον ανορθωτή μετρήθηκε στα 0.4V ενώ η τάση εξόδου κυμάνθηκε στα 2,4 VDC. Η αποδοτικότητα RF-DC πλησίασε το 70%.

7.3 Δοκιμή Αυτόνομου Οχήματος Φόρτισης

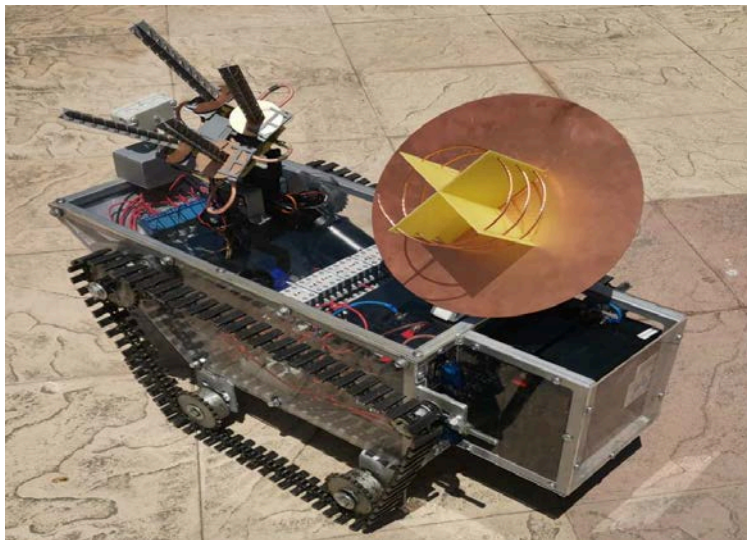
Το αυτόνομο όχημα φόρτισης(chargebot) που παρουσιάστηκε στο Κεφ.5, έλαβε τα στοιχεία θέσης του στόχου από τον ραδιοεντοπιστή, μέσω δικτύου WiFi και συγκρίνοντας τα με τη θέση και την γωνιά αζιμουθίου του από το δέκτη GPS και την IMU(MPU 6050) αντίστοιχα, προσαρμόσε την κίνηση και την κλίση των σερβομηχανισμών της κεραίας φόρτισης, ώστε να εκπέμπεται το ΗΜ κύμα με ικανοποιητική ακρίβεια στο στόχο, μόνο για την πρώτη κίνηση. Οι επόμενες κινήσεις χαρακτηρίστηκαν από ολισθήσεις με αποτέλεσμα την έλλειψη ακρίβειας, λόγω της αδυναμίας των αλγορίθμων για υπολογισμό των διαφορών στα διαφορικά κινήσεως του οχήματος κατά τις στροφές. Η διαπίστωση δεν προκάλεσε έκπληξη, καθώς είναι γνωστές οι προσπάθειες της ερευνητικής κοινότητας για εξεύρεση λύσεων.

Για αντιμετώπιση της πρόκλησης, αποφασίστηκε η συνεγκατάσταση του συστήματος ραδιοεντοπισμού και φόρτισης στο ίδιο ρομποτικό όχημα(εικ 61), ώστε να ελέγχεται συνεχώς η οριζόντια κλίση(γωνιά αζιμουθίου) του στόχου και να αντισταθμίζεται με την αντιπαραβολή



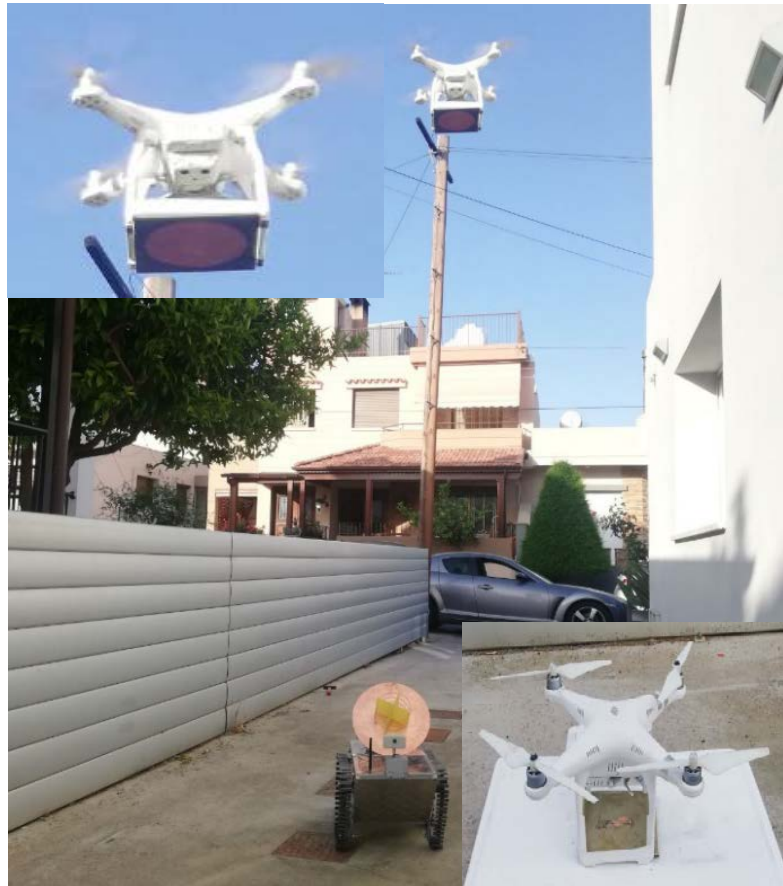
Εικόνα 60, Πειραματική Δοκιμή Εκπομπής Ενέργειας σε Rectenna με αφή λυχνίας led στην απόσταση 2.5μ, με ισχύ εκπομπής 0.1W(20dBm)

της γωνίας του οχήματος που εξασφαλίζεται από το IMU – Mpu 6050. Το σχετικά χαμηλό κόστος των υλικών του ραδιοεντοπιστή, επιτρέπει την εγκατάσταση ραδιοεντοπιστή σε κάθε όχημα φορτιστή.



Εικόνα 61, Αυτόνομο Όχημα Φόρτισης με Ραδιοεντοπιστή

Δυστυχώς τα περιοριστικά μέτρα δεν κατέστησαν δυνατή την ολοκληρωμένη δοκιμή του τελικού πρωτοτύπου του αυτόνομου οχήματος σε ικανοποιητικό χώρο, αλλά μια αρχική δοκιμή σε στενό πλαίσιο όπως αυτή παρουσιάζεται στην Εικ.62, κατέδειξε ικανοποιητικά αποτελέσματα και επιβεβαίωσε την κίνηση του αυτόνομου οχήματος, την ανίχνευση και την εκπομπή ενέργειας στο ιπτάμενο αερόχημα.



Εικόνα 62, Δοκιμή ανίχνευσης και φόρτισης Drone DJI Phantom 3 Advanced με προσαρμοσμένη Rectenna

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα της μεταπτυχιακής διατριβής βεβαιώνουν τις αρχικές υποθέσεις, περι της δυνατότητας εντοπισμού και φόρτισης ενός ιπτάμενου αεροχήματος(Drone).

Κατά τη διάρκεια της έρευνας, υλοποιήθηκαν με επιτυχία τα ακόλουθα:

α. Κατασκευάστηκε καινοτόμος παθητικός ραδιοεντοπιστής, ανιχνευτής και καταδείκτης ιπτάμενων αεροχημάτων, ο οποίος δοκιμάστηκε επανειλημμένα στο πεδίο. Επέδειξε αξιοσημείωτες δυνατότητες, σε συνδυασμό με το πολύ χαμηλό κόστος κατασκευής. Δημιουργεί δε αξιολογες μελλοντικές προοπτικές περαιτέρω ανάπτυξης, συνδυασμού με άλλα συστήματα και αισθητήρες, αλλά και βελτίωσης. Επιπρόσθετα, η ασύρματη αποστολή των πληροφοριών θέσεως στα οχήματα φόρτισης η οποία ενσωματώθηκε με πομπό WiFi, καθιστά δυνατή την καθοδήγηση των οχημάτων φόρτισης και των ακτίνων στο αερόχημα στόχο.

β. Επιτεύχθηκε η υλοποίηση διάταξης ανορθωτή πολλαπλασιασμού τριών(3) σταδίων, με πολύ χαμηλή ευαισθησία, αποδοτικότητα που κυμάνθηκε στο 70%, μειωμένες διαστάσεις, βάρος και κόστος. Η διάταξη ανορθωτή(rectenna), προσαρμόστηκε και λειτούργησε επιτυχώς σε ιπτάμενο αερόχημα, με τη μεταφορά και μετατροπή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας σε σταθερή τάση, η οποία διοχετεύτηκε σε ιπτάμενο Drone, γεγονός που αποτελεί επίσης καινοτομία, καθώς δεν έχει υλοποιηθεί παρόμοιο εγχείρημα στο παρελθόν.

γ. Κατασκευάστηκε με επιτυχία επίσης, πρωτοτυπο αυτόνομο όχημα φόρτισης τύπου ερπυστριοφότου άρματος, στο οποίο προσαρμόστηκαν σερβομηχανισμοί, πομπός φόρτισης και ελικοειδής κεραία φόρτισης. Το όχημα λαμβάνοντας πληροφορίες θέσεως του στόχου από τον ραδιοεντοπιστή μέσω WiFi και προβαίνοντας σε σύγκριση με τα δικά του στοιχεία θέσης και αζιμουθιο από τον δέκτη GPS και την αδρανειακή μονάδα μέτρησης(IMU), μπορεί να επιτύχει την αυτόνομη κίνηση του και την καθοδήγηση των ακτίνων στο στόχο με περιορισμούς. Οι δυσχέρεια ακριβούς μετάβασης στη νέα θέση εξαρτάται κυρίως από τις παρεκλίσεις που παρουσιάζονται, λόγω των απωλειών των διαφορικών μετάδοσης της κίνησης και της έλλειψης άλλων βοηθημάτων συνεχούς διόρθωσης της πορείας του. Η αντιμετώπιση της εν λόγω πρόκλησης, πραγματοποιήθηκε με συνεγκατάσταση του συστήματος ραδιοεντοπισμού και φόρτισης στο ίδιο ρομποτικό όχημα(εικ 61), ώστε να ελέγχεται συνεχώς η οριζόντια κλίση(γωνία αζιμουθίου) του στόχου και να αντισταθμίζεται με την αντιπαραβολή της γωνίας του οχήματος που εξασφαλίζεται από το IMU – MPU 6050. Το σχετικά χαμηλό κόστος των υλικών του ραδιοεντοπιστή, επιτρέπει τη συνεγκατάσταση ραδιοεντοπιστή σε κάθε όχημα φορτιστή.

Με συνδυασμό όλων των πιο πάνω συστημάτων αλλά και τμηματικά, αποδείχθηκε ότι, είναι δυνατή η ασύρματη μετάδοση ενέργειας σε μεγάλες σχετικά αποστάσεις, αλλά, για να είναι αυτή ικανή να φορτίζει συσκευές μέσης κατανάλωσης 20W όπως αυτές κατηγοριοποιούνται από το Παγκόσμιο Συνέδριο Ασύρματης Φόρτισης στο [15], απαιτούνται σοβαρές τιμές ισχύος εκπομπής. Οι απώλειες ελευθέρου χώρου, επιφέρουν δραστική μείωση της εκπεμπόμενης ενέργειας. Για αντιμετώπιση της απαγόρευσης εκπομπών υψηλής ισχύος, όπως αυτές ρυθμίστηκαν με τα πλαίσια FCC-CE, αξίζει περαιτέρω διερεύνησης και το ενδεχόμενο συνεκμετάλλευσης (harvesting) πηγών ενέργειας που διαδίδονται στον αέρα από ασύρματες εκπομπές άλλων συστημάτων, όπως πχ η κινητή τηλεφωνία, οι τηλεοπτικοί - ραδιοφωνικοί σταθμοί, κα.

Απο τις εξομοιώσεις και τις δοκιμές με διάφορους τύπους κεραιών, διαπιστώθηκε ότι, η διαφορά πολικότητας μεταξύ πηγών και δεκτών αποτελεί σοβαρό περιοριστικό παράγοντα στις περιπτώσεις ιπτάμενων στόχων, γεγονός που αντιμετωπίστηκε επιτυχώς στα πλαίσια της διατριβής, με χρήση ελικοειδών και τυπωμένων κεραιών κυκλικής πολικότητας.

Οι εξομοιώσεις στο Trunet, κατέδειξαν επίσης ότι, η διαφορά φάσης των εκπεμπόμενων ακτίνων, συντελεί καταστροφικά με αυτοαναίρεση των ραδιοκυμάτων. Συνεπώς, η συμφασική εκπομπή ραδιοκυμάτων, η οποία μπορεί επιτευχθεί με ψηφιακά ελεγχόμενες διατάξεις συμφασικών κεραιών, αποτελεί ικανή και πολλά υποσχόμενη προϋπόθεση για την άυξηση της αποδοτικότητας των συστημάτων WPT σε κινούμενους στόχους. Η δε συνδυαστική χρησιμοποίηση των τεχνικών ακτινιδιαμόρφωσης, εκτιμάται ότι θα καταστήσει λιγότερο απαραίτητη τη χρησιμοποίηση σερβομηχανισμών που συνοδεύονται από τις σχετικές απώλειες και τυχόν σφάλματα ακρίβειας.

Για όλα τα πιο πάνω, απαιτούνται συνήθως πολυέξοδες και υψηλής ακρίβειας διατάξεις, όμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται στα πλέον σύγχρονα ραντάρ. Ανεξάρτητα όμως, οι εφαρμογές επιλεκτικής ακτινοδιαμόρφωσης και χρήσης πολλαπλών κεραιών, οι οποίες εξελίσσονται σήμερα στις νέες εκδόσεις κινητής τηλεφωνίας και στα σύγχρονα πρότυπα 802.11, αφήνουν ελπίδες και θετικές προοπτικές, για δραστική μείωση του κόστους, το οποίο δυστυχώς εξακολουθεί να είναι απαγορευτικό για μη χορηγούμενες έρευνες.

Η εξασφάλιση υψηλής αποδοτικότητας και πολλαπλασιασμού στη διάταξη ανόρθωσης δύναται υπό προϋποθέσεις (σε ελεγχόμενη απόσταση) να εξισορροπήσει τις απώλειες ελευθέρου χώρου, οι οποίες τετραπλασιάζονται με κάθε διπλασιασμό της απόστασης. Κατά την πειραματική δοκιμή, η απομένουσα ισχύς εισόδου στον ανορθωτή μετά από εκπομπή ισχύος 100mw ήταν μόλις 4.4mw σε απόσταση 2μ., μια RF-RF συνολική αποδοτικότητα δηλαδή της τάξεως του τιση του drone της πειραματικής διάταξης (20W-15v/2A), σε απόσταση 20μ., θα απαιτούσε εκπομπή H/M κυμάτων ισχύος 1000W ή 50 οχήματα φόρτισης με ισχύ 20W, ενώ αν ληφθεί υπόψη η μη γραμμική απόκριση των ανορθωτικών διατάξεων, εκτιμάται ότι θα απαιτηθεί πολύ υψηλότερη ισχύς. Τα επιτευχθέντα αποτελέσματα δεν αποκλίνουν από τις προσομοιάζουσες περιπτώσεις δοκιμών, οι οποίες διενεργήθηκαν στα [16], [17] και [18], [19], ενώ αν ληφθεί υπόψη το μικρό χρονικό διάστημα υλοποίησης της έρευνας και τα λιγοστά μέσα που διατέθηκαν σε συνδυασμό με τους περιορισμούς μπορούν να κριθούν ως άκρως ικανοποιητικά και ενδεχομένως βελτιωμένα με τα προαναφερθέντα επιτεύγματα.

Μια υποσχόμενη τεχνική υπέρβασης των απωλειών ελευθέρου χώρου, αποτελούν οι μέθοδοι της συμφασικής διάταξης κεραιών, σε συνδυασμό με την εξασφάλιση χαρακτηριστικά υψηλών κερδών και κατευθυντικότητας, για τις κεραίες εκπομπής και λήψης. Έχει αναφερθεί και προηγουμένως ότι σύγχρονά ραντάρ με ακτινοδιαμόρφωση και τυπωμένες διατάξεις κεραιών είναι ικανά να επιτυγχάνουν κέρδη κεραιών της τάξης των 50dBi. Στις περιπτώσεις αυτές η εξίσωση

ε

π

ι

Ανεξάρτητα από τις αδυναμίες που προαναφέρθηκαν, η διατριβή βεβαιώνει ότι, για τις ανάγκες τροφοδοσίας συσκευών με μικρές ενεργειακές ανάγκες, όπως οι διάφορες IoT εφαρμογές, είναι εύκολα δυνατή η παροχή ικανού φορτίου, ώστε αυτές να φορτίζονται αλλά και να τηρούνται σε συνεχή λειτουργία.

α

Το σύνολο των ανωτέρω διαπιστώσεων, οδηγούν αβίαστα στο συμπέρασμα ότι, η καταβολή προσπαθειών για περαιτέρω μελέτη της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας με μικροκύμματα, αξίζει να συνεχιστεί. Ο συνδυασμός εφαρμογών με μικροκυμματικές συχνότητες, οι οποίες ευνοούν την εξασφάλιση υψηλότερων κερδών κεραιών και συμφασικών διατάξεων με μικρότερες διαστάσεις, καταδικνύουν το σωστό δρόμο. Η περαιτέρω βελτίωση των μεθόδων εντοπισμού και ανίχνευσης αεροχημάτων, όπως αυτή που παρουσιάστηκε ή συνδυασμού της με τυχόν άλλους αισθητήρες όπως η οπτική αναγνώριση κ.α, είναι δυνατό να εξασφαλίσουν ακόμα ~~άιο~~ αυξημένη ακρίβεια, ώστε οι πολύ στενές και συγκλίνουσες δέσμες ακτίνων φόρτισης, να κατευθύνονται με πλήρη αποδοτικότητα στο στόχο.

ε

Οι πρωτοπόροι ερευνητές στους τομείς της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας N.Tesla και W.C. Brown, χρειάστηκαν 50χρόνια έρευνας και δοκιμών για κάθε σειρά επιτευγμάτων τους. Άφησαν όμως μια τόσο πολύτιμη κληρονομιά στις χώρες και στις εταιρίες που τους στήριξαν, η οποία τις κατέστησε σήμερα, κυρίαρχες σε παρεμφερείς τομείς, οι οποίοι αναπτύχθηκαν μέσα από την συνδυαστική υλοποίηση των αποτελεσμάτων των ερευνών τους(Raytheon, Marconi,

λ

ε

Άλλη μια προφητική ρήση του N. Tesla, παραμένει σημαδιακή 120 χρόνια μετά. Η παρομοίωση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας ως τη σύγχρονη φωτιά που πρόσφερε ο Προμηθέας στον άνθρωπο, δεν αφήνει περιθώρια σκεπτικισμού περί των διαδικασιών στρατηγικής έρευνας, ~~ρη~~φορηματοδότησης και στήριξης. Οι ευκαιρίες αυτές είναι πλέον προσιτές σε όλες τις ανεπτυγμένες χώρες, ενώ καθίσταται πλέον σαφής η διαπίστωση ότι, αυτές αποτελούν και τις κρίσιμες δυνατότητες που είναι ικανές να κατατάξουν μια χώρα, τα εκπαιδευτικά ιδρύματα και τη βιομηχανία, στον παγκόσμιο ερευνητικό χάρτη επιστημονικών εφαρμογών, επιτευγμάτων και ~~ε~~χρευρέσεων.

ώ

Μια συνήθης διαπίστωση, είναι η ευρεία επικράτηση σε πανεπιστημιακούς και ερευνητικούς κύκλους της πεποίθησης ότι, η ανάπτυξη ή ο συνδυασμός έρευνας στρατιωτικών εφαρμογών, αποτελεί επιθετική και πολεμοχαρή τακτική, η οποία κινείται κατά της ειρήνης. Η πεποίθηση αυτή δεν ευσταθεί, καθώς είναι λογικό ότι η ασφάλεια και η εμπιστευτικότητα κάθε ισχυρής χώρας, στηρίζεται στα τεχνολογικά επιτεύγματα και την εγχώρια επιστημονική έρευνα. Ας θυμηθούμε πώς προστάτευσαν τη Μ. Βρετανία τα μυστικά ραντάρ της εγχώριας Marconi, που κατασκευάστηκαν με την εγχώρια υλοποίηση του Megatron, όταν εντόπιζαν τον εχθρό από μακριά να κινείται ιπτάμενος για βομβαρδισμό και ολική καταστροφή του Λονδίνου.

π

ρ

ο

υ

π

ο

Οι έρευνες του Brown υπήρξαν στενά συνιφασμένες και χορηγούμενες με την τότε ικανοποίηση των υψίστων αμυντικών αναγκών των ΗΠΑ, οι οποίες υλοποιούνται πολυδιάστα στις μέρες μας, σε συνδυασμό με όλες εκείνες τις εφαρμογές οι οποίες χρησιμοποιούνται και σε άλλους τομείς, όπως πχ οι ηλεκτρογεννήτριες, οι φούρνοι μικροκυμάτων, οι επαγωγικές εστίες, τα συστήματα ελεγχόμενης στάθμευσης, η κινητή τηλεφωνία και τα δίκτυα WiFi, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα κ.π.α.

Τελειώνοντας τη σύνταξη της διατριβής, περιήλθε στην αντίληψη μου, επιστημονικό άρθρο κού αεροχήματος(X-35B), το οποίο θα φορτίζεται από ηλιακή ενέργεια του σύμπαντος, μέσω συμφασικών κεραιών δορυφόρων. Η ενέργεια θα λαμβάνεται από τον ήλιο θα μεταρέπεται σε μικροκύματα και θα μεταδίδεται σε κινούμενα αεροχήματα ή δορυφόρους χαμηλότερης τροχιάς(LEOSAT). Κατά όμοιο τρόπο, το άρθρο αναφέρεται με επιστημονικά αναγνωρίζει τις αδυναμίες των ακτίνων λείζερ έναντι εμποδίων και απορροφήσης, ενώ επαναπροωθεί τη μικροκυμματική μέθοδο, ως παράγοντα ικανό να αλλάξει τα δεδομένα(game changer). Το μεγαλύτερο σύνολο των τεχνικών που προτείνονται, αναλύθηκαν στη διατριβή, προσφέροντας έτσι άλλη μια επιβεβαίωση της αναγκαιότητας και χρησιμότητας της παρούσας διατριβής. Οι εξελίξεις αποδικνύονται ραγδαίες, ενώ εκτιμάται ότι θα αναμένονται με ενδιαφέρον από το σύνολο της επιστημονικής κοινότητας!

Βιβλιογραφία

- [1] «Radio Frequency Safety,» FCC, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.fcc.gov/general/radio-frequency-safety-0>.
- [2] B. W. C., «Rectenna Technology Program,» Raytheon Co, NASA, USA, 1982.
- [3] A
- [4] H. Hertz, «Dictionary of Scientific Biography,,» τόμ. Vol 6, pp. 340-49.
- [5] S. N., Wireless Power Transfer Theory Technology and Applications, Wiley, 2014.
- [6] R. ITU-R, « SM.2392-0 (08/2016), Applications of wireless power transmission via radio frequency beam,» 2016.
- [7] J. M. G. J. A. A. Triviño-Cabrera, Wireless Power Transfer for Electric Vehicles, Springer, 2019.
- [8] B. C. A., Antenna Theory Analysis and Design, Wiley, 2016.
- [9] K. T. Q. C. Z. Z. Derrick Wing, Wireless Information and Power Transfer, Theory and Practice, WILEY, 2019.
- [10] U
k
- [11] ITU-R, «SM.2392-0, Applications of wireless power transmission via radio frequency beam,» ITU-R, 2016.
- [12] B. Alan, Wireless Positioning Technologies and Applications, ARTECH HOUSE, INC., 2008.
- [13] U. C. F. M. Corporation, J. Krumm, Chapman & Hall/CRC Taylor & Francis Group , 2010.

- [14] P. V. A. Q. D. C. L. V. S. P. S. Nikolaou, «3-D printed Helical Antenna for UAV Transmission Signal Direction of Arrival (DoA) Detection,» 2019.
- [15] S. F. o. W. P. T. Applications, «www.itu-r.com,» 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: www.itu-r.com.
- [16] K. S. W. K. J.-W. Z. K. Li, «Design of 2.45GHz Microwave Wireless Power Transfer System for Battery Charging Applications,» σε *Electromagnetics Research Symposium* , Singapore, 2017.
- [17] K. O. M. Y. K. H. Koichi Ogawa, «High Efficiency Small-Sized Rectenna Using a High-Q LC Resonator for Long Distance WPT at 950 MHz,» σε *IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission*, 2012.
- [18] M. T. L. M., «Efficient Antenna Design for Wireless Power Transmission for MAV Applications,» Naval Postgraduate School, USA, 2015.
- [19] H. E. Mohamed Aboualalaa, «Rectenna Systems for RF Energy Harvesting and Wireless Power Transfer,» σε *Rectenna Systems for RF Energy Harvesting and Wireless Power Transfer* , Cairo, LicenseeIntechOpen, 2019.
- [20] T. Brett, «www.thedrive.com,» 08 May 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: www.thedrive.com. [Πρόσβαση 10 May 2020].
- [21] w
- [22] ITU-R, «M.2171, Characteristics of Unmanned Aircraft Systems and Spectrum Requirements to Support their Safe Operation in Non-Segregated Airspace,» ITU-R, 2009.
- [23] V. J., *Antenna Engineering Handbook*, The McGraw-Hill Companies, 2007.
- [24] Wireless Power Consortium Standards, «www.wirelesspowerconsortium.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: www.wirelesspowerconsortium.com.

- [25] J. M. L. Y. Y. K. Y. L. K. C. H. S. Trinh-Van, «Improvement of RF Wireless Power Transmission Using a Circularly Polarized Retrodirective Antenna Array with EBG Structures,» Sungkyunkwan University, School of Electronic and Electrical Engineering.
- [26] M. B. M. LU, «Wireless Charging Techniques for UAVs,» *IEEE Access*, 28 May 2018.
- [27] D. X. R. S. Y. H. Wenxing Zhong, *Wireless Power Transfer Between Distance and Efficiency*, Springer, 2020.
- [28] K. Siddabattula, *Why not a Wire the Case for Wireless Power*, Texas Instruments.

Συντομογραφίες

Συντ/φία	Αγγλική/Γαλλική Όρολογία	Ελληνική Ορολογία
AC	Alternative Current	Εναλασσόμενο ρεύμα
ADS	Advanced Design System	Προηγμένο Λογισμικό Σχεδίασης
AOA	Angle of Arrival	Γωνιά Άφιξης
CE	Conformitee Europeene	Ευρωπαϊκή Πιστοποίηση
CST	Microwave Simulator Software	Λογισμικό Μικροκυματικής Εξομοίωσης
DC	Direct Current	Σταθερή Τάση
ENSI	Ecole National Superiere d'Injenieurs	Παγκόσμιος Ευρωπαϊκός Οργανισμός Προτυποποίησης
ETHER	Energy Transmision Toward High- altitude long Endurance airship Experiment	Πείραμα Εκπομπής Ενέργειας προς Υψηλά Ιπτάμενα Αεροχήματα Μακράς Εμβέλειας
ETSI	European Telecommunications Standarts Institute	Ευρωπαϊκός Οργανισμός Προτυποποίησης Τηλεπικοινωνιών
FCC	Federal Communications Commition	Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών
FET	Field Effect Transistor	Τρανσίστορ

GLONASS	Global Navigation Satellite System	Παγκόσμιο Σύστημα Δορυφορικής Ναυτιλίας
GPS	Global Positioning System	Παγκόσμιο Σύστημα Γεοεντοπισμού
GSM	Global System for Mobile Communications	Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Enjineers	Ίδρυμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών
IMU	Innertial Measurement Unit	Αδρανειακή Μονάδα Μέτρησης
ITU	International Telecommunication Union	Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών
LEOSAT	Low Orbit Satellite	Δορυφόροι Χαμηλής Τροχιάς
MILAX	Microwave Lifted Airplane	Αεροσκάφος Αιωρούμενο με Μικροκύματα
MIT	Microwave Information System	Σύστημα Πληροφοριών Μικροκυμάτων
MIMO	Multiple Input Multiple Output	Πολυόδευση Πολλαπλής Εισαγωγής και Εξαγωγής Σημάτων
MOFSET	Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor	Τρανσίστορ – Κρυσταλλοτρίοδος
MPT	Microwave Power Transfer	Μικροκυματική Μεταφορά Ενέργειας
MUMIMO	Multiuser MIMO	Πολαπλά MIMO
PCB	Printed Cirquit Board	Εκτυπωμένη Πλακέτα Κυκλωμάτων
Rectenna	Rectifying Antenna	Ανορθωτική Κεραία
RF	RadioFrequency	Ραδιοσυχνότητα

RSSI	Radio Strenght Signal Indicator	Δείκτης Ισχύος Ραδιοκυμάτων
SCHOTTKY	Type of Diode	Τύπος Διόδου
SHARP	Stationary High Altitude Relay Platform	Στατική Πλατφόρμα Αναμετάδοσης Μεγάλου Ύψους
SMA	Subminiature Version A	Υποροσαρμογέας Καλωδίου Κεραίας
SMD	S u	Τεχνολογία Προσαρμοσμένης Επιφάνειας
SPSS	Solar Power Satellite System	Ηλιακό Δορυφορικό Σύστημα Ενέργειας
TOA	Time of Arrival	Χρόνος Άφιξης
UAV	Unmanned Aerial Vechicle	Μη Επανδρωμένο Αερόχημα
VNA	Vector Network Analyser	Διανυσματικός Αναλυτής Δικτύων
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio	Λόγος Κυματισμού Τάσης σε Τάση
WIFI	Wireless Fidelity	Ασύρματη Πιστοποίηση
WiPo	Wireless Power	Ασύρματη Ενέργεια
WPT	Wireless Power Transfer	Ασύρματη Μεταφορά Ενέργειας