HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Nguyễn Hải Long

NGHIÊN CỨU, THIẾT KẾ BỘ THU THẬP NĂNG LƯỢNG TỪ SÓNG VÔ TUYẾN ỨNG DỤNG TRONG IoT

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ KỸ THUẬT

(*Theo định hướng ứng dụng*)

HÀ NỘI - NĂM 2025

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Nguyễn Hải Long

NGHIÊN CỨU, THIẾT KẾ BỘ THU THẬP NĂNG LƯỢNG TỪ SÓNG VÔ TUYẾN ỨNG DỤNG TRONG IoT

Chuyên ngành: Kỹ thuật điện tử

Mã số: 8.52.02.03

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ KỸ THUẬT

(*Theo định hướng ứng dụng*)

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

TS. LÊ MINH TUẤN

HÀ NỘI - NĂM 2025

LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan tất cả nội dung trong đề án *"Nghiên cứu, thiết kế bộ thu thập năng lượng từ sóng vô tuyến ứng dụng trong IoT"* là công trình nghiên cứu của riêng tôi dưới sự hướng dẫn, chỉ bảo, góp ý của TS. Lê Minh Tuấn, giảng viên Khoa Kỹ thuật điện tử 1, Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông. Các số liệu, kết quả nêu trong đề án tốt nghiệp là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác và không sao chép dưới mọi hình thức. Các tài liệu tham khảo trong đề án được trích dẫn đầy đủ, rõ ràng.

Tôi xin chịu mọi trách nhiệm về công trình nghiên cứu của riêng mình!

Tác giả đề án

Nguyễn Hải Long

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN i
LỜI CẢM ƠN iv
MỤC LỤC ii
DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT iv
DANH MỤC BẢNG vi
DANH MỤC HÌNH ẢNH vii
MỞ ĐẦU ix
Chương 1. Tổng quan về giải pháp thu thập năng lượng từ sóng vô tuyến 1
1.1. Tổng quan về thu thập năng lượng sóng vô tuyến 1
1.1.1. Các dạng năng lượng trong môi trường 1
1.1.2. Bộ chuyển đổi năng lượng sóng điện từ 3
1.1.3. Lịch sử ra đời của công nghệ thu thập năng lượng RF 5
1.1.4. Vai trò của công nghệ thu thập năng lượng RF trong lĩnh vực IoT 6
1.2. Phân tích, so sánh, đánh giá các giải pháp của các hệ thống thu thập năng lượng từ sóng vô tuyến trên thế giới 7
1.3. Hệ định hướng sóng điện từ 9
1.3.1. Đường truyền mạch dải siêu cao tần 9
1.3.2. Chất nền 15
1.4. Bộ lọc thông dải 17
1.5. Các giải pháp chỉnh lưu ứng dụng trong RFEH 18
1.6. Các nút cảm biến IoT 21
1.7. Kết luận chương 1 23
Chương 2. Nghiên cứu thiết kế bộ thu thập năng lượng từ sóng vô tuyến 24
2.1. Sơ đồ khối bộ thu thập năng lượng 24
2.2. Xây dựng tính năng và thông số kỹ thuật 25
2.2.1. Thông số hệ thống 25
2.2.2. Mạch lọc Diplexer 25
2.2.3. Mạch chỉnh lưu 1.8GHz 26
2.2.4. Mạch chỉnh lưu 2.1GHz 26
2.3. Phân tích và lựa chọn các giải pháp lọc vô tuyến 27
2.3.1. Nguyên lý thu thập năng lượng 27
2.3.2. Mạch lọc diplexer 32
2.3.3. Mạch chỉnh lưu rectifier 33

2.3.4. Diode Schottky **37**
2.4. Thiết kế cấu trúc, mô phỏng mạch Diplexer **40**
2.4.1. Giới thiệu phần mềm **40**
2.4.2. Thiết kế nguyên lý và mô phỏng layout **41**
2.5. Thiết kế và mô phỏng mạch chỉnh lưu **43**
2.5.1. Mạch chỉnh lưu 1.8GHz **44**
2.5.2. Mạch chỉnh lưu 2.1Ghz **46**
2.6. Kết luận chương 2 ..... **48**
Chương 3. Chế tạo, đo kiểm và đánh giá **49**
3.1. Các mạch thành phần bộ thu thập năng lượng sóng vô tuyến **49**
3.2. Đo đạc và đánh giá chất lượng bộ thu thập năng lượng **50**
3.2.1. Mạch lọc diplexer **50**
3.2.2. Mạch chỉnh lưu 1.8GHz **53**
3.2.3. Mạch chỉnh lưu 2.1GHz **56**
KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN TIẾP THEO **59**
1. Kết luận **59**
2. Định hướng phát triển **59**
TÀI LIỆU THAM KHẢO **60**

LỜI CẢM ƠN

Lời đầu tiên và trên hết, em xin bày tỏ lời cảm ơn sâu sắc đến người hướng dẫn khoa học TS. Lê Minh Tuấn – Giảng viên, Khoa Kỹ thuật Điện tử 1, Học viện Công nghệ Bưu chính viễn thông, người không chỉ hướng dẫn trực tiếp về mặt khoa học mà còn hỗ trợ em về mọi mặt và động viên để em có thể hoàn thành đề án này sau hơn một năm học thạc sĩ. Hơn nữa, chính những kiến thức, sự chỉ bảo tận tâm, sự động viên cổ vũ của thầy đã giúp em có nhiều cơ hội, dự định học lên những cấp cao hơn.

Em cũng xin chân thành cảm ơn toàn thể giảng viên của Khoa Kỹ thuật Điện tử 1 và khoa Đào tạo Sau Đại học đã luôn giúp đỡ, luôn nhiệt tâm giảng dạy, hướng dẫn và chia sẻ những kiến thức và kinh nghiệm quý báu cho em trong suốt những năm học vừa qua về lĩnh vực Hardware nói riêng và lĩnh vực điện tử nói chung. Đối với em, đây là một hành trình tương đối khó khăn và đầy thử thách, cả trong thời gian học tập cũng như nghiên cứu. Nhưng nhờ sự giúp đỡ và tận tình chỉ dạy của các thầy cô trong quá trình học thạc sĩ tại trường, em đã có thêm những kiến thức, được tạo nền tảng, dạy cách tư duy, định hướng để em có thể hoàn thành quá trình học tập và thực hiện đề án này và giúp em có thể tự tin hơn trong những hành trang phía trước của mình. Em sẽ mãi khắc ghi công ơn dạy dỗ này của các thầy cô trong Khoa Kỹ thuật điện tử 1 và Khoa Đào tạo Sau Đại học.

Em xin cảm ơn các anh chị và các bạn học viên của lớp M23CQDT01-B đã luôn sát cánh và đồng hành cùng em trong quá trình học tập tại trường và hoàn thành đề án.

Cuối cùng, em dành những lời yêu thương nhất đến gia đình em. Sự động viên, giúp đỡ và sự hi sinh, nhẫn nại của họ là động lực mạnh mẽ giúp tôi vượt qua mọi khó khăn để hoàn thành đề án này.

Xin chân thành cảm ơn!

DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT

Chữ viết tắt/ Ký hiệu	Nghĩa tiếng Anh	Nghĩa tiếng Việt
3G	Third Generation	Mạng di động thế hệ thứ 3
4G LTE	Fourth Generation Long Term Evolution	Công nghệ truyền thông di động 4G.
AC	Alternating Current	Dòng điện xoay chiều.
AM	Amplitude Modulation	Điều chế biên độ.
BTS	Base Transceiver Station	Trạm thu phát gốc trong mạng di động.
DC	Direct Current	Dòng điện một chiều.
EHF	Extremely high frequency	Tần số cực kỳ cao
EM	Electromagnetic	Điện từ học / sóng điện từ.
FM	Frequency Modulation	Điều chế tần số.
FSPL	Free Space Path Loss	Suy hao đường truyền trong không gian tự do.
HPF	High Pass Filter	Bộ lọc thông cao.
IMN	Impedance Matching Network	Mạch phối hợp trở kháng.
IoT	Internet of Things	Internet vạn vật
LPF	Low Pass Filter	Bộ lọc thông thấp.
MCU	Microcontroller Unit	Vi điều khiển.
PCB	Printed Circuit Board	Bảng mạch in.
PCE	Power Conversion Efficiency	Hiệu suất chuyển đổi năng lượng.
RF	Radio Frequency	Tần số vô tuyến
RFEH	Radio Frequency Energy Harvesting	Thu thập năng lượng từ sóng vô tuyến.
RFID	Radio Frequency Identification	Nhận dạng bằng tần số vô tuyến.
RX	Receiver	Bộ thu tín hiệu.
SHF	Super high frequency	Tần số cực cao
TEM	Transverse Electromagnetic Mode	Chế độ điện từ trường ngang
TM-TE	Transverse Magnetic / Transverse Electric	Chế độ từ ngang / điện ngang trong ống dẫn sóng.
TX	Transmitter	Bộ phát tín hiệu.
UHF	Ultra high frequency	Tần số siêu cao
VHF	Very high frequency	Tần số rất cao

DANH MỤC BẢNG

Bảng 1.1 Bảng so sánh các dạng năng lượng tái tạo 1
Bảng 1.2: So sánh một số nghiên cứu được công bố trên thế giới 8
Bảng 1.3: Bảng so sánh các thông số hai loại vật liệu 16
Bảng 1.4: Tổng hợp công suất tiêu thụ của các nút cảm biến thương mại 22
Bảng 2.1: Yêu cầu kỹ thuật hệ thống thu thập năng lượng 25
Bảng 2.2: Yêu cầu kỹ thuật tần số hoạt động của mạch lọc 25
Bảng 2.3: Yêu cầu kỹ thuật các tham số S-parameter của mạch lọc 26
Bảng 2.4: Yêu cầu kỹ thuật mạch chỉnh lưu 1.8GHz 26
Bảng 2.5: Yêu cầu kỹ thuật mạch chỉnh lưu 2.1GHz 27
Bảng 2.6: Liệt kê so sánh một số loại Diode thường được sử dụng cho thiết kế 39
Bảng 2.7: Các giá trị S-parameter mô phỏng 42
Bảng 2.8: Các linh kiện sử dụng trong mạch chỉnh lưu 43
Bảng 2.9: Các thông số mô phỏng mạch chỉnh lưu 1.8GHz 45
Bảng 2.10: Các thông số mô phỏng mạch chỉnh lưu 2.1Ghz 47
Bảng 3.1: Các giá trị S-parameter thực tế 51

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1.1: Nguồn phát sóng điện từ trong thực tế.....2
Hình 1.2: Sơ đồ hệ thống thu thập năng lượng sóng vô tuyến cơ bản.....4
Hình 1.3: Phổ tần số.....11
Hình 1.4: Cấu trúc đường truyền mạch dải [6].....12
Hình 1.5: Hình dạng tương đương của một dòng microstrip trường bán-TEM [6] 14
Hình 1.6: Bảng mạch in bằng tấm FR4 (trên) và Teflon PTFE (dưới).....15
Hình 1.8: Đặc tuyến biên độ thường áp dụng, gần với dạng chữ nhật lý tưởng.....18
Hình 1.9: Các dạng mạch chỉnh lưu dùng diode.....19
Hình 1.10: Các cấu hình của một số cấu trúc mạch nhân điện áp điển hình.....20
*Hình 2.1: Sơ đồ hệ thống thu thập năng lượng sóng vô tuyến chi tiết của hệ thống*24
Hình 2.2: Định nghĩa khoảng cách Rraunhofer.....28
Hình 2.3: Sơ đồ cơ bản của bộ lọc Diplexer.....32
Hình 2.4: Cấu trúc của mạch thu thập năng lượng sóng vô tuyến.....33
Hình 2.5: Các cấu hình mạng phối hợp trở kháng dải tần RF.....34
Hình 2.6: Mạch ghim điện áp và dạng sóng đầu ra.....36
Hình 2.7: Mạch chỉnh lưu nửa sóng và dạng sóng đầu ra.....36
Hình 2.8: Mạch chỉnh lưu nhân đôi điện áp và dạng sóng đầu ra.....37
Hình 2.9: Sơ đồ tương đương của diode Schottky.....38
Hình 2.10: Ảnh hưởng của điện trở lớp tiếp giáp lên hiệu suất chuyển đổi.....38
Hình 2.11: Ảnh hưởng của điện áp đánh thủng lên hiệu suất.....39
Hình 2.12: Ảnh hưởng điện dung lớp tiếp giáp lên hiệu suất chuyển đổi mạch chỉnh lưu.....39
Hình 2.13: Mô hình diode SMS7630, sử dụng thông số SPICE do nhà sản xuất cung cấp.....40
Hình 2.15: Giới thiệu một số công cụ hỗ trợ thiết kế chuyên nghiệp trong ADS.....41
Hình 2.16: Sơ đồ nguyên lý mạch diplexer.....41
Hình 2.17: Thiết kế layout mạch diplexer.....42
Hình 2.18: S-parameter mô phỏng ESM.....42
Hình 2.19: Sơ đồ nguyên lý mạch chỉnh lưu 1.8GHz.....44
Hình 2.20: Thiết kế layout mạch chỉnh lưu 1.8GHz.....44
Hình 2.21: Hệ số phản xạ, hiệu suất chuyển đổi và điện áp đầu ra của mạch chỉnh lưu 1.8GHz.....45
Hình 2.22: Sơ đồ nguyên lý mạch chỉnh lưu 2.1GHz.....46
Hình 2.23: Thiết kế layout mạch chỉnh lưu 2.1GHz.....46
Hình 2.24: Hệ số phản xạ, hiệu suất chuyển đổi và điện áp đầu ra của mạch chỉnh lưu 2.1GHz.....47

Hình 3.1: Hình ảnh thực tế các mạch thành phần 49
Hình 3.2: Hình ảnh đo mạch lọc diplexer 50
Hình 3.3: Các giá trị S-paramater đo thực tế 51
Hình 3.4: Đồ thị so sánh hệ số S11 mô phỏng và thực tế 52
Hình 3.5: Đồ thị so sánh hệ số S12 mô phỏng và thực tế 52
Hình 3.6: Đồ thị so sánh hệ số S13 mô phỏng và thực tế 52
Hình 3.7: Hệ số phản xạ thực tế mạch chỉnh lưu 1.8GHz 53
Hình 3.8: Đo dạng sóng đầu ra của mạch chỉnh lưu 1.8GHz tại Pin = 0dBm 54
Hình 3.9: Dạng sóng điện áp đầu ra tại Pin = 0dBm 54
Hình 3.10: Đo điện áp mạch chỉnh lưu 1.8GHz tại Pin = 0dBm 54
Hình 3.11: Đồ thị điện áp đầu ra theo công suất đầu vào 55
Hình 3.12: Đồ thị so sánh hiệu suất mô phỏng và hiệu suất thực tế 55
Hình 3.13: Hệ số phản xạ thực tế mạch chỉnh lưu 2.1Ghz 56
Hình 3.14: Đo dạng sóng đầu ra của mạch chỉnh lưu 2.1GHz tại Pin = 0dBm 56
Hình 3.15: Dạng sóng điện áp đầu ra tại Pin = 0dBm 56
Hình 3.16: Đo điện áp mạch chỉnh lưu 2.1GHz tại Pin = 0dBm 57
Hình 3.17: Đồ thị điện áp đầu ra theo công suất đầu vào 57
Hình 3.18: Đồ thị so sánh hiệu suất mô phỏng và hiệu suất thực tế 57

MỞ ĐẦU

Trong những năm trở lại đây, thế giới đã chứng kiến sự phát triển mạnh mẽ của internet vạn vật (IoT), một công nghệ đang làm thay đổi mọi khía cạnh của cuộc sống con người. IoT không chỉ đơn thuần là sự kết nối giữa các thiết bị điện tử mà trở thành một hệ sinh thái tích hợp, nơi hàng tỷ thiết bị thông minh cùng chia sẻ, xử lý những dữ liệu khổng lồ trong vô vàn các lĩnh vực: từ các thành phố thông minh, hệ thống giao thông, giám sát nông-lâm nghiệp, cho đến các thiết bị đeo thông minh theo dõi các dữ liệu cá nhân. Rõ ràng, IoT đã và đang thâm nhập vào từng ngóc ngách trong đời sống của con người.

Tuy nhiên, sự phát triển nhanh chóng của IoT cũng đặt ra nhiều vấn đề và thách thức, đặc biệt là về nguồn năng lượng. Khi số lượng các kết nối tăng lên, kéo theo đó là nhu cầu về năng lượng cần được cung cấp để duy trì hoạt động của các thiết bị cũng tăng theo. Điều này đặc biệt quan trọng đối với các thiết bị đầu cuối trong mạng IoT, như các cảm biến không dây, thiết bị đeo, hoặc các thiết bị trong các địa hình đặc thù khó tiếp cận. Để giải quyết vấn đề này, các nhà khoa học đang ráo riết tìm kiếm giải pháp mới để có thể cung cấp nguồn năng lượng bền vững cho các thiết bị IoT, giảm sự phụ thuộc vào nguồn năng lượng truyền thống.

Trong bối cảnh đó, việc tận dụng năng lượng tái tạo có sẵn trong môi trường xung quanh được xem như một giải pháp đầy hứa hẹn. Và trong tất cả các dạng năng lượng tái tạo thì năng lượng sóng vô tuyến nổi lên với tiềm năng ứng dụng to lớn cho các thiết bị đầu cuối trong mạng IoT. Công nghệ thu thập năng lượng từ sóng vô tuyến không chỉ giúp giảm thiểu sự phụ thuộc vào các nguồn năng lượng truyền thống như pin mà còn mở ra cơ hội mới cho các thiết bị điện tử để ứng dụng vào nhiều khía cạnh hơn trong cuộc sống.

Đề án đề xuất tập trung nghiên cứu các giải pháp thu thập năng lượng từ sóng vô tuyến, các bộ triplexer và các mạch điện chỉnh lưu hiệu suất cao, từ đó đề xuất giải pháp thu thập năng lượng từ sóng vô tuyến có hiệu suất cao vào công suất đủ lớn - ứng dụng cho các thiết bị đầu cuối công suất thấp trong các mạng IoT. Nội dung đề án tốt nghiệp "Nghiên cứu, thiết kế bộ thu thập năng lượng từ sóng vô tuyến ứng dụng trong IoT" được trình bày theo ba chương như sau:

- **Chương 1: Tổng quan giải pháp thu thập năng lượng từ sóng vô tuyến:** Chương này trình bày khái niệm và tổng quan về hệ thống thu thập năng lượng sóng vô tuyến; phân tích so sánh và đánh giá các giải pháp thu thập năng lượng từ sóng vô tuyến
- **Chương 2: Nghiên cứu thiết kế bộ thu thập năng lượng từ sóng vô tuyến:** Trình bày chi tiết thiết kế bộ thu thập năng lượng từ sóng vô tuyến, từ sơ đồ thiết kế tổng quát đến lựa chọn giải pháp và thiết kế chi tiết thiết bị.
- **Chương 3: Chế tạo thử nghiệm và đánh giá:** Trình bày việc chế tạo thử nghiệm hệ thống; đo đạc, đánh giá chất lượng để đưa ra kết luận và phương án phát triển bộ thu thập năng lượng.

Chương 1. Tổng quan về giải pháp thu thập năng lượng từ sóng vô tuyến

Chương 1 trình bày tổng quan về công nghệ thu thập năng lượng và vai trò thiết yếu của nó trong mạng lưới IoT. Nội dung chương khái quát về các dạng năng lượng trong môi trường, so sánh đánh giá ưu nhược điểm của nguồn năng lượng RF cũng như các giải pháp kỹ thuật phục vụ trong hệ thống thu thập năng lượng RF. Trên cơ sở đó đề xuất mô hình hệ thống thu thập năng lượng tối ưu để làm nền tảng cho các thiết kế ở chương tiếp theo.

1.1. Tổng quan về thu thập năng lượng sóng vô tuyến

1.1.1. Các dạng năng lượng trong môi trường

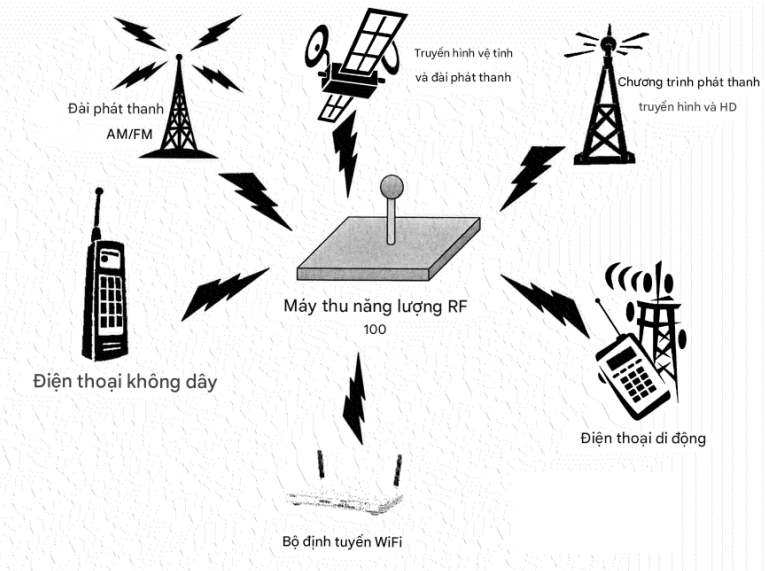
Trong bối cảnh bùng nổ của IoT, việc tìm kiếm nguồn năng lượng bền vững và có sẵn để phục vụ cho số lượng thiết bị khổng lồ đã trở thành một thách thức và cũng là cơ hội lớn. Một số dạng năng lượng tái tạo phù hợp được liệt kê dưới đây với các ưu nhược điểm được thể hiện trong Bảng 1.1:

Bảng 1.1 Bảng so sánh các dạng năng lượng tái tạo

Nguồn năng lượng	Ưu điểm	Nhược điểm
Năng lượng mặt trời	– Sẵn có và phong phú ở khắp nơi – Sạch, không gây ô nhiễm – Có thể đáp ứng đa dạng dải công suất	– Phụ thuộc vào thời điểm ban ngày và thời tiết – Chi phí cao – Cần diện tích lớn để lắp đặt hệ thống quy mô lớn
Nhiệt năng (cơ thể người)	– Có thể tích hợp trên các thiết bị nhỏ gọn, các nút cảm biến – Tiện lợi và chi phí triển khai thấp	– Công suất đầu ra thấp – Hiệu quả thấp do chịu tác động của thay đổi môi trường
Năng lượng dao động (vận động)	– Có thể tích hợp trên các thiết bị nhỏ gọn, các nút cảm biến	– Công suất đầu ra thấp – Phụ thuộc vào thời điểm vận động, không thể kéo dài liên tục
Năng lượng sóng điện từ	– Có thể tích hợp trên các thiết bị nhỏ gọn, các nút cảm biến – Tận dụng năng lượng sóng điện từ luôn có sẵn trong môi trường	– Phụ thuộc vào nguồn phát sóng – Năng lượng thu thập nhỏ, chưa thể đáp ứng các thiết bị công suất cao

Dựa theo Bảng 1.1, ta có thể nhận thấy rằng các nguồn năng lượng mặt trời, nhiệt năng hay năng lượng dao động đều rất dồi dào nhưng không thể ổn định do sự phụ thuộc vào môi trường, thời điểm hay các yếu tố bên ngoài khác. Trong khi đó, tại rất nhiều quốc gia trên thế giới trong đó có Việt Nam, do hạ tầng viễn thông luôn được phát triển và xây dựng do nhu cầu về liên lạc và kết nối Internet là rất lớn, các trạm phát sóng gần như phủ sóng ở khắp mọi nơi, vì vậy nguồn năng lượng sóng vô tuyến trong môi trường cũng vô cùng dồi dào. Do đó, năng lượng sóng vô tuyến nổi lên như một giải pháp vô cùng hứa hẹn và tiềm năng để ứng dụng trong các lĩnh vực điện tử bởi những ưu điểm của nó, giúp giải quyết được bài toán cung cấp năng lượng ổn định, liên tục và lâu dài cho các nút cảm biến trong mạng IoT.

Công nghệ thu thập năng lượng sóng điện từ RFEH là một phương pháp thu thập năng lượng từ sóng điện từ trong môi trường để chuyển hóa thành điện năng sử dụng cho các thiết bị điện tử. Công nghệ này khai thác nguồn năng lượng từ các tín hiệu vô tuyến phát ra từ các thiết bị như ăng ten phát sóng, đài phát thanh, trạm phát sóng di động và WiFi. RFEH đóng vai trò quan trọng trong các ứng dụng IoT, nơi các thiết bị không dây nhỏ cần nguồn điện lâu dài mà không phải thay pin thường xuyên. Nhờ tính chất tái tạo và không phụ thuộc vào nguồn năng lượng hữu hạn, công nghệ này góp phần giảm thiểu tác động môi trường và tối ưu hóa hiệu suất cho các hệ thống điện tử hiện đại.



Hình 1.1: Nguồn phát sóng điện từ trong thực tế

Thực tế trong rất nhiều năm đã qua, công nghệ thu thập năng lượng sóng điện từ đã được ứng dụng trong một số hệ thống về cảm biến hay RFID, nhưng nguồn

năng lượng này thường không được chú ý như một giải pháp cung cấp năng lượng cho các thiết bị thông thường. Có rất nhiều sóng RF trong môi trường như sóng AM, FM, sóng viba, sóng radar, sóng WiFi,… như minh họa trên Hình 1.1 Chúng đều có đặc điểm quan trọng là có thể đến được những địa hình đặc biệt, di chuyển đến được những nơi hạn chế về kết nối vật lý. Đây là ưu điểm lớn để có thể ứng dụng cung cấp năng lượng trong hệ thống IoT. Để biết được nguồn năng lượng RF trong môi trường có thể khai thác phục vụ cho việc thu thập năng lượng, các khảo sát được thực hiện trong các khu vực dân cư, đô thị, các khu công nghệ cao… Đây là những nơi có nhiều thiết bị phát sóng điện từ mạnh, tuy nhiên mật độ các nguồn phát sóng không đồng đều và mật độ năng lượng trong môi trường thường khá thấp, vì vậy việc chọn dải tần số phù hợp với hệ thống thu thập rất quan trọng.

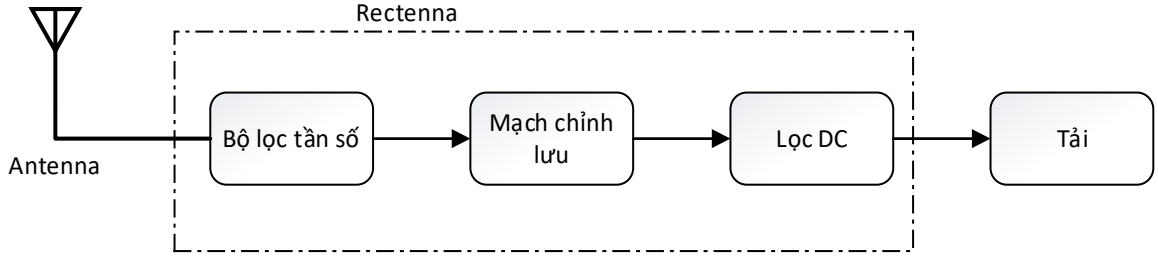
Để giải quyết bài toán về mật độ năng lượng thấp và không đồng đều, ta nên tập trung vào nguồn phát có mật độ năng lượng cao và độ phủ sóng rộng nhất. Trong bối cảnh đó, mạng lưới viễn thông di động nổi lên như một sự lựa chọn tối ưu nhất. Ở Việt Nam, công nghệ di động 4G LTE đã được triển khai rộng khắp, với độ phủ sóng đạt trên 99,8% dân số tính đến đầu năm 2025, trở thành một phần không thể thiếu trong đời sống kinh tế - xã hội. So với sóng WiFi có phạm vi hẹp và sóng truyền hình-radio có mật độ trạm phát thấp thì các nhà mạng lớn như Viettel, VinaPhone, và MobiFone đã xây dựng một mạng lưới hạ tầng trạm phát sóng BTS dày đặc trên toàn quốc để đảm bảo mật độ năng lượng trong không gian ổn định và phạm vi rộng khắp. Nền tảng của mạng lưới này chủ yếu dựa trên hai băng tần chiến lược là LTE B3 (1.8GHz) và LTE B1 (2.1GHz). Băng tần 1.8GHz đóng vai trò là "xương sống" chính cho việc phủ sóng rộng, trong khi băng tần 2.1GHz sau khi chuyển đổi từ 3G được sử dụng để tăng cường dung lượng và chất lượng dịch vụ, đặc biệt tại các khu vực đô thị có mật độ người dùng cao. Chính vì lý do đó, đề tài sẽ tập trung vào việc khảo sát và thu thập năng lượng từ hai băng tần LTE B3 (1.8GHz) và LTE B1 (2.1GHz).

1.1.2. Bộ chuyển đổi năng lượng sóng điện từ

Mạch thu thập năng lượng RF được nghiên cứu và thiết kế thành các tổ hợp mạch hoạt động tại các tần số RF với sự cấu thành mạch điện gồm các phần tử như mạch dải, các linh kiện bán dẫn hoạt động trong dải sóng RF. Để giúp người đọc hiểu rõ, ta đi phân tích về kỹ thuật siêu cao tần và các linh kiện được sử dụng trong một mạch thu thập năng lượng vô tuyến RF.

Công nghệ tần số vô tuyến (RF) và kỹ thuật siêu cao tần nghiên cứu hoạt động của các tín hiệu dòng điện xoay chiều có tần số từ khoảng 100 MHz đến 1000 GHz. Trong đó, dải tần RF trải dài từ tần số rất cao (VHF: 30–300 MHz) đến tần số siêu cao (UHF: 300–3000 MHz). Tần số cao và bước sóng ngắn của sóng RF đã tạo ra sự khác biệt trong phân tích và thiết kế các thiết bị và hệ thống thông tin vô tuyến.

Bộ chuyển đổi năng lượng sóng điện từ, hay còn gọi là hệ thống thu thập năng lượng sóng vô tuyến có nhiệm vụ chuyển đổi năng lượng sóng điện từ/sóng vô tuyến (RF) trong môi trường thành dòng điện một chiều DC có thể sử dụng được, với các thành phần cơ bản như sơ đồ dưới đây:



Hình 1.2: Sơ đồ hệ thống thu thập năng lượng sóng vô tuyến cơ bản

Chức năng của từng khối trong hệ thống được miêu tả chi tiết như sau:

- **Ăng ten**: Đây là thành phần đầu vào của bộ chuyển đổi. Trong ứng dụng này ăng ten hoạt động ở chế độ thu, bắt các sóng điện từ truyền trong không gian và chuyển đổi thành tín hiệu xoay chiều tần số cao. Hiệu suất của toàn bộ hệ thống phụ thuộc nhiều vào khả năng thu của ăng ten
- **Rectenna**: Rectenna là thuật ngữ kết hợp giữa Rectifying (chỉnh lưu) và Ăng ten. Đây là thành phần quan trọng nhất của bộ chuyển đổi, thực hiện quá trình chuyển đổi năng lượng từ dạng xoay chiều sang dạng một chiều. Khối Rectenna bao gồm các thành phần:
  - **Bộ lọc tần số**: Thường là bộ lọc thông dải (Band-pass Filter), được đặt ngay sau ăng ten để lựa chọn dải tần số mong muốn và loại bỏ các tần số không mong muốn. Việc này nhằm giúp tối ưu hóa năng lượng thu được và tăng hiệu suất tổng thể. Ở hệ thống này chúng ta sẽ sử dụng bộ lọc Diplexer, lọc ra hai tần số để thu thập năng lượng
  - **Mạch chỉnh lưu (Rectifier)**: Đây là khối chính thực hiện chức năng chuyển đổi tín hiệu AC tần số cao, phối hợp trở kháng và chỉnh lưu thành điện áp một chiều DC không bằng phẳng. Do năng lượng đầu vào thấp (từ vài mW đến vài trăm mW) cho nên mạch chỉnh lưu thường sử dụng các

linh kiện có điện áp ngưỡng thấp như diode Schottky hoặc các transistor hoạt động ở chế độ diode. Các cấu trúc phổ biến thường gặp như chỉnh lưu nửa sóng, chỉnh lưu toàn sóng, chỉnh lưu bội áp…, áp dụng tùy theo mục đích của hệ thống.

- **Lọc DC**: Điện áp ra từ mạch chỉnh lưu vẫn còn chứa các gợn sóng (ripple) gây ảnh hưởng đến độ ổn định điện áp và dòng điện đầu ra cấp cho tải. Bộ lọc DC, thường là một tụ điện có điện dung đủ lớn được mắc song song với tải, có nhiệm vụ làm phẳng các gợn sóng này để tạo ra một điện áp DC ổn định hơn, phù hợp để cấp cho tải.

❖ **Tải**: Đây là thành phần cuối cùng trong hệ thống sau khi năng lượng đã được chuyển đổi và thu thập. Trong các ứng dụng IoT và mạng cảm biến không dây, tải có thể là vi điều khiển công suất thấp, cảm biến, bộ nhớ… Ngoài ra năng lượng thu thập được có thể đưa vào các bộ lưu trữ, pin sạc.

1.1.3. Lịch sử ra đời của công nghệ thu thập năng lượng RF

Lịch sử của công nghệ thu thập năng lượng RF có nguồn gốc sâu xa từ những khám phá cơ bản về điện từ học và khát vọng truyền tải năng lượng không dây. Nền tảng lý thuyết được đặt bởi James Clerk Maxwell vào những năm 1860 với bộ phương trình trứ danh mô tả sự tồn tại và lan truyền của sóng điện từ [11]. Tuy nhiên, người đầu tiên trình diễn ý tưởng truyền tải năng lượng không dây một cách ngoạn mục là Nikola Tesla vào cuối thế kỷ 19 và đầu thế kỷ 20. Các thí nghiệm của ông, đặc biệt là với tháp Wardenclyffe, dù có tầm nhìn vĩ mô về việc phân phối điện năng toàn cầu không dây, đã gieo mầm cho khái niệm khai thác năng lượng từ không gian.

Một bước ngoặt quan trọng và thực tiễn hơn đến vào những năm 1960 với công trình của kỹ sư William C. Brown tại Raytheon. Ông được xem là cha đẻ của "rectenna" (viết tắt của rectifying ăng ten – ăng ten chỉnh lưu), một thiết bị có khả năng chuyển đổi trực tiếp năng lượng vi sóng thành dòng điện một chiều (DC) với hiệu suất cao. Năm 1964, Brown đã trình diễn thành công việc cấp nguồn cho một chiếc trực thăng mô hình hoàn toàn bằng năng lượng vi sóng truyền từ mặt đất, chứng minh một cách thuyết phục tính khả thi của việc thu thập năng lượng RF.

Sự phát triển của công nghệ nhận dạng qua tần số vô tuyến (RFID) trong những thập kỷ tiếp theo là một minh chứng thương mại thành công và phổ biến nhất của RFEH. Các thẻ RFID thụ động, không cần pin, hoạt động hoàn toàn bằng năng lượng mà chúng thu được từ tín hiệu của đầu đọc. Ngày nay, với sự bùng nổ của IoT,

nhu cầu cấp nguồn cho hàng tỷ cảm biến và thiết bị không dây đã đưa RFEH trở thành một lĩnh vực nghiên cứu cực kỳ sôi động, hướng tới việc tối ưu hóa hiệu suất để khai thác các nguồn năng lượng RF công suất thấp sẵn có trong môi trường.

1.1.4. Vai trò của công nghệ thu thập năng lượng RF trong lĩnh vực IoT

Thu thập năng lượng tần số vô tuyến là một công nghệ tiên tiến cho phép chuyển đổi năng lượng từ sóng điện từ tần số vô tuyến RF lan truyền trong không gian thành dòng điện một chiều (DC) có thể sử dụng được. Trong bối cảnh phát triển mạnh mẽ của IoT và các mạng cảm biến không dây (Wireless Sensor Networks), RFEH nổi lên như một giải pháp đầy hứa hẹn nhằm cung cấp nguồn năng lượng bền vững và tự chủ cho các thiết bị điện tử công suất thấp, qua đó giải quyết bài toán về tuổi thọ pin hữu hạn và chi phí bảo trì. Năng lượng RF có thể được thu thập từ nhiều nguồn khác nhau, bao gồm các nguồn phát có chủ đích (dedicated sources) và các nguồn ngẫu nhiên trong môi trường (ambient sources) như tín hiệu từ các trạm phát sóng di động (GSM/5G), WiFi, và đài phát thanh/truyền hình.

Mặc dù phải đối mặt với thách thức lớn là mật độ công suất RF trong môi trường thường rất thấp (chỉ từ nW/cm² đến μW/cm²), dẫn đến hiệu suất chuyển đổi toàn hệ thống còn hạn chế, những tiến bộ trong việc thiết kế ăng ten hiệu suất cao, các mạch chỉnh lưu siêu nhạy sử dụng linh kiện bán dẫn tiên tiến và các kỹ thuật quản lý năng lượng thông minh đang liên tục mở ra tiềm năng ứng dụng rộng rãi cho công nghệ này trong các lĩnh vực như y tế, nông nghiệp thông minh, và tự động hóa công nghiệp.

Trong thời đại IoT bùng nổ như hiện nay, công nghệ RFEH đóng vai trò như một công nghệ nền tảng có khả năng định hình lại tương lai và hiện thực hóa tầm nhìn quy mô lớn của IoT. Nút thắt lớn nhất cản trở sự phát triển của IoT chính là bài toán năng lượng. Khi hàng tỷ thiết bị cảm biến và cơ cấu chấp hành được triển khai, việc cung cấp nguồn năng lượng cho các thiết bị đó bằng các phương pháp truyền thống như pin trở nên không bền vững do các hạn chế về tuổi thọ hữu hạn, chi phí vận hành và bảo trì (thay thế) khổng lồ, cùng những tác động tiêu cực đến môi trường. RFEH nổi lên như một giải pháp đột phá, giải quyết trực tiếp những thách thức cốt lõi này. Vai trò của nó đối với IoT có thể được nhìn nhận qua các khía cạnh:

- Tạo ra các thiết bị tự chủ về năng lượng: Đây là vai trò quan trọng nhất. Bằng cách khai thác năng lượng từ các nguồn sóng RF có sẵn (WiFi, 4G, 5G, v.v.), RFEH cho phép các thiết bị IoT hoạt động một cách tự chủ, loại

bỏ hoàn toàn hoặc kéo dài đáng kể thời gian sử dụng pin. Điều này dẫn đến mô hình "triển khai và quên" (deploy-and-forget), giảm thiểu chi phí bảo trì và cho phép lắp đặt cảm biến ở những vị trí khó tiếp cận hoặc nguy hiểm.

- Mở ra các ứng dụng mới: Vai trò của RFEH không chỉ dừng lại ở việc thay thế pin. Nó mở ra cánh cửa cho những ứng dụng IoT mà trước đây được cho là không khả thi. Ví dụ: các cảm biến y tế cấy ghép trong cơ thể có thể được sạc không dây, các hệ thống giám sát kết cấu được nhúng vĩnh viễn trong bê tông của cầu cống, hay các mạng lưới cảm biến siêu nhỏ ("smart dust") được triển khai trong nông nghiệp chính xác trên diện rộng.
- Thúc đẩy việc thu gọn thiết bị: Pin thường là một trong những thành phần lớn nhất và nặng nhất trong một thiết bị IoT nhỏ gọn. Việc loại bỏ pin giúp các nhà thiết kế tạo ra các cảm biến nhỏ hơn, nhẹ hơn và có hình dạng linh hoạt hơn, dễ dàng tích hợp vào quần áo, vật liệu xây dựng hoặc các vật thể khác.
- Xây dựng một hệ sinh thái IoT bền vững: Bằng cách giảm sự phụ thuộc vào pin dùng một lần, RFEH góp phần tạo ra một hệ sinh thái công nghệ xanh hơn, giảm lượng rác thải điện tử và dấu chân carbon liên quan đến việc sản xuất và thải bỏ pin.

Từ đó có thể thấy rằng RFEH không chỉ là một nguồn cấp năng lượng thay thế; nó là mảnh ghép chiến lược giúp xây dựng một hệ sinh thái IoT thực sự thông minh, bền vững, có khả năng mở rộng vô hạn và tác động đến mọi khía cạnh của đời sống, giúp con người nghĩ về một thế giới được kết nối liền mạch và tự chủ trong tương lai không xa.

1.2. Phân tích, so sánh, đánh giá các giải pháp của các hệ thống thu thập năng lượng từ sóng vô tuyến trên thế giới

Việc thiết kế một bộ thu thập năng lượng từ sóng vô tuyến có trong môi trường là một bài toán phức tạp, đòi hỏi sự cân bằng giữa nhiều yếu tố kỹ thuật. Các nghiên cứu đã công bố trên thế giới cho thấy sự đa dạng trong các hướng tiếp cận, từ việc lựa chọn ăng ten, phương pháp lọc và phối hợp trở kháng, cho đến cấu trúc của mạch chỉnh lưu. Việc phân tích các hướng đi này giúp định hình một giải pháp thiết kế tối

ưu, phù hợp với mục tiêu của đề tài là thu thập năng lượng hiệu quả từ các nguồn có công suất rất thấp. Trước khi so sánh các giải pháp, cần xác định các thông số quan trọng để đánh giá một hệ thống Rectenna. Ở đề tài này ta sẽ tập trung vào hiệu suất và điện áp đầu ra, so sánh với các hệ thống sử dụng dải tần số đã lựa chọn của các bài báo đã được công bố trên thế giới để lựa chọn ra được hướng đi của đề tài.

Bảng 1.2: So sánh một số nghiên cứu được công bố trên thế giới

STT	Tài liệu	Tần số	Công suất đầu vào	Cấu trúc chỉnh lưu	Chất nền	Hiệu suất	Điện áp đầu ra
1	[1]	900MHz 1.8GHz 2.1Ghz	-10dBm	Chỉnh lưu toàn sóng	RO4003C	33%,26%,28% @-10dBm	0.371V, 0.258V, 0.191V @-10dBm
2	[2]	1.8GHz 2.1Ghz	-20dBm	Chỉnh lưu toàn sóng	RT/Duroid 5880	23%,21%,19% @-15dBm	0.14V, 0.08V @-18dBm
3	[3]	1.8GHz 2.1Ghz 2.45GHz	-10dBm	Chỉnh lưu nửa chu kỳ	RT / Duroid 5880	20%,14% @-18dBm	0.15V @-10dBm
4	[4]	900MHz 1.8GHz 2.1Ghz	-20dBm	Chỉnh lưu nửa chu kỳ	RT/Duroid 5880	19%,13%,6% @-20dBm	0.159V @-20dBm
5	[5]	1.8GHz 2.1Ghz 2.6GHz	-20dBm	Chỉnh lưu nửa chu kỳ	RO4003C	25.3%,27.9%,19.3% @−20 dBm	0.381V @-20dBm

Từ bảng trên ta có thể thấy được hầu hết các nghiên cứu trên thế giới đều tập trung vào thiết bị đơn tần và đều sử dụng diode Schottky làm mạch chỉnh lưu. Các nghiên cứu có sự đa dạng thiết kế với các công suất vào cũng khác nhau, đều sử dụng phương pháp chỉnh lưu cho từ hai tần số trở lên, và đều sử dụng chỉnh lưu cho từng tần số riêng biệt do việc chỉnh lưu đồng thời cho nhiều dải tần số khá phức tạp và gặp nhiều khó khăn, tính hiệu quả cũng rất thấp.

Dựa trên các cơ sở đã phân tích và so sánh, đề tài đề xuất thiết kế nhằm tối ưu hóa việc thu thập năng lượng từ các nguồn sóng di động tại Việt Nam như sau: Thay vì thu thập từ nhiều nguồn yếu và phân tán, hệ thống sẽ tập trung vào hai băng tần

4G có mật độ năng lượng cao và ổn định nhất là LTE B3 (1.8GHz) và LTE B1 (2.1GHz). Để thực hiện điều này, một bộ lọc diplexer sẽ được thiết kế để tách hai băng tần này ra hai luồng xử lý riêng biệt. Mỗi luồng sẽ được đưa vào một mạch chỉnh lưu được tối ưu hóa cho tần số tương ứng, sử dụng cấu trúc chỉnh lưu toàn sóng để đảm bảo điện áp đầu ra đủ lớn. Cách tiếp cận này kết hợp ưu điểm của việc thu thập đa băng tần và tối ưu hóa hiệu suất trên từng kênh, hứa hẹn mang lại một hệ thống có hiệu quả cao và phù hợp với điều kiện thực tế.

1.3. Hệ định hướng sóng điện từ

1.3.1. Đường truyền mạch dải siêu cao tần

Dải sóng siêu cao tần là một phần của dải sóng điện từ có bước sóng λ nằm trong khoảng từ 10m đến 1mm, tương ứng với dải tần số f từ 30 MHz đến 300 GHz. Nó được phân ra bốn dải nhỏ là:

- Dải sóng m hay VHF- Very high frequency (λ = 10m ÷ 1m; f = 30MHz ÷ 300MHz)
- Dải sóng dm hay UHF- Ultra high frequency (λ = 10dm ÷ 1dm; f = 300MHz ÷ 3GHz)
- Dải sóng cm hay SHF- Super high frequency (λ = 10cm ÷ 1cm; f = 3GHz ÷ 30GHz)
- Dải sóng mm hay EHF- Extremely high frequency (λ = 10mm ÷ 1mm; f = 30GHz ÷ 300GHz)

Các dải sóng siêu cao tần trên được sử dụng ngày càng rộng rãi trong các thiết bị vô tuyến điện tử ở các lĩnh vực khác nhau như: truyền hình, phát thanh FM, thông tin vệ tinh, thông tin di động, radar, đạo hàng…

Sở dĩ như vậy vì sóng siêu cao tần có các tính chất đặc biệt sau:

- Sóng siêu cao tần truyền thẳng trong phạm vi nhìn thấy trực tiếp. Hầu hết các dải sóng này đều có khả năng xuyên qua bầu khí quyển của trái đất và ít thay đổi về phương truyền sóng.
- Sóng siêu cao tần có tính định hướng cao khi bức xạ từ những vật có kích thước lớn hơn nhiều so với bước sóng.

- Dải tần siêu cao tần cung cấp băng thông rất rộng, cho phép triển khai số lượng kênh truyền lớn, đáp ứng được nhu cầu truyền thông tin ngày càng tăng.

Trong kỹ thuật điện tử - viễn thông, đường truyền (transmission line) được hiểu là tập hợp các thiết bị hoặc cấu trúc dẫn sóng có nhiệm vụ hướng dẫn và giới hạn sự lan truyền của các dao động điện từ, hay dòng năng lượng điện từ, theo một hướng xác định. Khi đường truyền được thiết kế để truyền dẫn năng lượng siêu cao tần (microwave energy) hoặc sóng siêu cao tần, nó được gọi là đường truyền siêu cao tần (microwave transmission line). Các đường truyền này đảm bảo truyền tải năng lượng ở tần số rất cao với suy hao thấp, ổn định và phù hợp với các ứng dụng như radar, thông tin vi ba, truyền hình vệ tinh và các hệ thống 5G/6G.

Một đường truyền siêu cao tần được gọi là đường truyền đồng nhất (uniform transmission line) nếu tiết diện ngang của nó không thay đổi theo chiều truyền sóng và môi trường điện từ bên trong là đồng nhất. Trong kỹ thuật siêu cao tần, người ta chủ yếu sử dụng đường truyền đồng nhất.

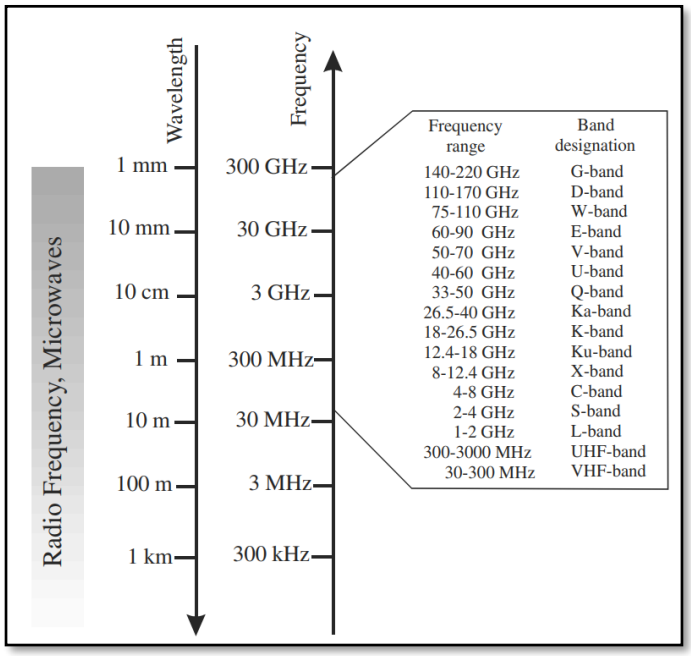
Đường truyền đồng nhất được phân chia thành 2 loại là: đường truyền hở và đường truyền kín. Trong đường truyền hở, tại tiết diện ngang không có vòng kim loại bao bọc vùng truyền năng lượng siêu cao tần. Đường truyền hở có nhiều dạng khác nhau như: đường dây đôi, mạch dải, đường truyền sóng mặt …

Đối với đường truyền kín, trong nó phải có ít nhất một mặt vật dẫn kim loại bao bọc hoàn toàn vùng truyền năng lượng siêu cao tần. Đường truyền kín là các ống kim loại rỗng có tiết diện khác nhau, bên trong có thể nhét đầy các chất điện môi đồng nhất khác nhau hoặc không khí hay chân không. Chúng được gọi là ống dẫn sóng. Có nhiều loại ống dẫn sóng được dùng trong kỹ thuật siêu cao tần như: ống dẫn sóng đồng trục, ống dẫn sóng chữ nhật, ống dẫn sóng trụ tròn …

Ở dải sóng mét (từ 30MHz ÷ 300MHz), người ta ứng dụng đường dây đôi (song hành) và cáp đồng trục hay ống dẫn sóng đồng trục để truyền dẫn năng lượng siêu cao. Đường dây đôi có cấu trúc đơn giản và cho kích thước ngang khá gọn, dễ điều chỉnh phối hợp. Nhưng ở dải sóng decimet (từ 300MHz ÷ 3GHz), ống dẫn sóng đồng trục hay cáp đồng trục được dùng phổ biến để truyền dẫn năng lượng siêu cao. Đường dây đôi không được sử dụng rộng rãi trong dải sóng này vì tổn hao do bức xạ và hiệu ứng bề mặt.

Trong dải sóng centimet (từ 3GHz ÷ 30GHz), đường truyền siêu cao phổ biến là các ống dẫn sóng chữ nhật và trụ tròn vì nó cho tiêu hao nhỏ, kích thước phù hợp, ống dẫn sóng đồng trục hay cáp đồng trục ít được dung vì tổn hao do hiệu ứng bề mặt ở lõi trong và tổn hao trong điện môi rất lớn. Nó chỉ dùng ở khoảng cách ngắn và công suất nhỏ.

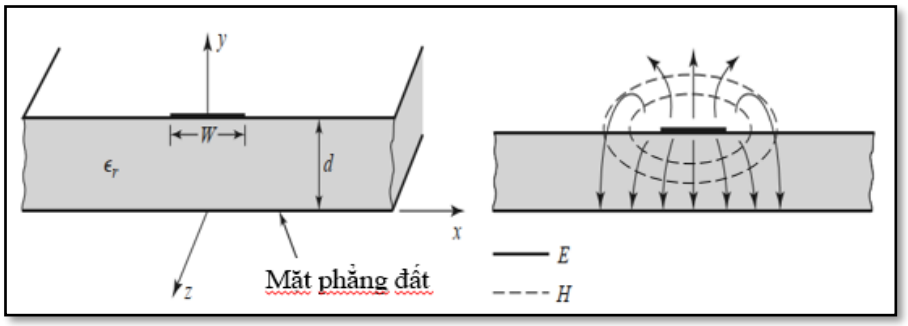
Trong dải milimet (từ 30GHz ÷ 300GHz), các ống dẫn sóng chữ nhật và tròn không được dùng phổ biến do kích thước nhỏ, khó chế tạo và tiêu hao lớn. Ở dải sóng này, đường truyền siêu cao phổ biến là mạch dải, đường truyền sóng mặt như: ống dẫn sóng điện môi, dây dẫn đơn có phủ chất điện môi.



Hình 1.3: Phổ tần số vô tuyến và siêu cao tần – phân chia theo tần số và bước sóng [12]

Tần số được lựa chọn sử dụng trong hệ thống nằm trong dải decimet, vậy nên ta có thể xem xét lựa chọn phương pháp sử dụng đường truyền vi dải (microstrip line). Khác với đường dây đồng trục hoặc ống dẫn sóng đòi hỏi kết cấu kim loại kín, vi dải có cấu trúc phẳng gồm một dải dẫn đặt trên nền chất điện môi và một mặt phẳng đất (ground), phù hợp để chế tạo trên nền mạch PCB. Việc sử dụng đường truyền vi dải có nhiều ưu điểm như kích thước nhỏ gọn, chi phí thấp, tính ứng dụng cao, dễ tích hợp với các linh kiện thụ động và tích cực, đáp ứng tốt dải tần từ vài trăm MHz đến vài GHz.

Vì vậy trong đề tài này, việc thiết kế dựa trên phương pháp sử dụng đường truyền vi dải không chỉ đảm bảo tính khả thi trong chế tạo mà còn góp phần giúp tối ưu hóa hiệu suất thu năng lượng RF, từ đó nâng cao hiệu suất của hệ thống.



(a) Cấu trúc hình học *(b) Phân bố điện trường và từ trường*

Hình 1.4: Cấu trúc đường truyền mạch dải [6]

Đường mạch dải siêu cao tần là một trong những loại đường truyền phẳng phổ biến nhất bởi vì nó có thể được chế tạo bằng quá trình quang khắc, dễ dàng thực hiện với kích thước nhỏ và kết hợp cùng các linh kiện cao tần thụ động và chủ động. Hình dạng của một đường truyền vi dải được hiển thị trong Hình 1.4a. Cấu hình gồm một dây dẫn có chiều rộng W được in trên chất nền điện môi có độ dày *d* và hằng số điện môi tương đối ε_r. Hình ảnh minh họa của các đường sức điện từ trường được thể hiện trong Hình 1.4b.

Trong trường hợp chất điện môi có hằng số điện môi (Ɛ_r=1), ta sẽ có một đường dẫn hai dây bao gồm một dây dẫn dải phẳng trên mặt phẳng mặt đất được nhúng trong một môi trường đồng nhất (không khí). Điều này sẽ tạo thành một đường truyền TEM đơn giản với vận tốc pha v_p=c và hằng số truyền β=k_0. Khi có sự hiện diện của chất điện môi, đặc biệt là chất điện môi không lấp đầy vùng phía trên dải (y > d) sẽ làm phức tạp hoạt động và phân bố điện từ trường. Không giống như đường dây, nơi tất cả các trường được chứa trong một vùng điện môi đồng nhất, dường truyền vi dải có một số (thường là hầu hết) các đường sức điện từ trường của nó trong vùng điện môi giữa dây dẫn dải và mặt phẳng mặt đất và một phần trong vùng không khí phía trên đế. Vì lý do này, đường truyền vi dải không thể hỗ trợ truyền sóng TEM thuần vì tốc độ pha của các trường TEM trong vùng điện môi sẽ là c/√(Ɛ_r), trong khi đó tốc độ pha của các trường TEM trong vùng không khí sẽ là c, do đó, điều kiện khớp pha tại vùng tiếp giáp không khí-điện môi sẽ không thể được thỏa mãn.

Trên thực tế, các trường chính xác của đường truyền vi dải tạo thành sóng TM-TE lai nên yêu cầu cần có các kỹ thuật phân tích nâng cao hơn để xử lý. Tuy nhiên, trong hầu hết các ứng dụng thực tế, chất nền điện môi rất mỏng ($d << \lambda$), và do đó, các trường là gần như TEM. Nói cách khác, các trường về cơ bản giống như các trường hợp tĩnh (DC). Do đó, các xấp xỉ tốt cho tốc độ pha, hằng số lan truyền và trở kháng đặc tính có thể thu được từ các giải pháp tĩnh hoặc bán tĩnh, tốc độ pha và hằng số truyền có thể được biểu diễn bằng:

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_e}} \tag{1.1}$$

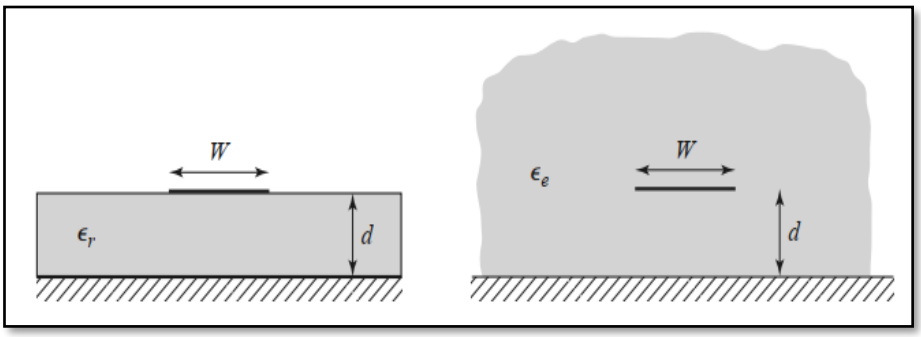
$$\beta = k_0\sqrt{\varepsilon_e} \tag{1.2}$$

Trong đó ε_e là hằng số điện môi hiệu dụng của đường truyền vi dải. Bởi vì một số đường sức điện từ trường nằm trong vùng điện môi và một số trong không khí, hằng số điện môi hiệu dụng thỏa mãn mối quan hệ $1 < \varepsilon_e < \varepsilon_r$ và phụ thuộc vào hằng số điện môi của chất nền điện môi, độ dày của chất nền, chiều rộng của dây dẫn và tần số công tác. Ta sẽ trình bày các công thức tính toán gần đúng cho hằng số điện môi hiệu dụng, trở kháng đặc tính và suy hao trên đường truyền vi dải. Những kết quả tính toán này là xấp xỉ phù hợp với đường cong cho các giải pháp bán tĩnh nghiêm ngặt. Sau đó, ta sẽ thảo luận về các khía cạnh bổ sung của các đường truyền vi dải, bao gồm các hiệu ứng phụ thuộc tần số, nhiễu xuyên điều chế bậc cao và hiệu ứng ký sinh.

Hằng số điện môi hiệu dụng của chất điện môi trên đường truyền được tính bằng:

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r+1}{2} + \frac{\varepsilon_r-1}{2}\frac{1}{\sqrt{1+\frac{12d}{W}}} \tag{1.3}$$

Hằng số điện môi hiệu dụng có thể được hiểu là hằng số điện môi của môi trường đồng nhất thay thế tương đương bởi các vùng không khí và chất điện môi của đường truyền như trong Hình 1.5. Tốc độ pha và hằng số truyền sau đó được tính bởi công thức (1.1) và (1.2).



(a) Cấu trúc hình học ban đầu (b) Cấu trúc hình học tương đương

Hình 1.5: Hình dạng tương đương của một dòng microstrip trường bán-TEM [6]

Với kích thước của đường truyền vi dải, trở kháng đặc tính có thể được tính như sau:

$$Z_0 = \begin{cases} \dfrac{60}{\sqrt{\varepsilon_e}} \ln\left(\dfrac{8d}{W} + \dfrac{W}{4d}\right) \\ \dfrac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_e}\left[\dfrac{W}{d} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\dfrac{W}{d} + 1.444\right)\right]} \end{cases} \quad (1.4)$$

Với (1): $\frac{W}{d} \leq 1$ và (2): $\frac{W}{d} \geq 1$ *[6]*

Đối với trở kháng đặc tính Z0 đã cho và hằng số điện môi ε_r, tỷ lệ $\frac{W}{d}$ có thể được xác định bởi công thức:

$$Z0 = \begin{cases} \dfrac{8e^A}{e^{2A} - 2} \\ \dfrac{2}{\pi}[B - 1 - \ln(2B - 1) + \dfrac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r}\{\ln(B - 1) + 0.39 - \dfrac{0.61}{\varepsilon_r} \end{cases} \quad (1.5)$$

Với (1): $\frac{W}{d} < 2$ và (2): $\frac{W}{d} > 2$, $A = \frac{Z0}{60}\sqrt{\frac{\varepsilon_r+1}{2}} + \frac{\varepsilon_r-1}{\varepsilon_r+1}(0.23 + \frac{0.11}{\varepsilon_r})$, $B = \frac{377\,\pi}{2Z0\sqrt{\varepsilon_r}}$ *[6]*

Coi trường trong một đường truyền vi dải là một dòng bán-TEM, ta có thể xác định độ suy hao chèn do mất mát trên chất điện môi là:

$$\alpha_d = \frac{K_0 \varepsilon_r(\varepsilon_e - 1)\tan\delta}{2\sqrt{\varepsilon_r}(\varepsilon_r - 1)} \ (Np\ /m) \quad (1.6)$$

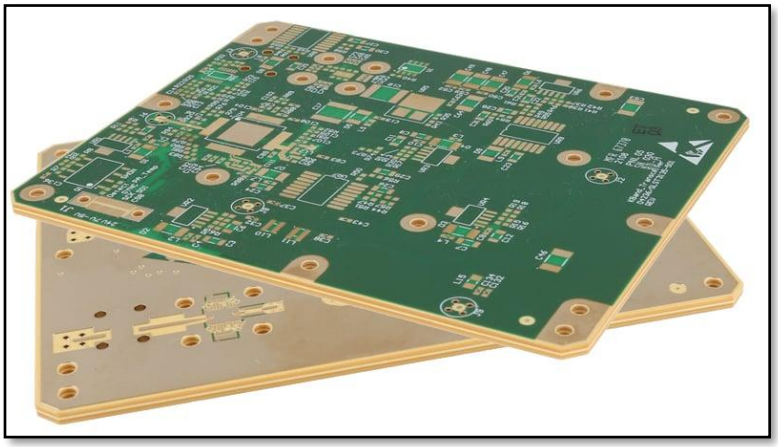
trong đó tan δ là hệ số suy hao của chất điện môi. Giả thiết rằng các trường xung quanh đường microstrip một phần trong không khí (không mất mát) và một phần trong điện môi (có tổn thất). Sự suy giảm do mất dây dẫn được đưa ra khoảng:

$$\alpha_c = \frac{R_s}{Z_0 W} \ (Np\ /m) \qquad (1.7)$$

Trong đó $R_s = \sqrt{\omega\mu_0/2\sigma}$ là điện trở bề mặt của dây dẫn [6]. Đối với hầu hết đường truyền, tổn hao ngược trên đường truyền có ảnh hưởng lớn hơn tổn hao điện môi.

1.3.2. Chất nền

Chất nền (Substrate) là một trong những yếu tố quyết định đặc tính điện từ của mạch vi dải, ảnh hưởng trực tiếp đến trở kháng đặc trưng, suy hao tín hiệu, cũng như kích thước vật lý của cấu trúc truyền dẫn. Việc lựa chọn vật liệu chất nền phù hợp giúp đảm bảo tính ổn định của hằng số điện môi, giảm tổn hao điện môi và nâng cao hiệu suất truyền năng lượng trong các ứng dụng tần số cao. Hiện nay, hai loại vật liệu chất nền phổ biến trong chế tạo mạch in RF là FR4 (gốc epoxy) và Teflon (PTFE pha gốm và sợi thủy tinh).



Hình 1.6: Bảng mạch in bằng tấm FR4 (trên) và Teflon PTFE (dưới)

Vật liệu FR4 có ưu điểm là giá thành thấp, dễ gia công, độ bền cơ học cao và được sử dụng rộng rãi trong các mạch điện tử thông thường. Tuy nhiên, ở dải tần số vi ba (từ 1GHz trở lên), vật liệu này thể hiện tổn hao điện môi tương đối lớn và sự thay đổi hằng số điện môi theo tần số, dẫn đến sai lệch về trở kháng và giảm hiệu suất bức xạ hoặc truyền dẫn của mạch.

Ngược lại, vật liệu Teflon PTFE (Polytetrafluoroethylene) có hằng số điện môi thấp và rất ổn định, cùng với hệ số tổn hao điện môi nhỏ, phù hợp cho các mạch yêu cầu độ chính xác cao và suy hao thấp. Ngoài ra một số vật liệu PTFE gia cường sợi thủy tinh và phụ gia gốm, có các đặc tính nổi bật như ổn định nhiệt tốt, tổn hao cực thấp và độ hút ẩm gần như bằng không.

Bảng 1.3: Bảng so sánh các thông số hai loại vật liệu

Đặc tính	FR4 (NP-140F)	Teflon (ZYF255DA)	Nhận xét
Hằng số điện môi (εr)	4.0 – 4.2 @ 1 GHz	2.55 ± 0.04 @ 10 GHz	Teflon có ε_r thấp hơn, giúp giảm kích thước mạch và suy hao pha
Hệ số tổn hao điện môi (tan δ)	0.012 – 0.014 @ 1 GHz	0.0018 @ 10 GHz	Teflon có tổn hao nhỏ hơn khoảng 7–10 lần so với FR4
Hấp thụ ẩm (%)	0.05 – 0.10	< 0.02	Teflon gần như không hút ẩm, ổn định trong môi trường ẩm
Độ dẫn nhiệt (W/m·K)	≈ 0.25	0.25	Tương đương, nhưng Teflon ổn định hơn ở dải nhiệt cao
Hệ số giãn nở nhiệt (CTE, ppm/°C)	50 – 60 (trước Tg), 220 – 320 (sau Tg)	≈ 125 (0–100 °C)	Teflon giãn nở ít hơn → ổn định cơ học cao
Độ bền điện môi (kV)	~60	> 100 (ước tính tương đương loại PTFE)	Teflon có khả năng cách điện cao hơn
Cấp chống cháy	UL94 V-0	UL94 V-0	Cả hai đều đạt chuẩn chống cháy
Cấu trúc vật liệu	Nhựa epoxy + sợi thủy tinh	PTFE + sợi thủy tinh + phụ gia gốm	Cấu trúc PTFE mang lại tính điện môi và ổn định vượt trội
Giá thành	Giá thành rẻ, phổ biến trong nhiều ứng dụng điện tử cơ bản	Giá thành cao, phù hợp với các ứng dụng đặc thù như cao tần	Vật liệu Teflon phù hợp với ứng dụng của đề tài

Từ bảng so sánh trên có thể thấy vật liệu Teflon có nhiều ưu thế vượt trội so với vật liệu FR4, đặc biệt ở dải tần cao. Với hằng số điện môi thấp và hệ số tổn hao điện môi rất nhỏ, Teflon hạn chế suy hao tín hiệu, cải thiện hiệu suất truyền, đảm bảo tính ổn định pha và trở kháng ở dải sóng UHF và SHF. Mặc dù giá thành cao hơn vật liệu FR4 đáng kể nhưng dựa trên những ưu điểm vượt trội, vật liệu Teflon là sự lựa chọn phù hợp để thiết kế các thành phần trong hệ thống thu thập năng lượng sóng điện từ.

1.4. Bộ lọc thông dải

Trong lĩnh vực xử lý tín hiệu và kỹ thuật vô tuyến, bộ lọc là một trong những thành phần cơ bản nhưng không kém phần quan trọng. Bộ lọc cho phép các tín hiệu trong dải tần mong muốn đi qua và chặn lại các tín hiệu không mong muốn ngoài dải. Dựa trên đáp ứng tần số, các bộ lọc được phần thành các loại chính: bộ lọc thông thấp, bộ lọc thông cao, bộ lọc chặn dải, bộ lọc thông dải. Trong số bộ lọc thông dải có lẽ là phổ biến nhất, đóng vai trò quan trọng hầu hết các hệ thống thu phát vô tuyến, từ các thiết bị di động, trạm phát sóng cho đến các hệ thống radar vệ tinh

Về bản chất, bộ lọc thông dải là một linh kiện hoặc mạch điện tử được thiết kế để cho phép một dải tần số xác định đi qua gần như không bị suy hao, trong khi suy hao mạnh mẽ các tần số nằm ngoài dải đó. Dải tần số được phép đi qua này được gọi là dải thông, và các vùng tần số bị chặn lại được gọi là dải chặn . Chức năng chọn lọc tần số này là nền tảng cho việc phân kênh, loại bỏ nhiễu và định hình tín hiệu trong các hệ thống truyền thông hiện đại.

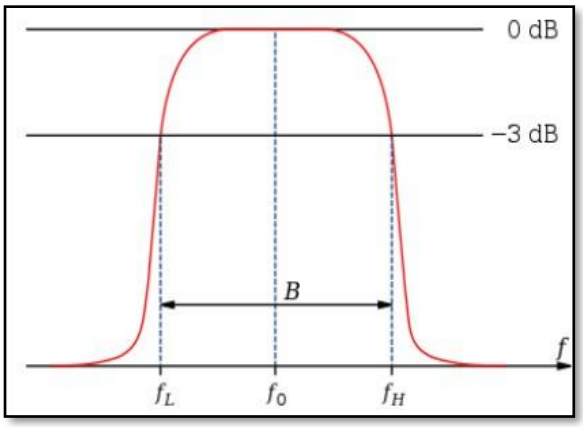
Bộ lọc được đặc trưng bởi Đáp ứng tần số, là định lượng của phổ đầu ra của một hệ thống hoặc thiết bị khi đáp ứng với một kích thích, và được sử dụng để mô tả động lực học của hệ thống đó. Bộ lọc thông dải có đặc trưng biên độ của đáp ứng tần số, trường hợp lý tưởng là dạng hình chữ nhật, vả trong thực tế chấp nhận là dạng "cái chuông". Bộ lọc thông dải truyền tín hiệu trong một “dải” tần số nhất định mà không làm biến dạng đầu vào tín hiệu hoặc phát sinh thêm nhiễu. Dải tần số này có thể có chiều rộng bất kỳ và thường được gọi là băng thông của bộ lọc.

Để đánh giá một bộ lọc thông dải cần phải xét đến các yếu tố sau:

- **Tần số trung tâm (f_0):** Tần số chính giữa dải thông
- **Băng thông (Bandwidth):** Độ rộng của dải thông. Theo quy ước, băng thông thường có phạm vi tần số tồn tại giữa hai điểm cắt tần số xác định (f_0) thấp hơn tâm tối đa hoặc đỉnh cộng hưởng 3dB trong khi làm suy giảm các điểm khác bên ngoài hai điểm này.
- **Suy hao chèn (Insertion loss):** Là mức độ suy hao tín hiệu bên trong dải thông, được tính bằng tỉ lệ dB (decibel). Giá trị suy hao chèn thấp hơn cho thấy hiệu suất tốt hơn. Đây là một thông số rất quan trọng trong bộ lọc.
- **Suy hao phản xạ (Return loss):** Đây là thông số xác định mức độ mất mát của công suất tín hiệu do phản xạ, được tính bằng tỉ lệ giữa công suất

phản xạ và công suất tới. Suy hao phản xạ càng cao thì lượng công suất bị phản xạ ngược lại càng ít.

- **Độ cách ly (Isolation):** Là thông số đo lường khả năng ngăn cách tín hiệu giữa các cổng của bộ lọc, được đo bằng đơn vị dB. Độ cách ly càng lớn thì khả năng năng chống nhiễu xuyên kênh càng tốt.
- **Khả năng chịu công suất (Power handling):** là mức công suất tối đa mà bộ lọc có thể xử lý mà không bị hỏng hay suy giảm hiệu suất. Thông số này quan trọng đối với các ứng dụng phát sóng công suất cao.



Hình 1.7: Đặc tuyến biên độ thường áp dụng, gần với dạng chữ nhật lý tưởng

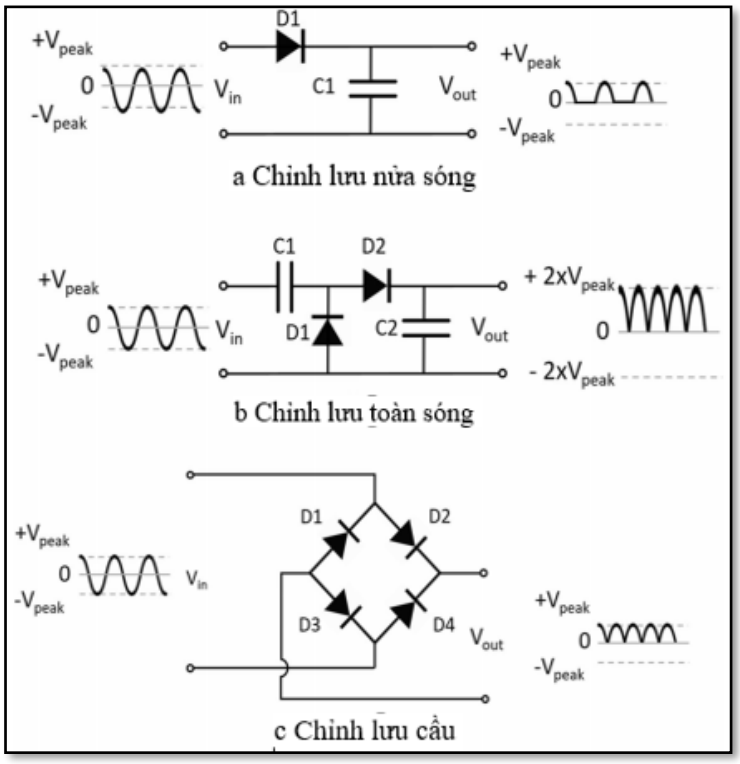
Bộ lọc thông dải đóng vai trò quan trọng trong việc lựa chọn và tách dải tần mong muốn, đồng thời loại bỏ các tín hiệu ngoài băng.Trong bối cảnh nghiên cứu thu thập năng lượng RF, hiểu rõ đặc tính và nguyên lý của bộ lọc thông dải là cơ sở cần thiết để tiến hành thiết kế các cấu trúc lọc chuyên dụng hơn như diplexer, phục vụ mục tiêu tối ưu hiệu suất thu năng lượng ở nhiều băng tần khác nhau.

1.5. Các giải pháp chỉnh lưu ứng dụng trong RFEH

Năng lượng RF được thu từ không gian tự do thường có mật độ năng lượng thấp do mật độ công suất của sóng vô tuyến giảm với tốc độ $\frac{1}{d^2}$, trong đó d là khoảng cách từ nguồn RF tính đến điểm thu. Do đó, cần thiết kế một mạch tách sóng có nhân áp để cung cấp đủ năng lượng một chiều cho tải. Điều này dẫn đến hai khả năng, nếu mức tiêu thụ điện của tải thấp hơn mức thu năng lượng trung bình, các thiết bị điện tử ở tải có thể hoạt động liên tục; mặt khác, nếu tải tiêu thụ nhiều năng lượng hơn năng lượng mà mạch thu có thể tạo ra, các thiết bị không thể hoạt động liên tục được.

Chỉnh lưu là ứng dụng phổ biến nhất của diode, trong đó quan trọng nhất là việc chuyển đổi dòng điện xoay chiều thành dòng điện một chiều. Về mặt ứng dụng thu thập năng lượng, tín hiệu RF thu được từ môi trường là dạng sóng hình sin, được ăng ten thu lại. Tín hiệu sau khi truyền qua mạch phối hợp trở kháng đầu vào (IMN) sẽ được điều chỉnh và tăng cường để đáp ứng các yêu cầu về công suất của tải tiêu thụ điện.

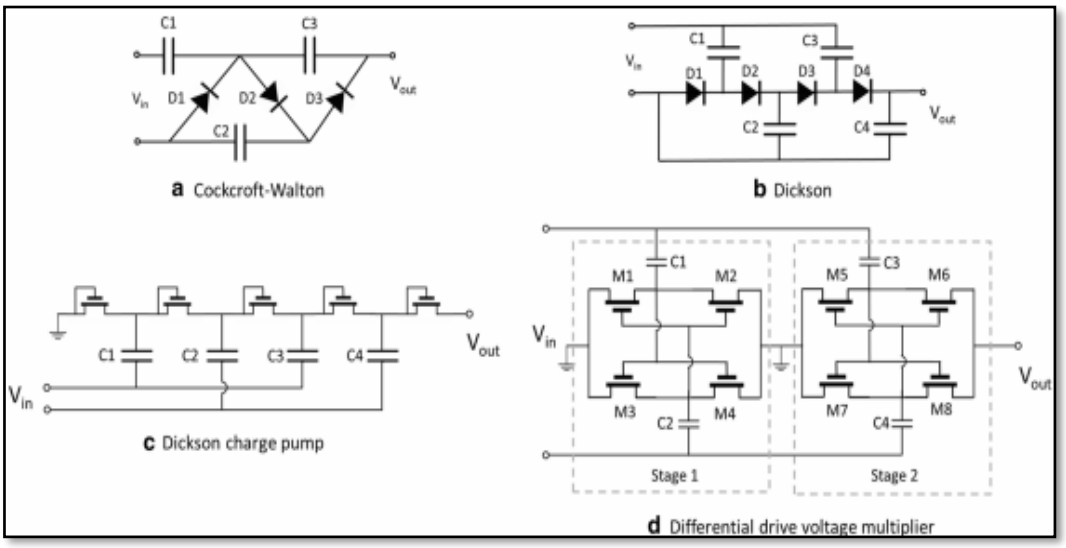
Cấu trúc liên kết cơ bản nhất của bộ chỉnh lưu là bộ chỉnh lưu nửa sóng bao gồm một diode D1 (Hình 1.8a). Khi điện áp xoay chiều truyền qua D1, chỉ còn hoạt động trên nửa chu kỳ dương của tín hiệu vào và nửa chu kỳ âm bị đóng lại, do đó nó làm giảm một nửa công suất dòng xoay chiều. nên điệp áp ra VDC trên tải không liên tục. Mặc dù đơn giản, nhưng bộ chỉnh lưu nửa sóng thường không đáp ứng đủ mức điện áp một chiều cho các ứng dụng thông thường. Do đó, một bộ chỉnh lưu toàn sóng sẽ thích hợp hơn để đáp ứng yêu cầu.



Hình 1.8: Các dạng mạch chỉnh lưu dùng diode

Thiết kế mạch của bộ chỉnh lưu toàn sóng được thể hiện trong Hình 1.8b. Trong nửa chu kỳ âm đầu tiên của tín hiệu xoay chiều đầu vào, diode D1 có tính dẫn điện và tụ C1 được tích điện đến mức năng lượng cao nhất V_{peak} của đầu vào. Sau đó, ở nửa chu kỳ dương tiếp theo, D1 bị chặn, D2 dẫn điện nên tụ điện C2 cũng được

tích điện. Do đó, điện áp ra V_{out} sẽ là tổng của điện áp kết hợp từ hai tụ nối tiếp (mỗi tụ đang lưu một điện áp của V_{peak}). Như vậy, V_{out} gấp đôi V_{peak}. Do đó, cấu trúc liên kết này ổn định và hiệu quả hơn so với chỉnh lưu nửa sóng. Ngoài ra còn có một bộ chỉnh lưu cầu điều chỉnh cả chu kỳ dương và âm của tín hiệu xoay chiều tại đầu vào AC nhưng vẫn giữ $V_{out} = V_{peak}$ bằng cách chặn các cặp diode D1, D4 và D2, D3 (Hình 1.8c).



Hình 1.9: Các cấu hình của một số cấu trúc mạch nhân điện áp điển hình

Mạch nhân điện áp là một loại mạch chỉnh lưu đặc biệt giúp chuyển đổi và tăng khả năng chuyển đổi tín hiệu xoay chiều từ đầu vào xoay chiều thành tín hiệu một chiều tại đầu ra. Trong một số trường hợp công suất chỉnh lưu không đủ cho ứng dụng, cần phải tăng mức điện áp đầu ra bằng cách xếp các bộ chỉnh lưu đơn thành chuỗi, tạo thành mạch nhân điện áp. Một số cấu hình của mạch nhân điện áp được hiển thị trong Hình 1.9. Cấu hình cơ bản nhất là mạch nhân điện áp Cockcroft- Walton (Hình 1.9). Mạch Cockroft-Walton còn được gọi là Villard hoặc Grenacher bao gồm một số tụ điện và một số diode. Cockroft Walton rất hữu ích để tạo ra điện áp cao từ các nguồn điện áp thấp do tụ điện được sắp xếp nối tiếp, giá trị tụ điện yêu cầu lớn hơn nhưng giá trị của điện áp đánh thủng lại thấp, mối quan hệ này sẽ tạo ra điện áp cao tương ứng với dòng điện thấp hơn. Một số thiếu hạn chế của mạch nhân áp Cockroft Walton là khi giá trị của tải lớn, điện áp đầu ra sẽ nhỏ và độ gợn điện áp lớn. Nguyên lý hoạt động của mạch này tương tự như bộ chỉnh lưu toàn sóng (Hình 1.9b) nhưng có nhiều giai đoạn hơn để mức điện áp ra một chiều được tăng cường cao hơn.

Mạch nhân điện áp Dickson trong Hình 1.9b là bản sửa đổi cấu hình của Cockcroft- Walton với các tụ điện được cắt để giảm hiệu ứng ký sinh. Do đó mạch nhân áp Dickson thích hợp hơn cho các ứng dụng tiêu thụ mức điện áp nhỏ. Tuy nhiên, rất khó để có được hiệu suất chuyển đổi năng lượng cao do điện áp ngưỡng cao giữa các điốt tạo ra dòng rò làm giảm hiệu suất tổng thể. Ngoài ra đối với tải điện trở cao, điện áp đầu ra giảm mạnh dẫn đến nguồn cung cấp cho tải cũng bị giảm.

Công nghệ MOSFET (bóng bán dẫn oxit kim loại hiệu ứng trường) đang khắc phục những hạn chế của diode và trở thành một giải pháp thay thế và tăng cường khả năng chuyển đổi RF-DC. Nhờ có công nghệ MOSFET, mạch nhân điện áp Dickson có thể được tích hợp với nhau trong các mạch tích hợp (IC) bằng cách thay thế diode bằng Transistor NMOS như trong Hình 1.9c. Điện áp ngưỡng tương đối thấp và hiệu quả chuyển đổi cao là những tính năng ưu việt của thiết kế này. Hơn nữa, mạch nhân điện áp vi sai (Hình 1.9d) được sử dụng rộng rãi hơn vì có dòng rò thấp và khả năng thay đổi linh hoạt trong thiết kế để phù hợp cho các ứng dụng cụ thể.

Đặc biệt, có một mối quan hệ chặt chẽ giữa số lượng các giai đoạn nhân áp của một mạch tách sóng nhân điện áp về độ nhạy và hiệu quả của nó. Khi số lượng các giai đoạn tăng lên, điện áp trên mỗi giai đoạn được thêm vào và kết quả nhận được là hệ số nhân điện áp cao hơn và điện áp ngưỡng nhỏ ở giai đoạn nhân áp đầu tiên. Mặt khác, một mạch nhân điện áp với một vài giai đoạn có mức giảm điện áp ít hơn giữa các giai đoạn của nó nhưng đòi hỏi điện áp ngưỡng cao hơn cho tất cả các giai đoạn để làm việc đồng thời. Vì lý do này, một mạch nhân điện áp trở nên nhạy hơn khi một số lượng lớn các giai đoạn có mặt và trở nên hiệu quả hơn ở ít giai đoạn hơn. Tính năng đánh đổi này đã được phân tích trong một số nghiên cứu. Do đó, số lượng các giai đoạn tối ưu nên được xem xét tùy thuộc vào các mục tiêu ứng.

1.6. Các nút cảm biến IoT

Các nút cảm biến IoT là phần tử đầu cuối trong hệ thống IoT, đảm nhiệm chức năng thu thập dữ liệu từ môi trường vật lý (nhiệt độ, độ ẩm, áp suất, ánh sáng, v.v.) và truyền dữ liệu đến bộ xử lý trung tâm hoặc máy chủ. Một nút cảm biến IoT điển hình gồm bốn khối chính: cảm biến, vi điều khiển (MCU), bộ truyền thông không dây và mạch quản lý năng lượng.

Trong các ứng dụng năng lượng thấp, đặc biệt là hệ thống thu năng lượng RF, việc lựa chọn cảm biến có điện áp hoạt động thấp và công suất tiêu thụ nhỏ là yếu tố

quyết định để đảm bảo khả năng tự cung cấp năng lượng. Các cảm biến IoT thường sử dụng các phương thức truyền tin như WiFi, Zigbee, BLE hoặc LoRa, với điện áp hoạt động trong khoảng 1.8–3.3V, và một số dòng MCU đặc biệt có thể hoạt động ở mức 0.8–1.2V.

Bảng dưới đây tổng hợp một số nút cảm biến thương mại và vi điều khiển tiêu thụ năng lượng thấp, thường được sử dụng trong các nghiên cứu và ứng dụng IoT tiết kiệm năng lượng.

Bảng 1.4: Tổng hợp công suất tiêu thụ của các nút cảm biến thương mại

Tên mạch / MCU	Điện áp hoạt động (V)	Dòng tiêu thụ (Rx / Tx / Sleep)	Công suất ở chế độ ngủ
TI CC2538-CC2592EMK	1.8 – 3.6	Rx: 24 mA / Tx: 30 mA / Sleep: < 1 µA	≈ 3 µW
SparkFun WRL-22043 (XBee)	1.8 – 3.6	Rx: 27 mA / Tx: 33 mA / Sleep: 1 µA	≈ 3 µW
Silicon Labs C8051F92x / F93x	0.9 – 3.6	Sleep: 50 nA / Active: 300 µA	≈ 0.05 µW
TI MSP430X09x	0.9 – 1.65	Sleep: < 1 µA / Active: 250 µA	≈ 0.9 µW
PCAL6524 (NXP)	0.8 – 3.6	< 2 µA	≈ 1.6 µW
EM6354 (EM Micro)	0.8 – 5.0	< 1 µA	≈ 0.8 µW

Với các thông số và đặc tính tiêu thụ năng lượng đã trình bày, có thể nhận thấy rằng việc khai thác và phục hồi năng lượng từ sóng điện từ sẵn có trong môi trường để duy trì hoạt động cho các nút cảm biến IoT hoàn toàn khả thi. Tuy nhiên, do mật độ công suất của các nguồn RF môi trường thường ở mức thấp, việc ứng dụng các mạch thu hồi năng lượng này sẽ đạt hiệu quả cao hơn khi được kết hợp với những nút cảm biến có mức tiêu thụ năng lượng siêu thấp. Sự kết hợp này cho phép hình thành các nút cảm biến không dây tự chủ năng lượng, có khả năng hoạt động lâu dài mà không cần thay thế nguồn cung cấp truyền thống. Đây hiện là xu hướng nghiên cứu và phát triển quan trọng trong lĩnh vực IoT và các hệ thống cảm biến thế hệ mới.

1.7. Kết luận chương 1

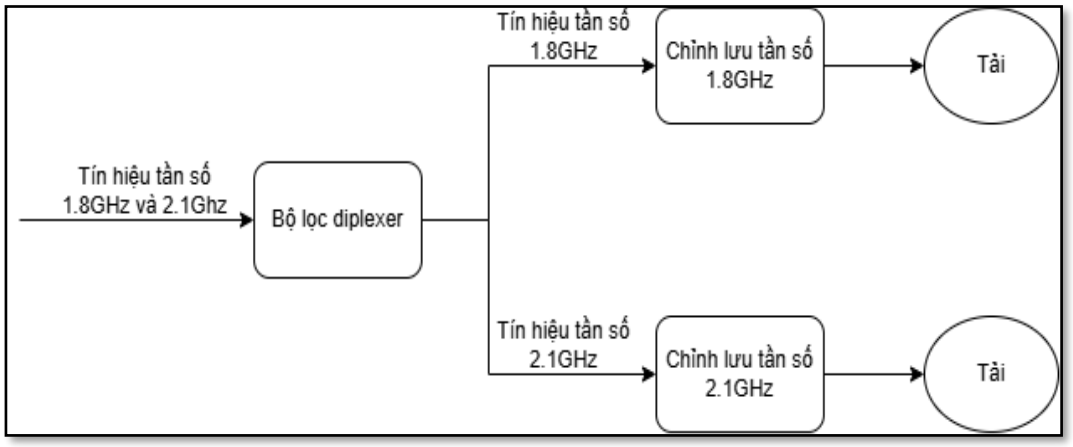
Chương 1 đã trình bày một cách toàn diện về bối cảnh, tiềm năng và các khái niệm nền tảng của công nghệ thu thập năng lượng RF cho ứng dụng IoT. Thông qua việc so sánh các nguồn năng lượng khác nhau, đề án đã làm rõ lý do lựa chọn năng lượng từ sóng di động là hướng đi khả thi và ổn định, đặc biệt trong môi trường viễn thông phát triển tại Việt Nam. Đồng thời tiến hành phân tích, đánh giá các giải pháp kỹ thuật về cấu trúc hệ thống, bộ lọc và mạch chỉnh lưu dựa trên các nghiên cứu đã được công bố. Kết quả của quá trình phân tích là việc lựa chọn một kiến trúc tối ưu, sử dụng bộ lọc diplexer để tách hai băng LTE B3 (1.8GHz) và LTE B1 (2.1GHz), kết hợp với mạch chỉnh lưu toàn sóng hiệu suất cao. Những lựa chọn và cơ sở lý thuyết này tạo tiền đề vững chắc cho việc đi vào thiết kế chi tiết và mô phỏng hệ thống sẽ được trình bày trong chương tiếp theo.

Chương 2. Nghiên cứu thiết kế bộ thu thập năng lượng từ sóng vô tuyến

Chương 2 trình bày các bước thiết kế bộ thu thập năng lượng từ sóng vô tuyến. Nội dung chương phân tích các phương án lựa chọn các giải pháp thiết kế bộ lọc và bộ chỉnh lưu cao tần, trên cơ sở đó đề xuất mô hình bộ thu thập năng lượng tối ưu để làm nền tảng cho các thiết kế ở chương tiếp theo.

2.1. Sơ đồ khối bộ thu thập năng lượng

Trước khi tiến hành thiết kế chi tiết, cần xác định sơ đồ khối tổng thể của hệ thống nhằm thể hiện mối liên hệ giữa các khối chức năng chính. Dựa trên sơ đồ nguyên lý tổng quát đã trình bày ở Mục 1.1.2, sơ đồ khối hoàn chỉnh của bộ thu thập năng lượng được xây dựng như sau:



Hình 2.1: Sơ đồ bộ thu thập năng lượng sóng vô tuyến chi tiết của hệ thống

Hình 2.1 mô tả chi tiết cách hoạt động của hệ thống. Sóng vô tuyến sau khi được thu bởi ăng ten sẽ bao gồm nhiều thành phần tần số khác nhau, trong đó bao gồm hai băng tần 1.8Ghz và 2.1GHz. Khi sóng RF từ môi trường đi tới ăng ten, năng lượng điện từ sẽ được chuyển đổi thành tín hiệu điện áp RF tại cổng ra của ăng ten. Tín hiệu này bao gồm nhiều dải tần khác nhau. Do mỗi mạch chỉnh lưu chỉ đạt hiệu suất cao nhất ở một tần số xác định, việc sử dụng diplexer để phân tách dải tần là cần thiết. Các tín hiệu này sẽ được đưa vào mạch lọc diplexer, có nhiệm vụ lọc riêng hai băng tần 1.8GHz và 2.1GHz thành hai đường độc lập. Tín hiệu sau khi đi qua bộ lọc ở mỗi đường sẽ được truyền vào mạch chỉnh lưu có tần số tương ứng. Các mạch chỉnh lưu sẽ biến đổi năng lượng RF sang tín hiệu điện một chiều DC. Điện áp đầu

ra DC có thể được sử dụng trực tiếp để cấp cho tải hoặc lưu trữ trong các thành phần lưu trữ năng lượng.

2.2. Xây dựng tính năng và thông số kỹ thuật

Trước khi đi vào thiết kế chi tiết, việc xác định tính năng và thông số kỹ thuật là rất quan trọng trước khi đi vào thiết kế chi tiết

2.2.1. Thông số hệ thống

Dựa theo lý thuyết ở Chương 1, ta có thể đặt ra các thông số mục tiêu của hệ thống thu thập năng lượng theo bảng sau:

Bảng 2.1: Yêu cầu kỹ thuật hệ thống thu thập năng lượng

Tham số	Mục tiêu
Tần số hoạt động	1.8GHz & 2.1GHz
Băng thông	40MHz
Hiệu suất thực tế	≥ 30%
Điện áp đầu ra (tại P_{in} 0dB)	~1V

2.2.2. Mạch lọc Diplexer

Mạch lọc diplexer có chức năng phân tách năng lượng RF tại hai dải tần 1.8GHz và 2.1GHz thông qua hai nhánh lọc riêng biệt để đảm bảo mỗi mạch chỉnh lưu phía sau xử lý năng lượng tại băng tần tương ứng sao cho đạt hiệu suất tốt nhất. Với đầu vào 2 băng tần 1.8GHz và 2.1Ghz, mục tiêu thiết kế cần đạt được:

- Tần số hoạt động:

Bảng 2.2: Yêu cầu kỹ thuật tần số hoạt động của mạch lọc

	Port 1	Port 2	Port 3
Tần số trung tâm	1.8 GHz & 2.1 GHz	1.8 GHz	2.1 GHz
Dải thông yêu cầu	1.75–1.85 GHz 2.05–2.15 GHz	1.75–1.85 GHz	2.05–2.15 GHz
Dải chắn yêu cầu		2–2.2 GHz	1.7–1.9GHz

❖ S-parameter:

Bảng 2.3: Yêu cầu kỹ thuật các tham số S-parameter của mạch lọc

	Dải tần (GHz)	Giá trị (dB)
S11	1.75 – 1.85 & 2.05 – 2.15	≤ -14
S22	1.75 – 1.85	≤ -14
S33	2.05 – 2.15	≤ -14
S21	1.75 – 1.85	≥ -1
S31	2.05 – 2.15	≥ -1

❖ Kích thước mạch: Diện tích ≤ 8x8 cm

2.2.3. Mạch chỉnh lưu 1.8GHz

Mạch chỉnh lưu có nhiệm vụ biến đổi năng lượng RF tại băng tần 1.8GHz thu được thành năng lượng một chiều (DC) để cung cấp cho tải hoặc bộ lưu trữ năng lượng. Với đầu vào băng tần 1.8GHz, mục tiêu thiết kế cần đạt được:

❖ Phối hợp trở kháng: 50 Ohm

❖ Đầu ra:

Bảng 2.4: Yêu cầu kỹ thuật mạch chỉnh lưu 1.8GHz

	Mục tiêu
S11	<-14 dB
Hiệu suất mô phỏng (max)	>60%
Hiệu suất thực tế (max)	≥ 20%
Điện áp đầu ra (tại P_{in} 0dB)	≥ 0.6V

❖ Kích thước mạch: Diện tích mạch ≤ 8x8 cm

2.2.4. Mạch chỉnh lưu 2.1GHz

Mạch chỉnh lưu có nhiệm vụ biến đổi năng lượng RF tại băng tần 2.1GHz thu được thành năng lượng một chiều (DC) để cung cấp cho tải hoặc bộ lưu trữ năng lượng. Với đầu vào băng tần 2.1GHz, mục tiêu thiết kế cần đạt được:

❖ Phối hợp trở kháng: 50 Ohm

❖ Đầu ra:

Bảng 2.5: Yêu cầu kỹ thuật mạch chỉnh lưu 2.1GHz

	Mục tiêu
S11	<-14 dB
Hiệu suất mô phỏng (max)	>60%
Hiệu suất thực tế (max)	≥ 20%
Điện áp đầu ra (tại P_{in} 0dB)	≥ 0.8V

- ❖ Kích thước mạch: Diện tích mạch ≤ 8x8 cm

2.3. Phân tích và lựa chọn các giải pháp lọc vô tuyến

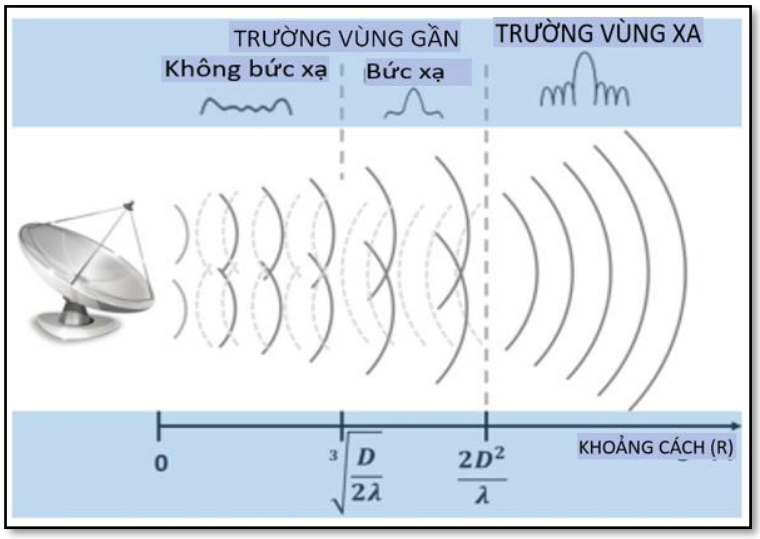
Trong kiến trúc hệ thống thu thập năng lượng đa băng tần đã đề xuất, khối lọc vô tuyến đóng một vai trò then chốt. Sau khi ăng ten thu nhận đồng thời tín hiệu từ cả hai băng tần 1.8GHz và 2.1GHz, khối lọc có nhiệm vụ chính là phân tách (tách kênh) hai luồng tín hiệu này ra hai đường xử lý riêng biệt một cách hiệu quả. Việc tách kênh này là yêu cầu bắt buộc để tối ưu hóa hiệu suất toàn hệ thống. Mỗi mạch chỉnh lưu chỉ có thể đạt được hiệu suất chuyển đổi cao nhất khi được phối hợp trở kháng chính xác tại một tần số làm việc duy nhất. Do đó, việc tách riêng từng băng tần cho phép mỗi mạch chỉnh lưu được thiết kế chuyên biệt, đảm bảo sự truyền tải công suất tối đa. Ngoài ra, khối lọc còn giúp loại bỏ các tín hiệu không mong muốn và nhiễu ngoài băng tần, tăng cường độ ổn định cho hệ thống.

Để thực hiện chức năng này, có một số giải pháp kỹ thuật có thể xem xét với các ưu nhược điểm khác nhau khi áp dụng vào bài toán của hệ thống. Như đã đề cập ở chương 1, việc chỉnh lưu đồng thời các băng tần trên cùng một mạch chỉnh lưu là rất khó và hiệu quả thấp. Vậy nên hướng tiếp cận là sử dụng phương án chỉnh lưu cho từng tần số tương ứng của hệ thống. Tuy nhiên ở phía đầu vào của hệ thống nếu sử dụng các ăng ten đơn tần để thu thập năng lượng ở các tần số tương ứng lại gây ra những lãng phí không cần thiết. Vậy nên sau khi xem xét và lựa chọn hướng tiếp cận, giải pháp phù hợp nhất đối với hệ thống là sử dụng một bộ lọc tần số diplexer để nhận năng lượng từ ăng ten dual-band, tách biệt các tần số theo lựa chọn của hệ thống rồi đưa vào bộ chỉnh lưu đã được tối ưu cho từng tần số đó.

2.3.1. Nguyên lý thu thập năng lượng

Tín hiệu vô tuyến thu nhận được bởi ăng ten có tần số hoạt động giống với tần số làm việc của mạch tách sóng. Công suất của tín hiệu RF sẽ được chuyển đổi thành tín hiệu một chiều. Giữa ăng ten và bộ tách sóng có một mạch phối hợp trở kháng bao gồm các phần tử cảm ứng và điện dung được đưa vào, đảm bảo truyền tải năng lượng tối đa từ ăng ten đến mạch tách sóng. Các mạch phối hợp trở kháng cùng với mạch tách sóng được gọi chung là mạch thu thập năng lượng RF. Tìm hiểu về hoạt động của sóng điện từ rất quan trọng đối với thiết kế mạch thu thập năng lượng RF. Hoạt động của sóng điện từ thay đổi tùy theo khoảng cách, tần số, và điều kiện môi trường. Tùy thuộc vào yêu cầu của ứng dụng, cần chọn thông số phù hợp cho mạch thu thập năng lượng và nguồn sóng điện từ để thu được kết quả tốt nhất.

Tiêu hao năng lượng của quá trình lan truyền sóng ngoài môi trường có thể được đặc trưng bởi tổn hao trong không gian tự do FSPL, đó là suy hao năng lượng của nguồn tín hiệu trong quá trình truyền lan trong không gian trống. Tính toán FSPL yêu cầu thông tin về mức tăng ích ăng ten, tần số của sóng truyền và khoảng cách giữa máy phát và máy thu. Hoạt động của sóng điện từ phụ thuộc vào khoảng cách tính từ nguồn phát. Những đặc điểm này được phân loại thành hai dạng: trường xa và gần trường. Trong khi mật độ sóng điện từ ở trường xa tương đối đồng đều thì ở trường gần, các thành phần điện và từ rất mạnh, hoạt động độc lập sao cho một thành phần(điện trường hoặc từ trường) chiếm ưu thế và triệt tiêu thành phần còn lại. Vùng gần được coi là không gian nằm trong khoảng cách Fraunhofer và trường xa khu vực nằm ngoài khoảng cách Fraunhofer. Sự phân bố của các vùng trường gần và xa được minh họa trong Hình 2.2.



Hình 2.2: Định nghĩa khoảng cách Fraunhofer

Khoảng cách Fraunhofer được định nghĩa là

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.1)$$

trong đó d_f là khoảng cách Fraunhofer, D là tối đa kích thước của bộ phản xạ (hoặc đường kính của ăng ten), và λ là bước sóng của sóng điện từ.

Mặc dù Fraunhofer tạo ra một vùng biên, nhưng chuyển đổi thực tế giữa các khu vực không có nhiều khác biệt. Phía trong vùng trường gần, khoảng không gian từ ăng ten đến gianh giới giữa hai vùng là khu vực gần trường không bức xạ hay phản ứng, trong đó trường E và H không cùng pha nên tạo ra sự biến dạng năng lượng. Khi xem xét dần về phía trước đối với trường vùng xa, ta bắt gặp một trường gần phóng xạ hoặc các miền truyền sóng Fresnel, nơi hoạt động phản ứng của điện từ sóng không chiếm ưu thế, sóng được truyền tốt mặc dù pha của trường E và H vẫn thay đổi theo khoảng cách. Sự lan truyền năng lượng ở ăng ten thu có thể được thể hiện như

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (2.2)$$

Trong đó P_R là công suất tại ăng ten thu; G_R là hệ số tăng ích của ăng ten thu so với nguồn đẳng hướng (dBi); lamda là bước sóng của tín hiệu sóng điện từ, tính bằng tốc độ ánh sáng trong chân không chia cho tần số tín hiệu, $\lambda = c/f$; và k = 2π/λ là số sóng. Từ công thức trên, FSPL, P_L cho trường xa có thể được suy ra là

$$P_L = \frac{P_T}{P_R} = \frac{(4\pi R)^2}{G_T G_R \lambda^2} = \frac{(4\pi fR)^2}{G_T G_R C^2} = \frac{4}{G_T G_R}(KR)^2 \quad (2.3)$$

Bằng cách sử dụng phương trình tổn hao trong không gian tự do, có thể xác định được công suất tín hiệu ở vùng trường xa. Tuy nhiên, phương trình này chưa tính đến ảnh hưởng của tất cả các yếu tố tác động đến quá trình lan truyền như phản xạ, nhiễu xạ, hấp thụ…

Trái ngược với sóng trường xa đồng nhất, điện trường và từ trường hoạt động bất thường trong trường gần. Mối quan hệ giữa điện trường và từ trường trong trường gần thay đổi không thể đoán trước theo thời gian và không gian do quá phức tạp. Tất cả các yếu tố đó làm cho việc ước tính mật độ năng lượng ở phạm vi này trở nên khó khăn. Quá trình ước tính FSPL là rất quan trọng để thiết kế thiết bị thu thập năng lượng, ước lượng về lượng điện năng mà hệ thống được yêu cầu xử lý giúp người thiết kế lựa chọn công nghệ và phương pháp phù hợp.

Có nhiều tham số khác nhau cần được đánh giá để quyết định hiệu quả chuyển đổi năng lượng của thiết kế RFEH, đánh giá hiệu quả thay đổi tùy thuộc vào các ứng dụng khác nhau. Tuy nhiên, các giá trị quan trọng như hiệu quả chuyển đổi năng lượng, độ nhạy, khoảng cách hoạt động, công suất đầu ra được xác định là tiêu chuẩn để so sánh các mạch thu thập năng lượng RF. Nhưng đánh đổi để đạt được sự thỏa mãn tương đối giữa các tham số này như khoảng cách hoạt động và hiệu quả tổng thể của quá trình chuyển đổi. Hơn nữa, các yếu tố phụ trợ sản xuất khác như chi phí thấp, sự đơn giản của quá trình chế tạo và khả năng sản xuất hàng loạt cũng là điều quan trọng.

Phạm vi hoạt động: Khoảng cách hoạt động chủ yếu liên quan đến tần số hoạt động. Trong thực tế, truyền sóng ở tần số cao sẽ bị suy giảm năng lượng nhiều hơn bởi các yếu tố tác động từ môi trường truyền, nhất là điều kiện khí quyển, sự suy hao này xảy ra nhiều hơn so với truyền sóng ở tần số thấp, trong khi sóng điện từ ở tần số thấp có khả năng nhiễu xạ uốn quanh vượt qua vật cản, còn sóng ngắn tần số cao thì lại có khả năng đâm xuyên tốt hơn.

Hiệu suất chuyển đổi nguồn RF - DC (PCE): Đây là tỷ lệ giữa lượng điện năng được cung cấp cho tải và công suất tín hiệu RF được đưa vào mạch tách sóng bởi ăng ten thu. Nói chung, RF-DC PCE bao gồm hiệu quả của bộ chỉnh lưu, hệ số nhân điện áp và các yếu tố lưu trữ. PCE có thể tính đơn giản là tỷ lệ công suất được cung cấp cho tải với công suất được lấy từ đầu vào, trong đó tổn hao trong không gian tự do không được xem xét khi xác định thuật ngữ này.

$$\eta_{pce} = \frac{P_{load}}{P_{retrived}} \tag{2.4}$$

Trong đó P_{load} là năng lượng một chiều cung cấp cho tải và $P_{retrived}$ là năng lượng RF được thu thập tại ăng ten. Các yếu tố xác định giá trị của PCE bao gồm hiệu ứng ký sinh, tiêu hao trong các mạch, cấu trúc liên kết thiết kế và ngưỡng phi tuyến của các thành phần điện.

Hiệu quả chuyển đổi năng lượng RF-DC của mạch thu thập năng lượng RF là:

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{rf}} \tag{2.5}$$

Với P_{dc} là công suất một chiều đầu ra trung bình theo thời gian (tức thời tương đương DC) vào phần tử lưu trữ (ví dụ: pin hoặc siêu tụ điện) và tải; P_{rf} là là công suất RF như được xác định trước đó. Các phép đo cho hệ thống này thường thực hiện trong môi trường được kiểm soát (ví dụ: buồng không phản xạ hoặc tế bào TEM).

Hệ số phẩm chất Q: Hệ số phẩm chất Q thường được định nghĩa là một giá trị không thứ nguyên mô tả mức độ cộng hưởng mạnh như thế nào và liên quan đến độ rộng băng thông của trạng thái cộng hưởng. Trong các mạch điện, hệ số Q biểu thị mức tăng điện áp cực đại khi hệ thống làm việc ở tần số cộng hưởng. Từ khái niệm này, phương trình của yếu tố Q có thể được biểu thị như công thức dưới đây:

$$Q = 2\pi \frac{\text{Năng lượng lưu trữ}}{\text{Năng lượng tiêu tán trong 1 chu kỳ}} \text{ or } \quad Q = \frac{f_c}{\Delta f} \tag{2.6}$$

Từ phương trình trên, suy ra rằng một phần tử có hệ số phẩm chất cao sẽ đi kèm với băng thông cộng hưởng hẹp, nhưng đạt được mức tăng điện áp cao. Hơn nữa, phương trình này cũng chỉ ra rằng hệ số Q tỷ lệ nghịch với năng lượng tiêu tán trong mỗi chu kỳ.

Độ nhạy: Độ nhạy của hệ thống RFEH được định nghĩa là mức tối thiểu của công suất đầu vào được yêu cầu để kích hoạt hoạt động của hệ thống. Độ nhạy được định lượng như sau:

$$\text{Sentivity(dBm)} = 10 \lg\left(\frac{P}{1mW}\right) \tag{2.7}$$

Trong đó P là công suất tối thiểu mà hệ thống yêu cầu để thực hiện một nhiệm vụ. Điện áp ngưỡng của công nghệ CMOS ảnh hưởng đến độ nhạy. CMOS ngưỡng thấp hơn nhạy hơn nhưng đi kèm với dòng rò nhiều hơn, tiêu hao nhiều làm giảm hiệu quả tổng thể.

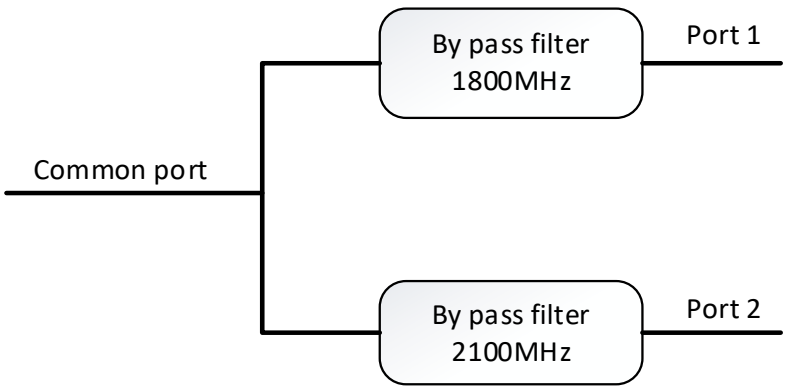
Công suất ra: Thông thường, kết quả của hệ thống RFEH là nguồn năng lượng một chiều DC được đặc trưng bởi điện áp tải VDD và dòng điện tải IDD. Đo điện áp tải sẽ cho thấy hiệu suất của RFEH nói chung vì VDD và IDD phụ thuộc vào trở kháng tải. Nếu tải là một cảm biến, VDD quan trọng hơn IDD trong khi trong các ứng dụng như điện phân hoặc LED, dòng điện là thông số chi phối.

Dựa trên phân tích các hoạt hoạt động và ứng dụng, thiết kế ăng ten bắt buộc phải chú trọng mức tăng ích ăng ten, tần số cộng hưởng và kích thước. Việc xem xét lựa chọn dạng mạch tách sóng phù hợp cũng rất quan trọng. Đối với các mạch tách sóng nói chung, sự phụ thuộc của RF-DC PCE vào tần số và tải đầu ra là rất chặt chẽ. Ngoài ra, bắt buộc phải có mạch phối hợp trở kháng và được điều chỉnh chính xác để có thể truyền công suất tối đa bên trong mạch RFEH. Vấn đề tối ưu hóa hệ thống RFEH trở thành việc xác định mục tiêu và tích hợp các mô-đun riêng lẻ để đạt được mục đích nghiên cứu, thiết kế.

2.3.2. Mạch lọc diplexer

Như đã phân tích trong Chương 1, nguồn năng lượng RF trong môi trường tại Việt Nam có mật độ lớn và ổn định nhất nằm ở hai băng tần LTE B3 (1.8GHz) và LTE B1 (2.1GHz). Đây chính là hai băng tần mục tiêu được lựa chọn để khai thác năng lượng cho hệ thống. Để tận dụng đồng thời cả hai nguồn năng lượng này, ăng ten đầu vào cần thu nhận một cách hiệu quả toàn bộ dải tín hiệu, sau đó tách riêng từng băng tần để đưa đến các mạch chỉnh lưu được tối ưu cho từng tần số. Nếu không có khối tách kênh, việc đưa tín hiệu hỗn hợp từ ăng ten trực tiếp vào mạch chỉnh lưu sẽ làm giảm hiệu suất nghiêm trọng, bởi mạch chỉnh lưu chỉ đạt hiệu quả cao nhất tại một tần số thiết kế. Do đó, cần có một phần tử lọc trung gian đảm nhiệm vai trò phân chia hai dải tần một cách độc lập nhưng vẫn sử dụng chung ăng ten, từ đó nâng cao hiệu suất tổng thể của hệ thống.

Giải pháp phù hợp nhất cho mục tiêu này chính là mạch diplexer. Trong các hệ thống vô tuyến, diplexer, hay còn gọi là bộ ghép/phân kênh lưỡng công tần số, là một linh kiện điện tử thụ động ba cổng được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống tần số vô tuyến. Chức năng chính của nó là cho phép hai tín hiệu ở hai dải tần số khác nhau cùng chia sẻ một đường truyền chung, điển hình là một ăng ten, mà không gây nhiễu lẫn nhau. Về bản chất, diplexer hoạt động như một bộ định tuyến tín hiệu dựa trên tần số.



Hình 2.3: Sơ đồ cơ bản của bộ lọc Diplexer

Cấu tạo cốt lõi của một diplexer bao gồm:

- **Cổng chung (Common port):** Cổng nhận tín hiệu được thu từ ăng ten
- **Bộ lọc thông dải 1800MHz:** Cho phép các tín hiệu có tần số trong dải 1800MHz đi qua cổng 1.

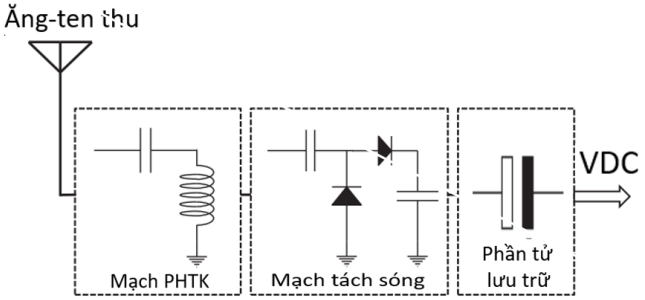
- **Bộ lọc thông dải 2100MHz:** Cho phép các tín hiệu có tần số trong dải 2100MHz đi qua cổng 2.

Hai bộ lọc được ghép nối qua mạch hình T (T-juntion) để tạo ra cấu trúc ba cổng. Nhờ cấu trúc này, diplexer có thể thực hiện hai nhiệm vụ. Khi hoạt động như một bộ phân kênh, nó nhận một tín hiệu hỗn hợp từ cổng chung và tách chúng ra hai cổng riêng biệt. Ngược lại, khi hoạt động như một bộ ghép kênh, nó kết hợp hai tín hiệu từ hai cổng tần số thấp và cao vào một đường truyền duy nhất tại cổng chung. Một yêu cầu thiết kế quan trọng là độ cách ly cao giữa hai cổng để đảm bảo tín hiệu của hai băng tần không bị trộn lẫn, rò rỉ, gây ảnh hưởng đến quá trình xử lý, từ đó tối ưu hiệu suất từng kênh.

Ứng dụng của diplexer rất phổ biến, đặc biệt là trong các trạm gốc di động, nơi tín hiệu phát và tín hiệu thu hoạt động ở các băng tần khác nhau cần sử dụng chung một ăng ten để tiết kiệm chi phí và không gian. Ngoài ra, chúng còn được dùng trong hệ thống vệ tinh, truyền hình cáp và các thiết bị liên lạc vô tuyến khác. Trong khuôn khổ của đề tài này, với mục tiêu thu thập năng lượng từ cả hai băng tần 4G là LTE B3 (1.8GHz) và LTE B1 (2.1GHz), diplexer đóng vai trò trung tâm không thể thiếu. Một ăng ten băng rộng sẽ thu nhận đồng thời cả hai tín hiệu này. Sau đó, diplexer sẽ hoạt động như một bộ tách kênh, phân luồng tín hiệu một cách chính xác: tín hiệu ở băng tần 1.8GHz sẽ được dẫn tới một nhánh xử lý riêng, trong khi tín hiệu 2.1GHz sẽ đi theo một nhánh khác. Việc tách riêng hai luồng năng lượng này cho phép tối ưu hóa từng nhánh xử lý (bao gồm phối hợp trở kháng và chỉnh lưu) cho từng tần số cụ thể, từ đó nâng cao hiệu suất chuyển đổi năng lượng tổng thể của toàn hệ thống.

2.3.3. Mạch chỉnh lưu rectifier

Hầu hết các mạch thu thập năng lượng sóng vô tuyến thường bao gồm ăng ten, mạng phối hợp trở kháng, mạch tách sóng, phần tử lưu trữ, và tải.



Hình 2.4: Cấu trúc của mạch thu thập năng lượng sóng vô tuyến

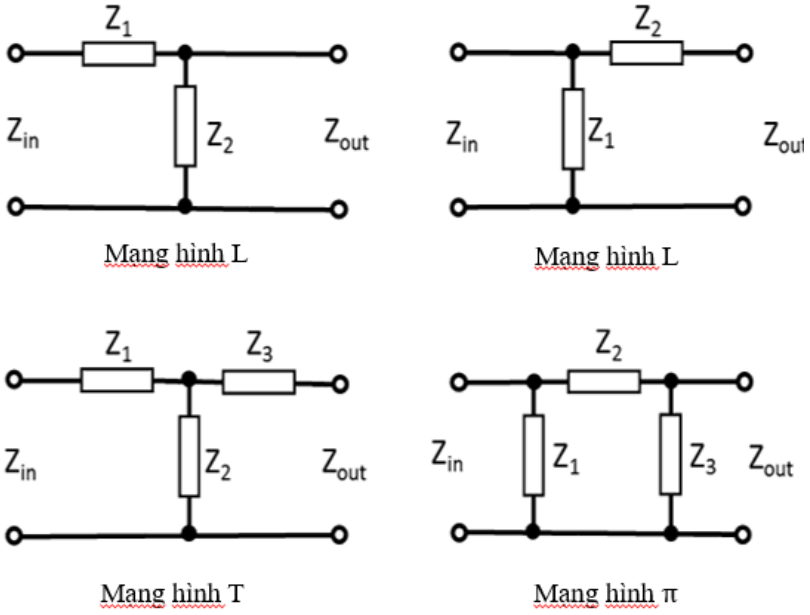
Chức năng của các phần tử như sau:

- Ăng ten thu nhận tín hiệu RF ngoài môi trường và truyền vào mạch tách sóng thông qua mạch phối hợp trở kháng.
- Mạch phối hợp trở kháng có nhiệm vụ phối hợp giữa trở kháng của ăng ten và trở kháng mạch tách sóng.
- Mạch tách sóng thức hiện quá trình chuyển đổi từ năng lượng sóng vô tuyến thành năng lượng một chiều và cung cấp ra tải tiêu thụ.

Chi tiết về cấu trúc, nguyên lý hoạt động và chức năng của các phần tử được thảo luận chi tiết dưới đây.

2.3.3.1. Mạch phối hợp trở kháng

Trong các hệ thống điện tiêu thụ điện năng thấp, rò rỉ điện trong quá trình truyền tải có thể dẫn đến thiếu năng lượng. Trong những trường hợp này, giải pháp là thêm mạch phối hợp trở kháng (Matching Network) đảm bảo công suất truyền tối đa giữa nguồn RF và tải. Đối với các ứng dụng RFEH, ăng ten thu được coi là nguồn, bộ nhân tách sóng-nhân điện áp được coi là tải. Ở chế độ làm việc một chiều, truyền tải điện tối ưu khi các điện trở của nguồn và tải được phối hợp với nhau. Trong mạch RF, trở kháng được gọi thay cho điện trở. Sự chênh lệch trở kháng giữa nguồn và tải tạo ra dòng điện phản xạ trong mạch làm giảm hiệu quả truyền tải của hệ thống. Như tên gọi của nó, mạch phối hợp trở kháng đảm bảo cho trở kháng của nguồn và tải được phối hợp với nhau bằng cách thêm các thành phần phản ứng ở giữa.



Hình 2.5: Các cấu hình mạng phối hợp trở kháng dải tần RF

Do mạch thu thập năng lượng bao gồm các diode, cuộn cảm, tụ điện là các thiết bị phi tuyến, bản thân mạch thể hiện tính phi tuyến. Điều này ngụ ý rằng trở kháng của mạch thu năng lượng thay đổi theo lượng điện năng nhận được từ ăng ten. Quá trình truyền công suất tối đa xảy ra khi mạch được khớp với ăng ten nên việc phối hợp trở kháng thường được thực hiện ở một số mức của công suất đầu vào cụ thể. Mạch phối hợp trở kháng thực hiện chuyển đổi trở kháng để đảm bảo cung cấp năng lượng tối đa từ ăng ten đến mạch tách sóng.

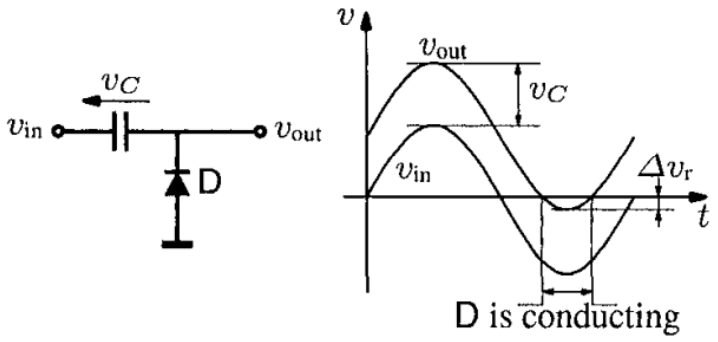
Có ba cấu hình mạch phối hợp trở kháng cơ bản là các mạch dạng L, T và π (hình 2.5). Mạch phối hợp dạng L thường được sử dụng vì nó thường chỉ có hai thành phần giúp đơn giản hóa quá trình thiết kế và không làm thay đổi hệ số phẩm chất Q của mạch.

Các cấu hình dạng T và π phức tạp hơn mạch dạng L. Hơn nữa, việc tổ chức các cấu hình T và π thành nhiều giai đoạn thì trở kháng ra do mạng tạo ra sẽ là trở kháng của khớp cuối cùng, đồng thời sẽ làm thay đổi hệ số phẩm chất Q. Nhờ đó phương pháp này rất hữu ích trong việc cải thiện mức điện áp sau tách sóng. Một số chỉ tiêu cần đánh giá của mạch phối hợp trở kháng bao gồm tần số, băng thông, khả năng điều chỉnh và độ phức tạp. Tuy nhiên, sự đánh đổi giữa chúng là việc thực hiện các cấu hình này đòi hỏi nhiều thành phần hơn so với các mạch phối hợp truyền thống, do đó, làm tăng mức độ phức tạp của mạch.

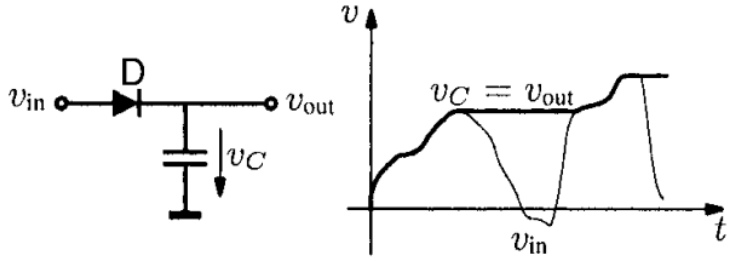
2.3.3.2. Mạch tách sóng

Cấu trúc chỉnh lưu cầu được ứng dụng rất hiệu quả trong các ứng dụng chỉnh lưu dòng xoay chiều AC tần số thấp như các nguồn điện dân dụng. Tuy nhiên ở tần số cao trong dải từ vài MHz đến GHz, cụ thể là trong các ứng dụng RF, thì chỉnh lưu cầu lại không phải lựa chọn lý tưởng. Diode sử dụng trong mạch chỉnh lưu có thời gian phục hồi ngược (reverse recovery time) chuyển từ trạng thái dẫn sang trạng thái chặn. Ở tần số cao, thời gian phục hồi này sẽ làm giảm hiệu suất chỉnh lưu, mà cấu trúc mạch chỉnh lưu cầu sử dụng bốn diode khiến cho hiệu suất thấp hơn nhiều so với các cấu trúc sử dụng ít diode hơn.

Do đó, cấu trúc chỉnh lưu toàn sóng sử dụng hai diode sẽ phù hợp nhất để ứng dụng trong hệ thống Rectifier. Hai dạng mạch cơ bản cấu tạo nên mạch chỉnh lưu toàn sóng là mạch ghim điện áp (Clamping circuit) và mạch chỉnh lưu (Rectifier circuit).



Hình 2.6: Mạch ghim điện áp và dạng sóng đầu ra



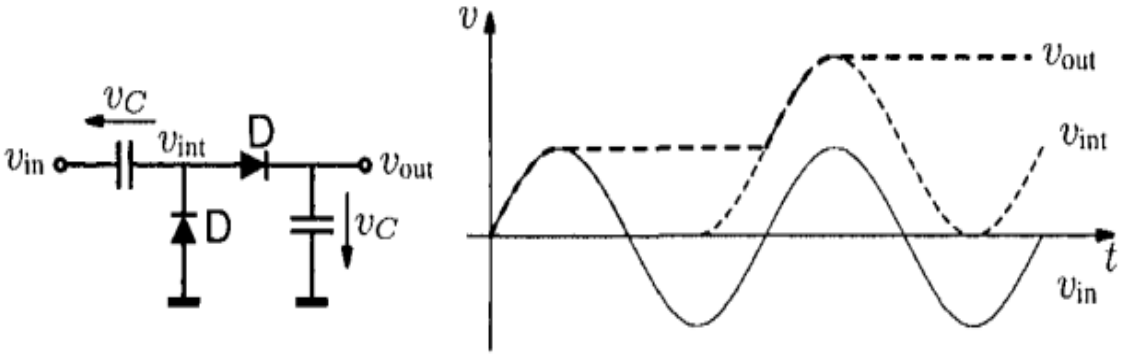
Hình 2.7: Mạch chỉnh lưu nửa sóng và dạng sóng đầu ra

Mạch ghim điện áp là dạng mạch cơ bản được sử dụng để chuyển mức điện áp của tín hiệu xoay chiều AC nhưng vẫn có thể giữ nguyên dạng sóng của tín hiệu, cố định đỉnh dưới của tín hiệu ở mức 0. Tụ điện đóng vai trò là phần tử phóng/tích trữ năng lượng, còn diode D đóng vai trò là khoá điện tử. Ban đầu khi bắt đầu khởi động, tín hiệu đầu vào ở đỉnh nửa chu kỳ dương, diode sẽ phân cực ngược. Lúc này diode sẽ không dẫn điện, tụ điện gần như không được nạp. Do đó $v_{out} = v_{in} = v_{max}$. Khi tín hiệu ở đỉnh nửa chu kỳ âm, diode sẽ phân cực thuận, cho phép năng lượng điện đi qua. Trong quá trình này tụ sẽ nạp điện qua diode, điện áp trên tụ sẽ gần bằng với điện áp đỉnh đầu vào do hằng số thời gian xả của tụ nhỏ hơn nhiều so với thời gian chuyển giữa hai chu kỳ. Do đó $v_{out} = v_{in} + v_C = -v_{max} + v_{max} = 0$. Khi đến chu kỳ tiếp theo, đầu vào là điện áp $v_{in} = v_{max}$, diode ngưng dẫn, tụ điện lưu trữ điện áp $v_C \approx v_{max}$ từ chu kỳ trước do thời gian xả của tụ là khá cao, điện áp gần như không đổi. Vì vậy điện áp $v_{out} = v_{in} + v_C = v_{max} + v_{max} = 2v_{max}$. Do trường hợp thực tế các linh kiện không lý tưởng, vậy nên vẫn sẽ tồn tại điện áp âm v_r gần bằng 0. (Trường hợp trên chưa đề cập đến điện áp ngưỡng của diode)

Mạch chỉnh lưu nửa sóng sử dụng đặc tính của diode, khi ở nửa chu kỳ dương, diode sẽ phân cực thuận, lúc này $v_{out} = v_{in1}$, tụ điện được nạp với điện áp đầu vào.

Nửa chu kỳ âm, diode phân cực ngược và không dẫn điện. Điện áp đầu ra được xả từ điện tích tụ nạp từ nửa chu kỳ trước, duy trì ở một khoảng thời gian nhất định. Nửa chu kỳ dương tiếp theo, do hằng số thời gian xả của tụ nhỏ hơn nhiều so với thời gian chuyển giữa hai chu kỳ, điện áp trên tụ xả ở đầu ra gần như không đổi và xấp xỉ mức điện áp đỉnh ở chu kỳ đầu tiên. Đồng thời tụ điện cũng giúp làm giảm độ gợn điện áp và ổn định dòng DC. Do đó $v_{out} = v_C = v_{in1}$. Khi đến chu kỳ tiếp theo, đầu vào điện áp $v_{in} = v_{in2}$, lúc này điện áp đầu ra sẽ là $v_{out} = v_C + v_{in2} = v_{in1} + v_{in2}$. (Trường hợp trên chưa đề cập đến điện áp ngưỡng của diode)

Ghép hai dạng mạch trên lại ta sẽ được cấu trúc mạch chỉnh nhân đôi điện áp, với điện áp đầu ra ổn định và nhân đôi điện áp so với điện áp đỉnh của đầu vào.



Hình 2.8: Mạch chỉnh lưu nhân đôi điện áp và dạng sóng đầu ra

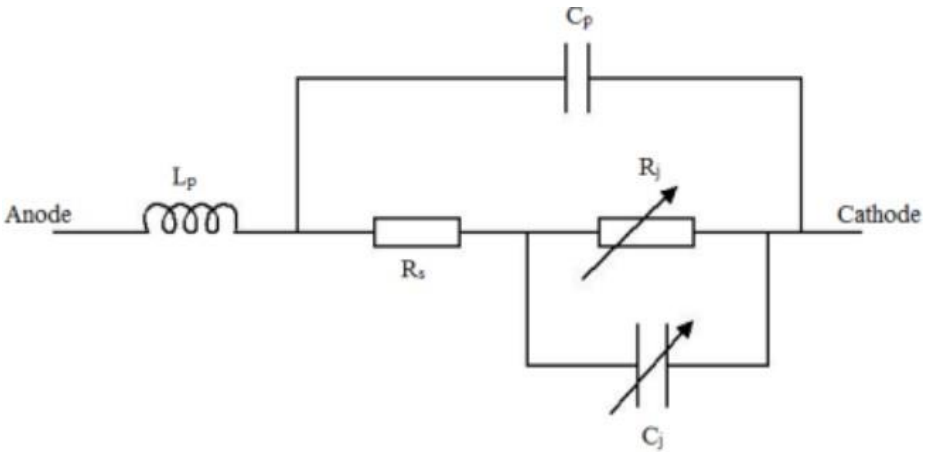
Do đó, cấu trúc chỉnh lưu toàn sóng sử dụng hai diode sẽ phù hợp nhất để ứng dụng trong hệ thống Rectifier. Không chỉ khắc phục được nhược điểm về hiệu suất và độ ổn định của hai cấu trúc trên mà còn có thể tăng mức điện áp đầu ra. Đặc tính này là yếu tố then chốt giúp khuếch đại nguồn tín hiệu đầu và RF vốn khá yếu lên mức có thể sử dụng. Vì vậy đây là giải pháp tối ưu nhất được lựa chọn để triển khai trong đề tài.

2.3.4. Diode Schottky

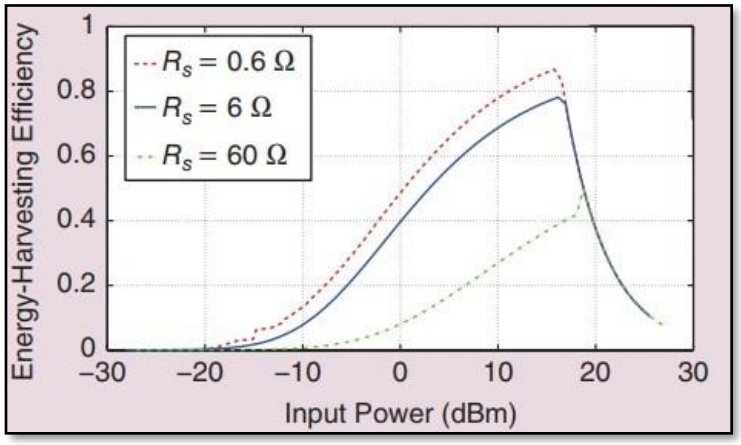
Khối chuyển đổi AC-DC hoạt động dựa trên sự kết hợp của một hoặc nhiều diode chỉnh lưu. Diode chỉnh lưu sẽ chỉ cho dòng điện chạy theo một chiều, khi điện áp hoạt động lớn hơn ngưỡng điện áp thuận VD của diode. Ở tần số thấp, diode bán dẫn có thể dễ dàng chuyển chiều phân cực. Nhưng khi tần số tăng đến ngưỡng, sự ngưng dẫn không thể đủ nhanh để ngăn chặn dòng điện trong bán kì âm. Thêm vào đó, diode bán dẫn thông thường có điện áp phân cực là 0.6-0.7V.

Với ứng dụng phục hồi năng lượng từ sóng điện thoại, sóng vô tuyến có trong môi trường sống, công suất đầu vào rất thấp, việc sử dụng diode có điện áp phân cực càng lớn, sẽ làm giảm hiệu suất của toàn mạch. Do những lí do đã nêu trên, có thể thấy diode bán dẫn là không phù hợp với đề tài. Schottky diode là diode sử dụng lớp tiếp giáp kim loại/bán dẫn, thường được sử dụng trong các ứng dụng cao tần, vì các Schottky diode có tần số chuyển rất lớn và điện áp phân cực chỉ nằm trong khoảng từ 0.15-0.45V. Với đặc tính như vậy, Schottky diode sẽ phù hợp với mục tiêu đề tài.

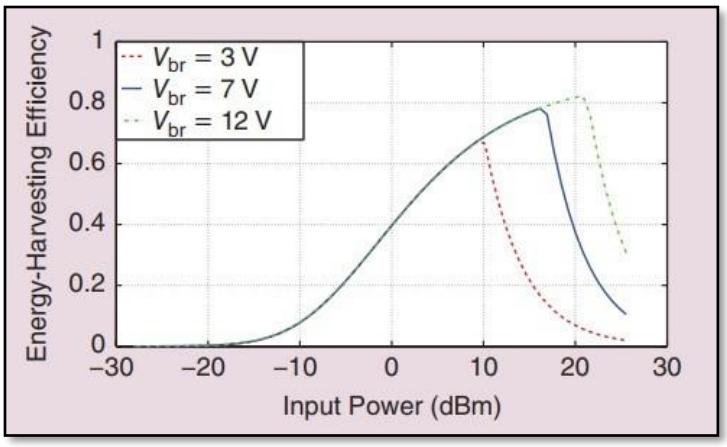
Schottky diode là một phần tử phi tuyến. Mô hình tương đương của diode Schottky bao gồm một điện trở nối tiếp Rs, tụ điện tiếp giáp biến thiên C_j, điện trở tiếp giáp biến thiên R_j, thành phần ký sinh từ việc đóng vỏ diode C_p và L_p. Tụ điện tiếp giáp C_j ảnh hưởng đến thời gian chuyển mạch của diode, với giá trị C_j càng nhỏ, tốc độ chuyển mạch càng lớn.



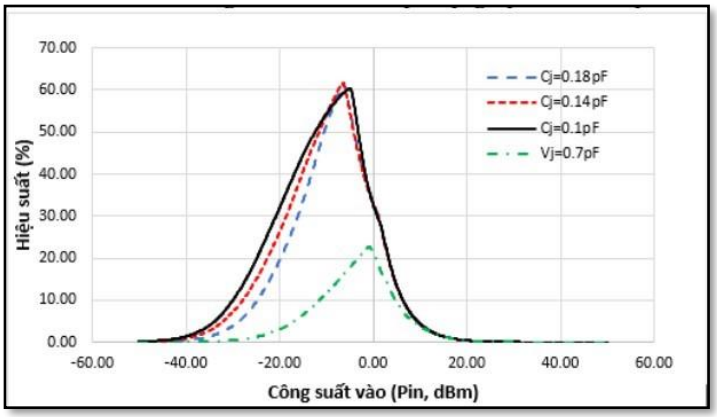
Hình 2.9: Sơ đồ tương đương của diode Schottky



Hình 2.10: Ảnh hưởng của điện trở lớp tiếp giáp lên hiệu suất chuyển đổi



Hình 2.11: Ảnh hưởng của điện áp đánh thủng lên hiệu suất



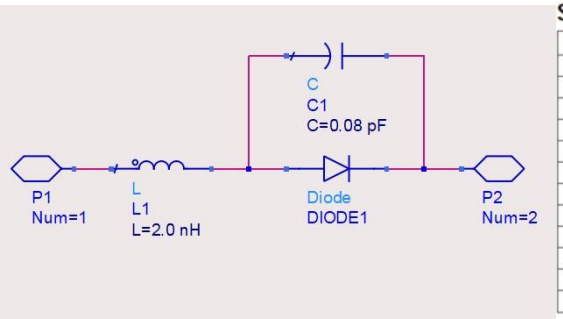
Hình 2.12: Ảnh hưởng điện dung lớp tiếp giáp lên hiệu suất chuyển đổi mạch chỉnh lưu

Từ những phân tích trên ta thấy ở công suất vào thấp thì C_j, V_j và R_s càng nhỏ càng tốt. Bv chỉ ảnh hưởng khi công suất đầu vào là lớn. Với công suất đầu vào thấp dưới - 10dBm thì việc lựa chọn diode phải cân bằng giữa 3 thông số C_j, V_j và R_s.

Bảng 2.6: Liệt kê so sánh một số loại Diode thường được sử dụng cho thiết kế

Thông số	**HSMS-2850**	**SMS-7630**	**SMS-1546**	**SMS-7621**	**HSMS-2820**
Cj*(pF)*	0.18	0.14	0.38	0.1	0.7
V_j*(V)*	0.35	0.34	0.51	0.51	0.65
R_s*(Ω)*	25	20	4	12	6
B_v*(V)*	3.8	2	3	3	15

Dựa vào Bảng 2.6, ta có thể thấy diode Schottky SMS7630 thỏa mãn các yêu cầu đặt ra, phù hợp để đưa vào thiết kế mạch chỉnh lưu.



SPICE Model Parameters

Parameter	Unit	SMS7630
IS	A	5E-06
R_S	Ω	20
N		1.05
TT	S	1E-11
C_{J0}	pF	0.14
M		0.40
E_G	eV	0.69
XTI		2
F_C		0.5
B_V	V	2
I_{BV}	A	1E-4
V_J	V	0.34

Hình 2.13: Mô hình diode SMS7630, sử dụng thông số SPICE do nhà sản xuất cung cấp

2.4. Thiết kế cấu trúc, mô phỏng mạch Diplexer

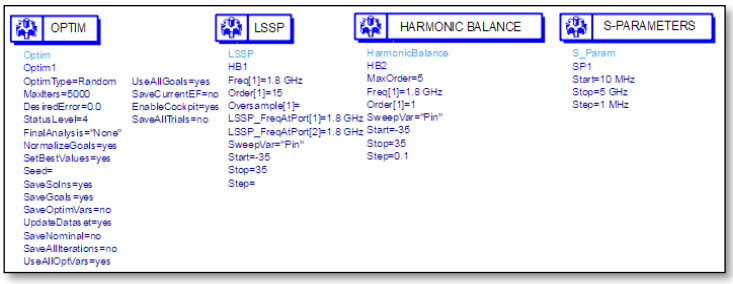
2.4.1. Giới thiệu phần mềm

Advanced Design System (ADS) là phần mềm tự động hóa thiết kế điện tử hàng đầu thế giới được sản xuất bởi Keysight EDA, một bộ phận của Keysight Technologies dành cho các ứng dụng RF, siêu cao tần. ADS đi tiên phong trong các công nghệ mô phỏng nhiệt, mô phỏng trường điện từ 3D EM, cung cấp các công cụ kiểm tra tham số ma trận tán xạ S-Parameters, tính toán và tối ưu điện áp theo công suất từ mô phỏng Hamonic Balance, kiểm tra và phối hợp trở kháng nhờ công cụ mô phỏng ma trận tán xạ tín hiệu lớn…tích hợp mạnh mẽ và sáng tạo nhất được sử dụng bởi các công ty hàng đầu trong ngành công nghệ không dây, mạng tốc độ cao, hàng không vũ trụ, ô tô và công nghiệp năng lượng thay thế. Đối với 5G, IoT, liên kết dữ liệu data gigabit, radar, vệ tinh và thiết kế cung cấp năng lượng chuyển đổi tốc độ cao. Phần mềm ADS có nhiều ưu việt hơn so với các công cụ hỗ trợ, thiết kế mạch RF và siêu cao tần khác từ các khâu tính toán thiết kế đến mô phỏng và layout mạch in.

Các bước cơ bản để thực hiện mô phỏng với ADS gồm 2 bước như sau:

Bước 1: Tạo không gian làm việc, đặt tên cho không gian làm việc, chọn các thư viện bao gồm trong không gian làm việc, ADS cung cấp thư viện các thành phần tương tự hoặc RF và DSP…

Bước 2: Tạo sơ đồ thiết kế: Trong phần này người dùng có thể lựa chọn trên thanh công cụ phía bên trên của màn hình giao diện có các hình dạng của các phần tử, thiết bị mà người dùng mong muốn. Một số dạng phần tử thông dụng như bóng bán dẫn, diode, …

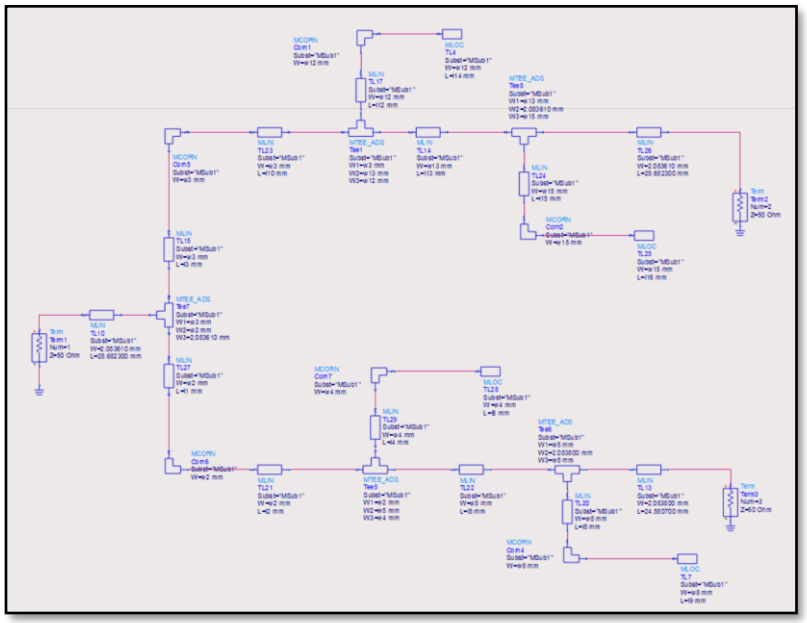


Hình 2.14: Giới thiệu một số công cụ hỗ trợ thiết kế chuyên nghiệp trong ADS

Với giao diện rõ ràng, thao tác đơn giản, ADS là một công cụ hỗ trợ đắc lực cho việc nghiên cứu, tính toán và thiết kế cho ra kết quả một các nhanh chóng, chính xác và hữu ích cho người sử dụng.

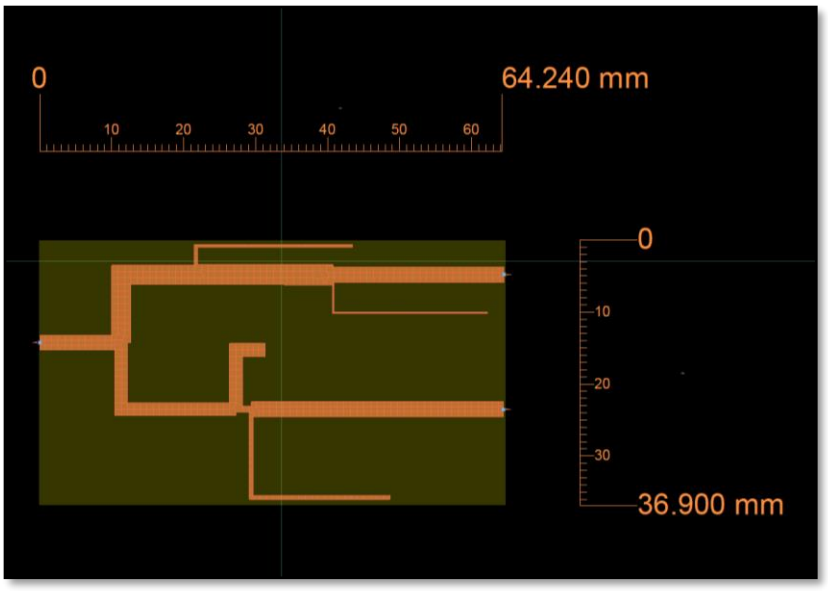
2.4.2. Thiết kế nguyên lý và mô phỏng layout

Mạch được mô phỏng sử dụng chất nền Teflon ZYF255DA có hằng số điện môi ε_r = 2.55, độ dày chất nền 0.76mm, độ dày đồng 0.035mm. Các bước sóng λ_1 = 24.9mm, λ_2 = 21.4mm tương ứng với các tần số f_1 = 1.8GHz, f_2 = 2.1GHz.



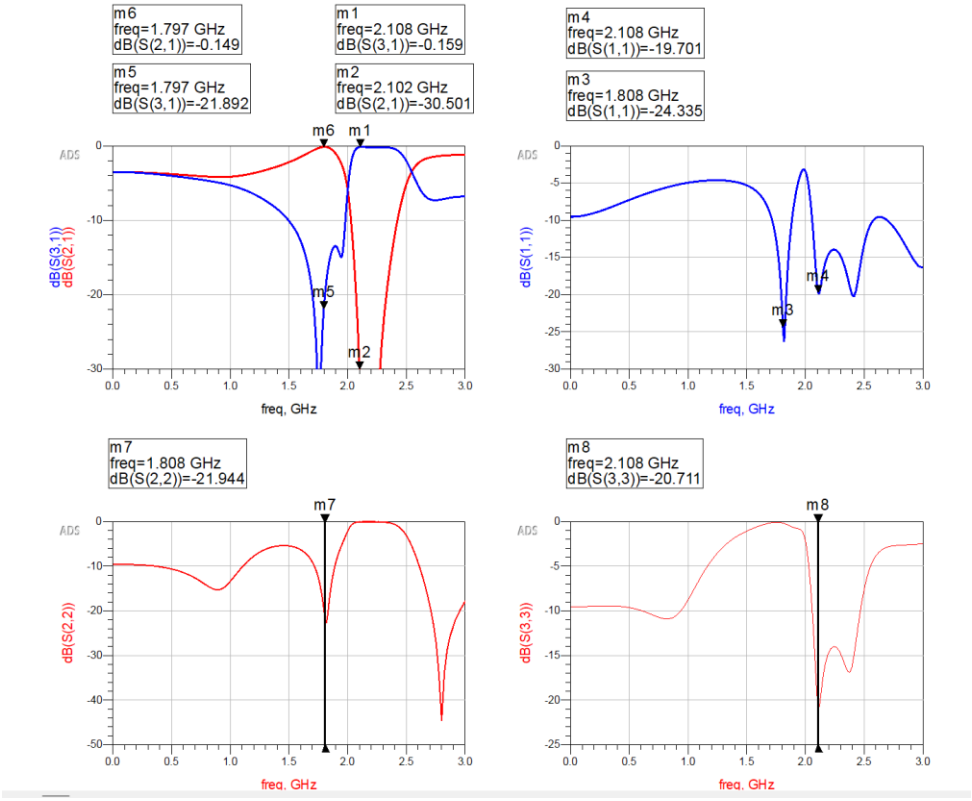
Hình 2.15: Sơ đồ nguyên lý mạch diplexer

- Port 1: Common port – 1.8GHz & 2.1GHz
- Port 2: 1.8GHz
- Port 3: 2.1GHz



Hình 2.16: Thiết kế layout mạch diplexer

Kích thước mạch đạt 64.24 x 36.9 mm



Hình 2.17: S-parameter mô phỏng ESM

Bảng các giá trị S-Parameter mô phỏng bằng phần mềm ADS

Bảng 2.7: Các giá trị S-parameter mô phỏng

S-parameter	Tần số	Spec. (dB)	Giá trị (dB)	Pass/Fail
S11	1.8Ghz	≤ -14	-24.335	**Pass**
	2.1GHz	≤ -14	-19.701	**Pass**
S22	1.8Ghz	≤ -14	-21.944	**Pass**
S33	2.1GHz	≤ -14	-20.711	**Pass**
S12	1.8Ghz	≥ -1	-0.149	**Pass**
	2.1GHz	≤ -14	-30.501	**Pass**
S13	1.8Ghz	≤ -14	-21.892	**Pass**
	2.1GHz	≥ -1	-0.159	**Pass**

Từ bảng trên ta có thể thấy rằng hệ số phản xạ S11 tại cổng đầu vào và các hệ số phản xạ S22, S33 tại các đầu ra khá thấp, hệ số truyền S12 và S13 cao cho thấy tín hiệu đi qua mạch ít bị suy hao. Độ cách ly giữa các cổng đầu ra cao, đảm bảo tín hiệu không bị chồng lấn. Mô phỏng cho thấy các thông số đạt các mục tiêu thiết kế đề ra, có thể thực hiện bước chế tạo thử nghiệm tiếp theo.

Công thức tính hiệu suất truyền:

$$Eff = 10^{\frac{T}{10}} * 100\%$$

Trong đó T là hệ số truyền qua

Từ công thức này ta có thể tính được hiệu suất truyền trong mạch mô phỏng tại port 2 (1.8GHz) là 96.6%; port 3 (2.1GHz) là 95.6%.

2.5. Thiết kế và mô phỏng mạch chỉnh lưu

Mạch được mô phỏng sử dụng chất nền Teflon ZYF255DA có hằng số điện môi ε_r = 2.55, độ dày chất nền 0.76mm, độ dày đồng 0.035mm. Các linh kiện được sử dụng trong mạch như sau:

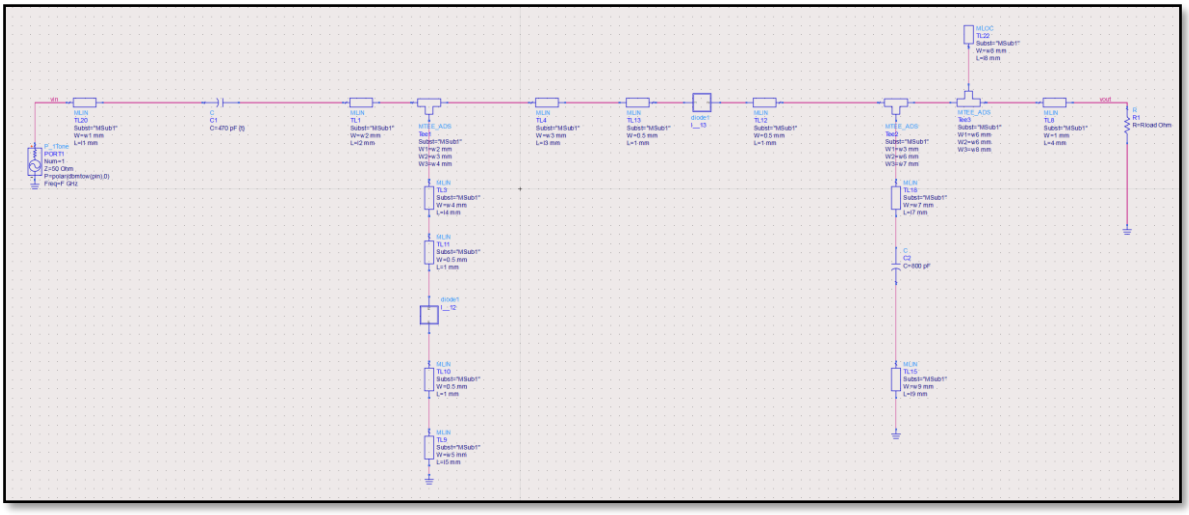
Bảng 2.8: Các linh kiện sử dụng trong mạch chỉnh lưu

Linh kiện	Giá trị	
	Mạch chỉnh lưu 1.8GHz	**Mạch chỉnh lưu 2.1GHz**
Tụ chỉnh lưu C1	470pF	470pF
Tụ lọc C2	800pF	

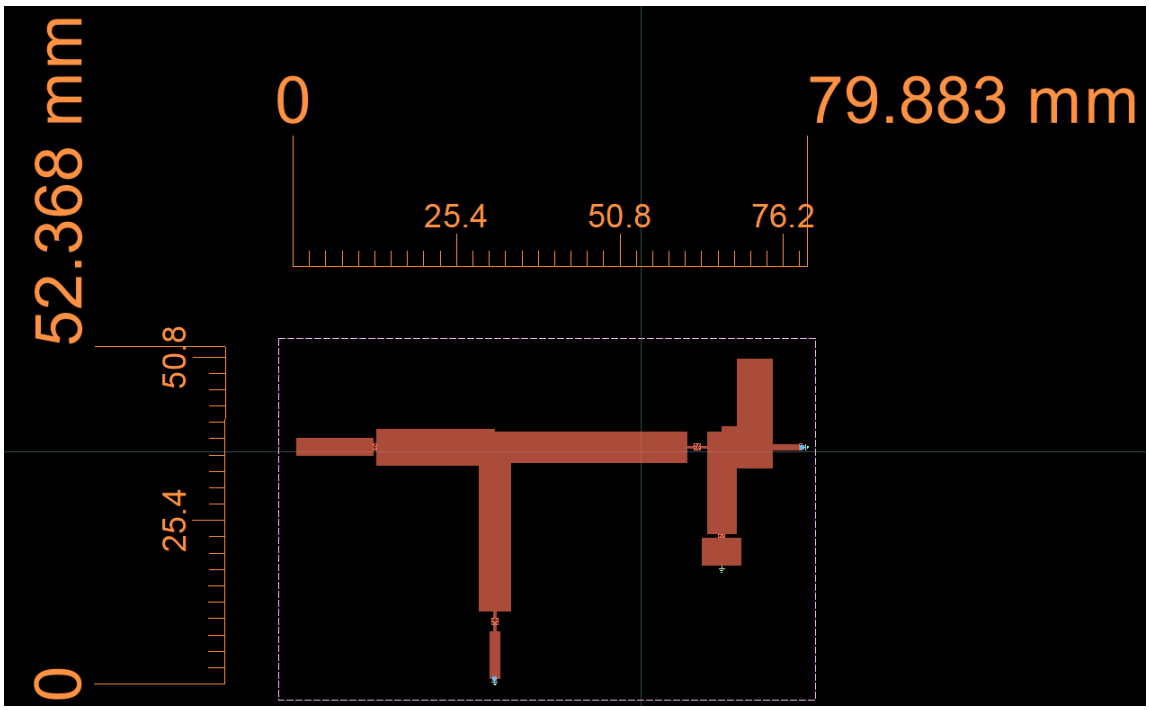
Diode	SMS-7630	SMS-7630
Tải thuần trở	3.3kΩ	3.3kΩ

2.5.1. Mạch chỉnh lưu 1.8GHz

Mạch mô phỏng có cấu trúc như hình:

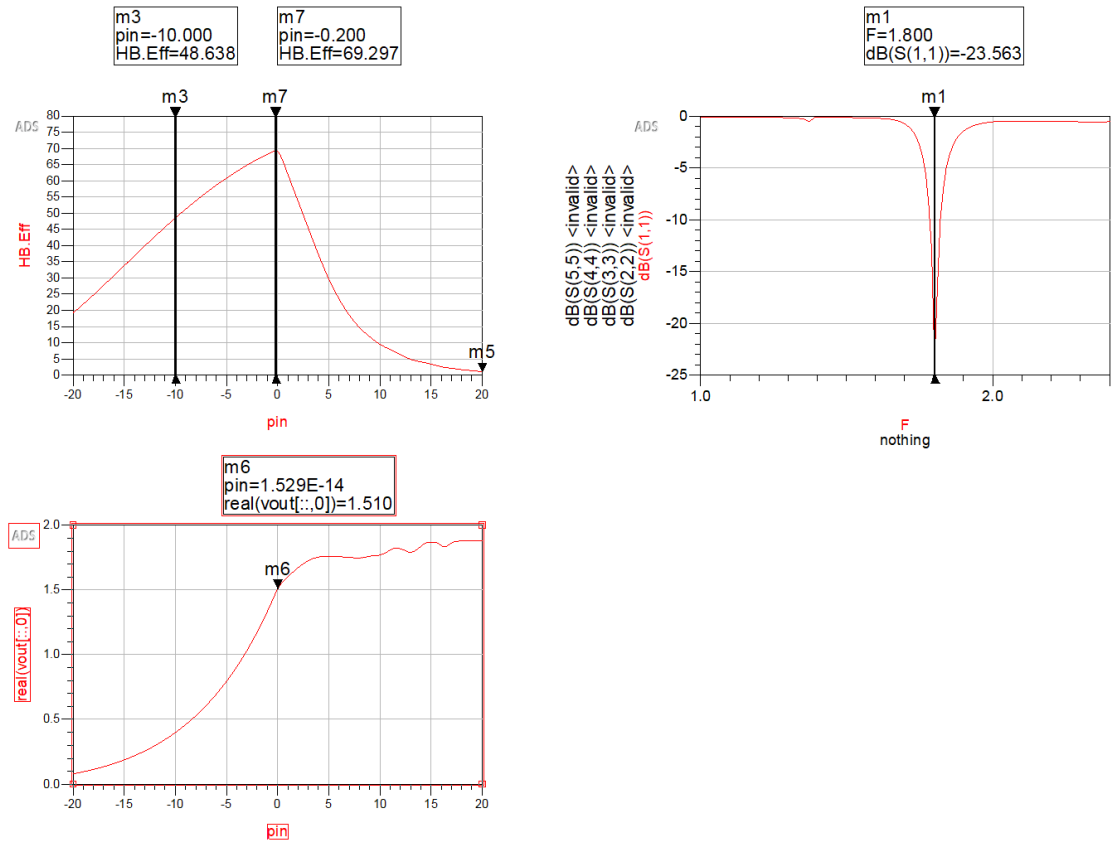


Hình 2.18: Sơ đồ nguyên lý mạch chỉnh lưu 1.8GHz



Hình 2.19: Thiết kế layout mạch chỉnh lưu 1.8GHz

Kích thước mạch 79.883 x 52.368 mm



Hình 2.20: Hệ số phản xạ, hiệu suất chuyển đổi và điện áp đầu ra của mạch chỉnh lưu 1.8GHz

Bảng 2.9: Các thông số mô phỏng mạch chỉnh lưu 1.8GHz

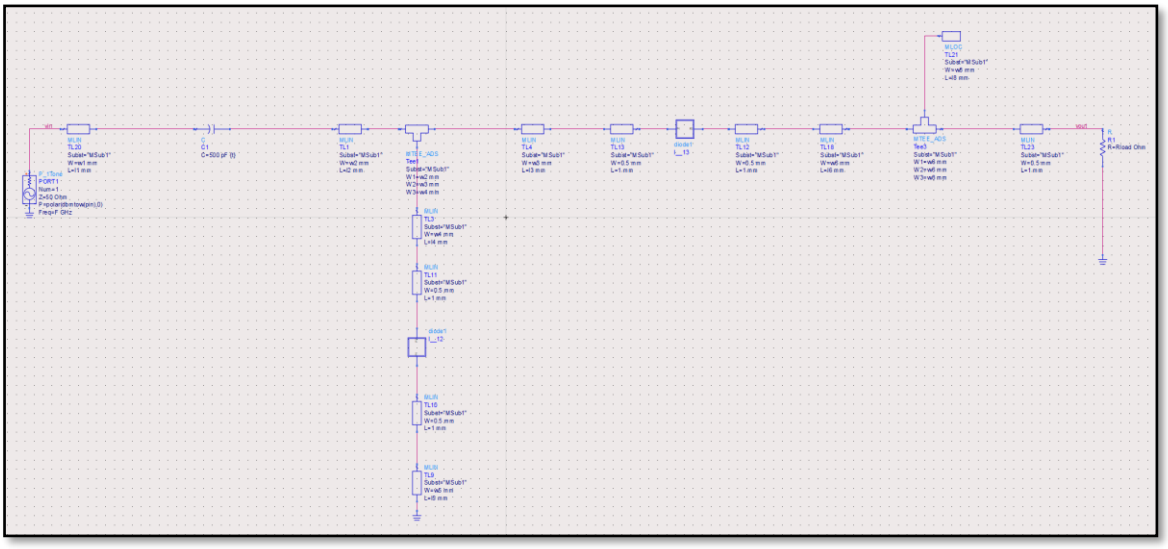
Thông số	Spec.	Value	Pass/Fail
S11	≤ -14 dB	-23.563 dB	**Pass**
Hiệu suất (max)	≥ 30 %	69.297 %	**Pass**
Điện áp đầu ra (tại P_{in} 0dBm)	≥ 0.6 V	1.529 V	**Pass**

Từ bảng trên ta có thể thấy mạch có hệ số phản xạ tại cổng đầu vào thấp, hiệu suất đầu ra đạt yêu cầu trong khoảng từ -16 dB đến 5dB. Điện áp đầu ra đạt mức 1.529V ở công suất đầu vào 0dBm.

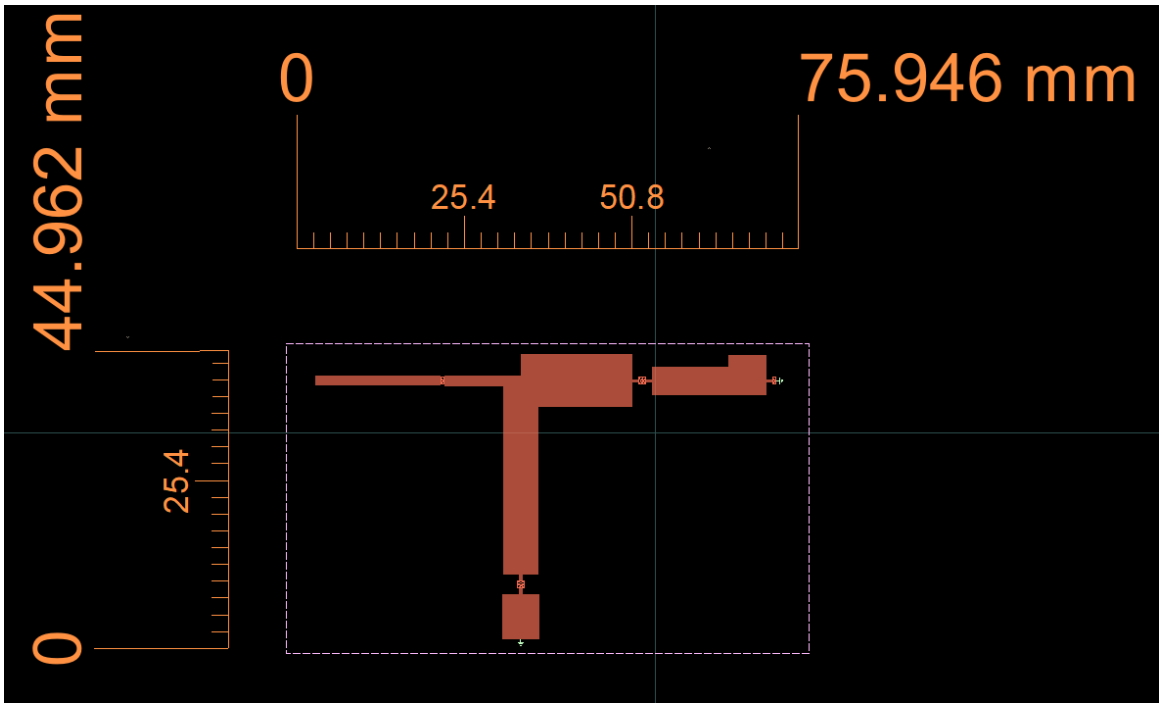
Mô phỏng cho thấy mạch thiết kế có các thông số đạt mục tiêu thiết kế đề ra. Có thể thực hiện bước chế tạo thử nghiệm tiếp theo.

2.5.2. Mạch chỉnh lưu 2.1Ghz

Mạch mô phỏng có cấu trúc như hình 2.22:

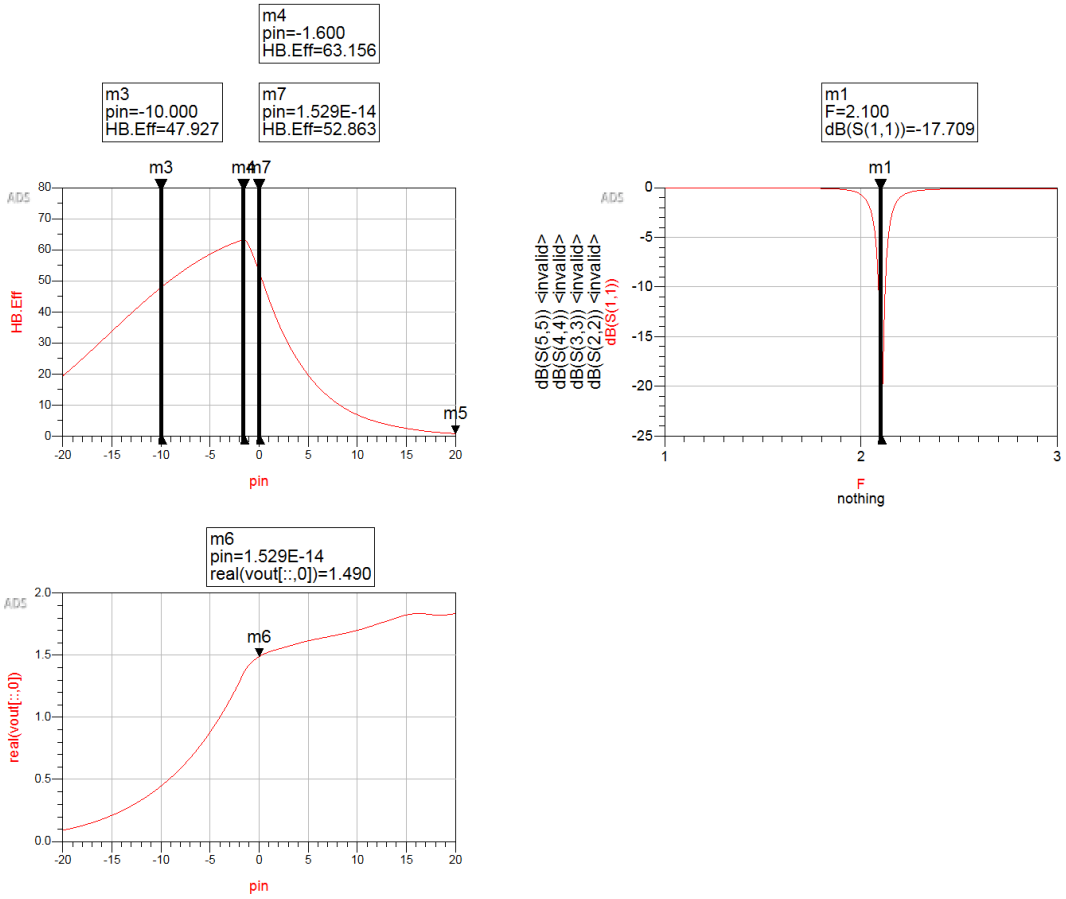


Hình 2.21: Sơ đồ nguyên lý mạch chỉnh lưu 2.1GHz



Hình 2.22: Thiết kế layout mạch chỉnh lưu 2.1GHz

Kích thước mạch là 75.946 x 44.962 mm



Hình 2.23: Hệ số phản xạ, hiệu suất chuyển đổi và điện áp đầu ra của mạch chỉnh lưu 2.1GHz

Bảng 2.10: Các thông số mô phỏng mạch chỉnh lưu 2.1Ghz

Thông số	Spec.	Value	Pass/Fail
S11	≤ -14 dB	-17.709 dB	**Pass**
Hiệu suất (max)	≥ 30 %	63.156 %	**Pass**
Điện áp đầu ra (tại P_{in} 0dBm)	≥ 0.8 V	1.49 V	**Pass**

Từ bảng trên ta có thể thấy mạch có hệ số phản xạ tại cổng đầu vào thấp, hiệu suất đầu ra đạt yêu cầu trong khoảng từ -17 dB đến 3dB. Điện áp đầu ra đạt mức 1.49V ở công suất đầu vào 0dBm.

Mô phỏng cho thấy mạch thiết kế có các thông số đạt mục tiêu thiết kế đề ra. Có thể thực hiện bước chế tạo thử nghiệm tiếp theo.

2.6. Kết luận chương 2

Chương 2 đã trình bày chi tiết quá trình nghiên cứu, lựa chọn và thiết kế bộ thu thập năng lượng từ sóng vô tuyến cho ứng dụng IoT. Trên cơ sở lý thuyết đã phân tích ở chương 1, chương này đã xác định các thông số kỹ thuật mục tiêu và đề xuất cấu trúc hệ thống bao gồm ăng ten thu sóng, bộ lọc tần số dạng diplexer và các mạch chỉnh lưu tương ứng cho hai băng tần LTE B3 (1.8 GHz) và LTE B1 (2.1 GHz).

Kết quả mô phỏng cho thấy bộ lọc diplexer đạt được khả năng tách kênh tốt, độ cách ly cao và phối hợp trở kháng hiệu quả tại hai dải tần làm việc. Các mạch chỉnh lưu cũng cho hiệu suất chuyển đổi cao, điện áp đầu ra đạt yêu cầu thiết kế.

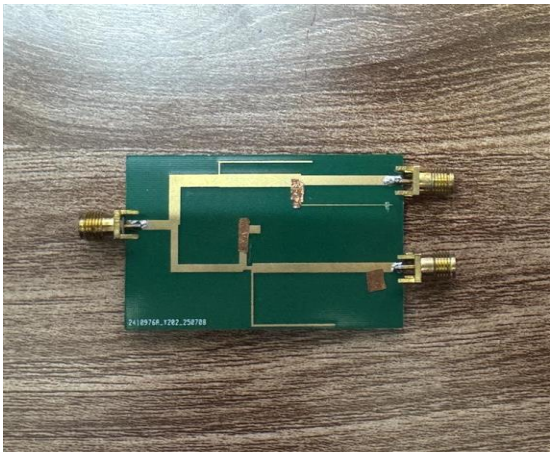
Những kết quả này chứng minh tính khả thi của mô hình bộ thu thập năng lượng được đề xuất để chuẩn bị cho giai đoạn chế tạo, thử nghiệm và đánh giá thực nghiệm được trình bày trong Chương 3.

Chương 3. Chế tạo, đo kiểm và đánh giá

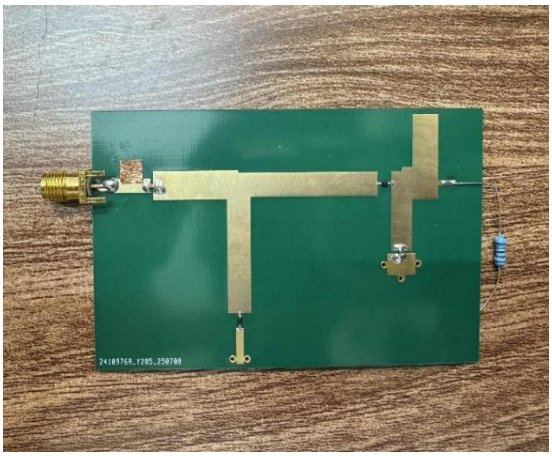
Chương 3 trình bày các bước chế tạo, bố trí thử nghiệm, đo đạc và đánh giá hoạt động của bộ thu thập năng lượng từ sóng vô tuyến được thiết kế ở các chương trước. Kết quả đo kiểm giúp đánh giá chất lượng hệ thống, là cơ sở quan trọng cho việc hoàn thiện thiết kế và đề xuất hướng phát triển cho các nghiên cứu tiếp theo.

3.1. Các mạch thành phần bộ thu thập năng lượng sóng vô tuyến

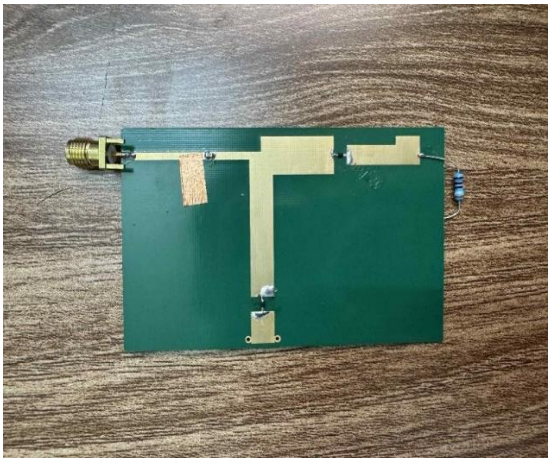
Sau khi thiết kế, ta tiến hành đặt gia công mạch in sử dụng chất nền Teflon ZYF255DA độ dày 0.76mm.



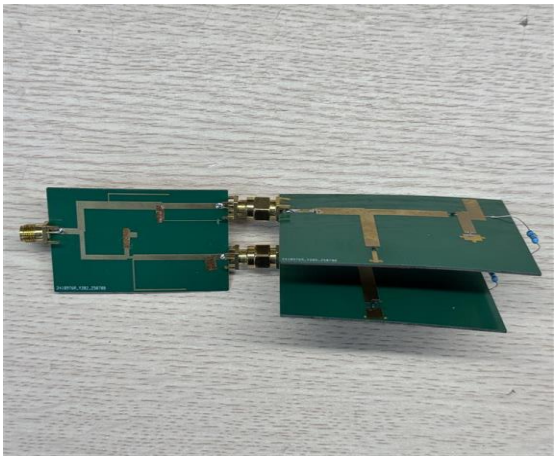
a) Mạch lọc Diplexer



b) Mạch chỉnh lưu 1.8GHz



c) Mạch chỉnh lưu 2.1GHz



d) Bộ thu thập năng lượng sóng vô tuyến hoàn chỉnh

Hình 3.1: Hình ảnh thực tế các mạch thành phần cấu tạo nên bộ thu thập năng lượng hoàn chỉnh

3.2. Đo đạc và đánh giá chất lượng bộ thu thập năng lượng

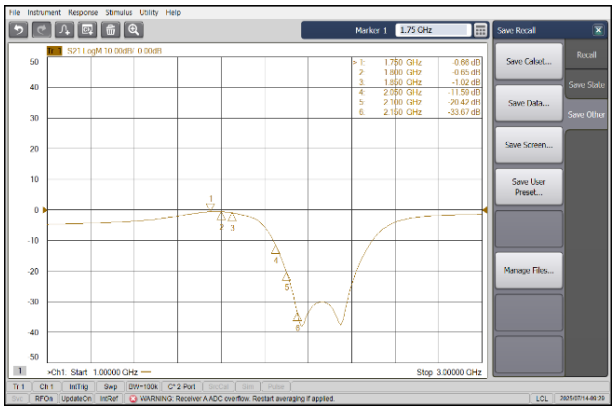
3.2.1. Mạch lọc diplexer

Mạch sau khi được hoàn thiện sẽ được đo các giá trị S-parameter bằng máy VNA E5080B

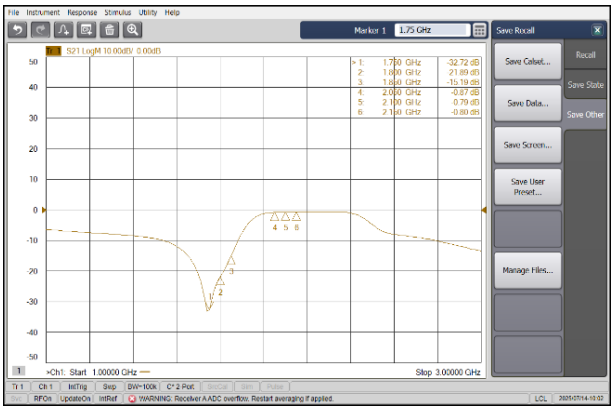


Hình 3.2: Hình ảnh đo mạch lọc diplexer

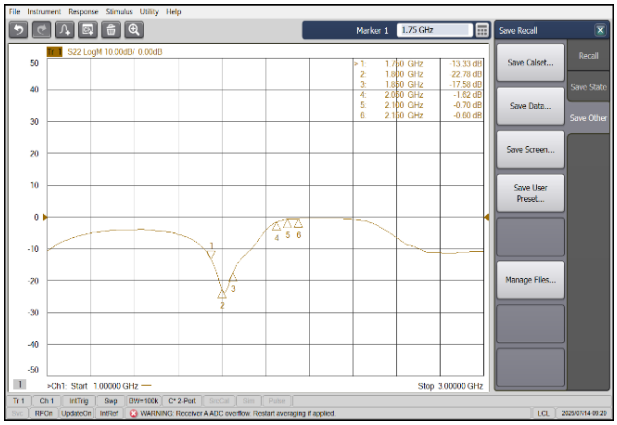
Kết quả đo các giá trị S-parameter:



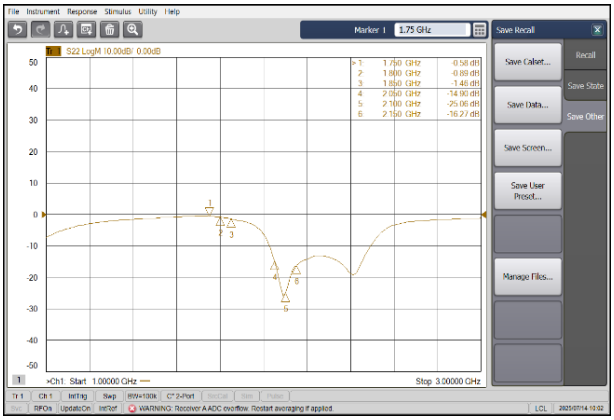
a) S-parameter S12



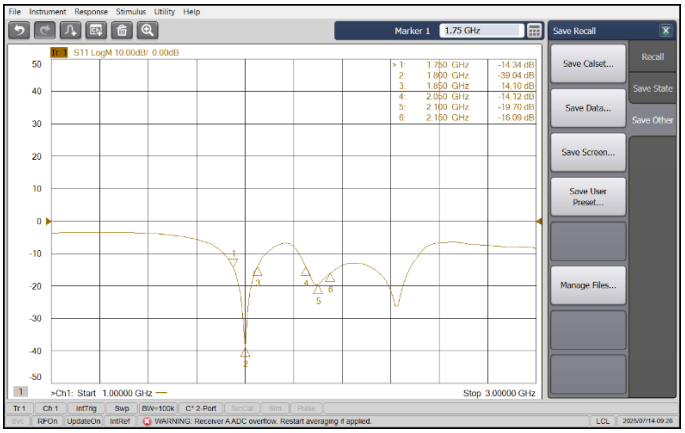
b) S-parameter S13



c) S-parameter S22



d) S-parameter S33

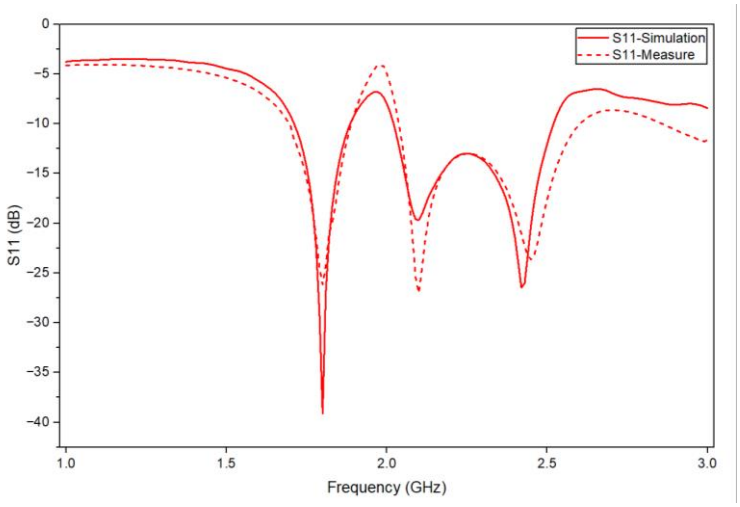


e) S-parameter S11

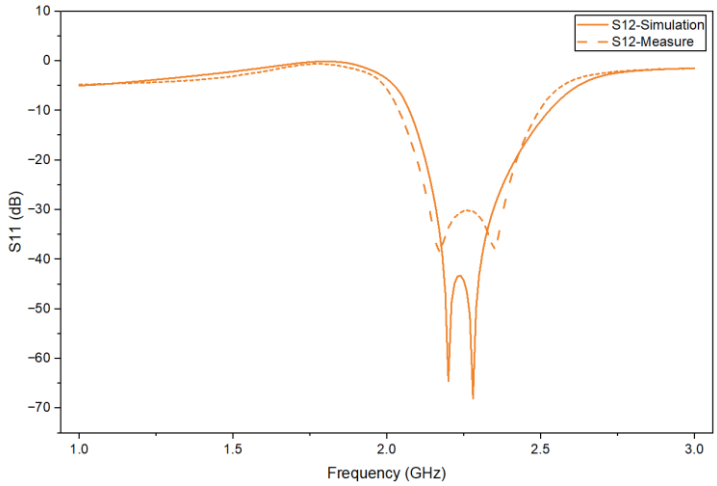
Hình 3.3: Các giá trị S-paramater đo thực tế

Bảng 3.1: Các giá trị S-parameter thực tế

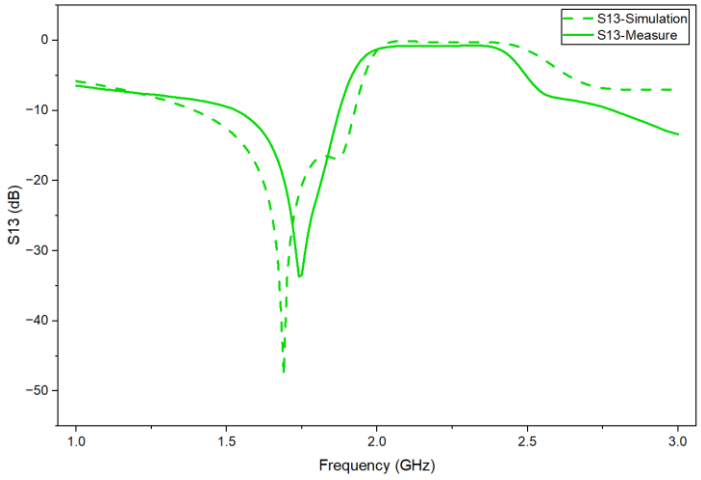
S-parameter	Tần số	Spec. (dB)	Giá trị (dB)	Pass/Fail
S11	1.8Ghz	≤ -14	-39.04	**Pass**
	2.1GHz	≤ -14	-19.7	**Pass**
S22	1.8Ghz	≤ -14	-22.78	**Pass**
S33	2.1GHz	≤ -14	-25.06	**Pass**
S12	1.8Ghz	≥ -1	-0.65	**Pass**
	2.1GHz	≤ -14	-20.42	**Pass**
S13	1.8Ghz	≤ -14	-21.89	**Pass**
	2.1GHz	≥ -1	-0.79	**Pass**



Hình 3.4: Đồ thị so sánh hệ số S11 mô phỏng và thực tế



Hình 3.5: Đồ thị so sánh hệ số S12 mô phỏng và thực tế



Hình 3.6: Đồ thị so sánh hệ số S13 mô phỏng và thực tế

Đường nét liền thể hiện kết quả mô phỏng trên phần mềm ADS, đường nét đứt là kết quả đo thực tế từ máy VNA.

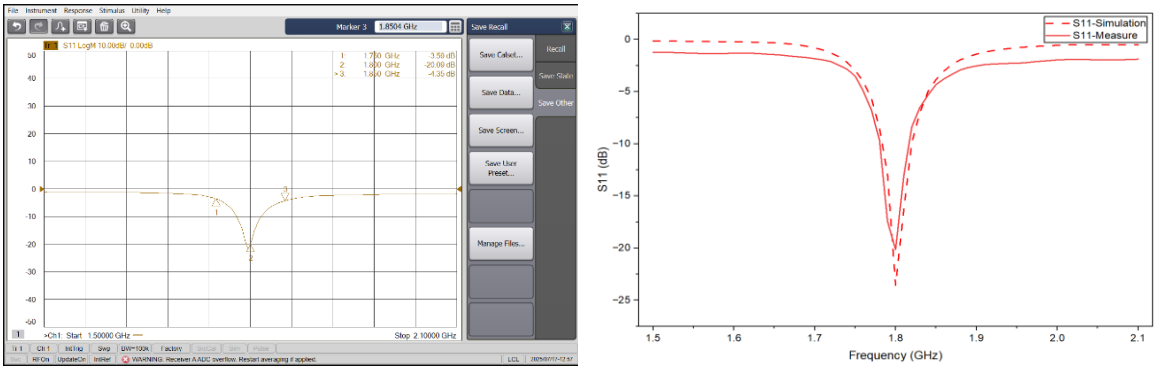
Kết quả cho thấy:

- Mạch có độ phản xạ nhỏ, mạch được phối hợp trở kháng tốt ở cả hai dải tần số 1.8GHz và 2.1GHz
- Các cổng có Return Loss ≤ -14 dB, đạt yêu cầu
- Độ cách ly giữa hai nhánh đầu ra cao
- Tổn hao chèn (Insertion loss) lớn hơn -1dB, cho thấy năng lượng truyền qua đạt hiệu suất cao
- Hiệu suất truyền tại port 2 (1.8GHz) là 86%; tại port 3 (2.1GHz) là 83%

➢ **Nhận xét:** Kết quả đo mạch thực tế cho kết quả khá tương đồng với mạch mô phỏng và đạt yêu cầu thiết kế đề ra.

3.2.2. Mạch chỉnh lưu 1.8GHz

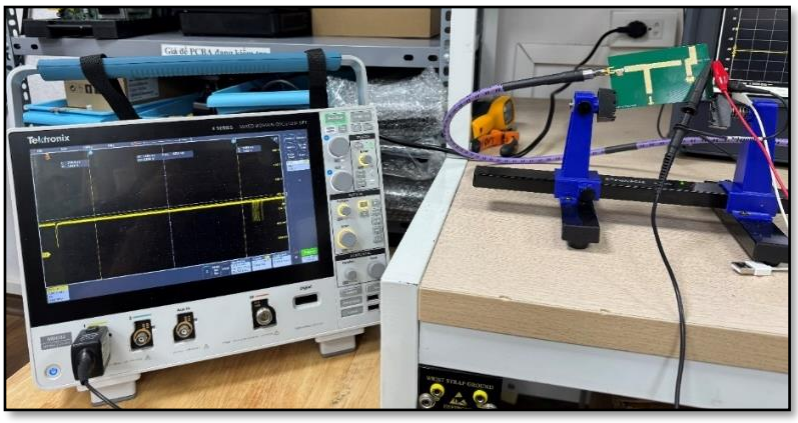
Sử dụng máy VNA E5080B để đo hệ số phản xạ đầu vào và cấp nguồn công suất đầu vào trong dải từ -10dBm đến 10dBm, sau đó tiến hành đo điện áp và dạng sóng đầu ra



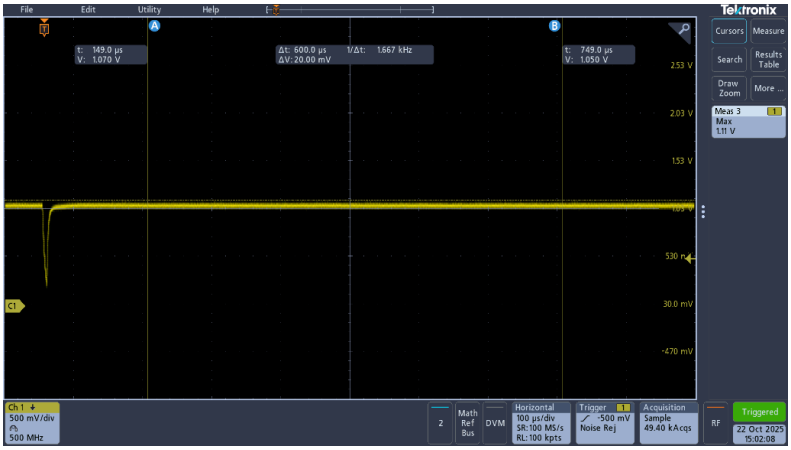
a) S-parameter S11 mạch chỉnh lưu 1.8GHz

b) So sánh hệ số S11 mạch mô phỏng và mạch thực tế

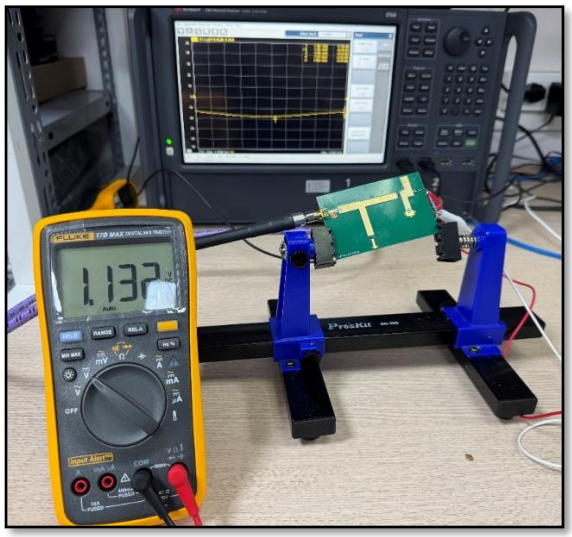
Hình 3.7: Hệ số phản xạ thực tế mạch chỉnh lưu 1.8GHz



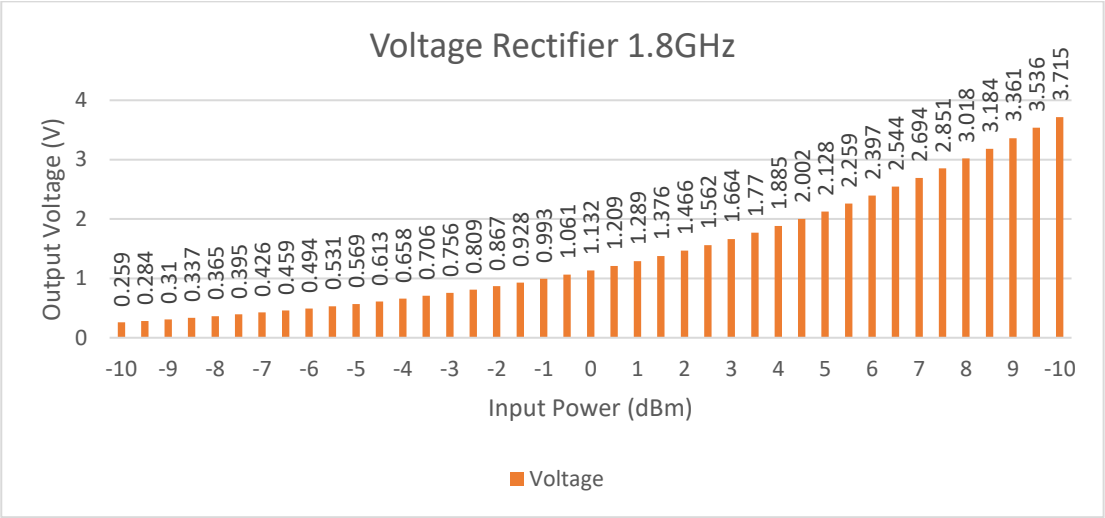
Hình 3.8: Đo dạng sóng đầu ra của mạch chỉnh lưu 1.8GHz tại Pin = 0dBm



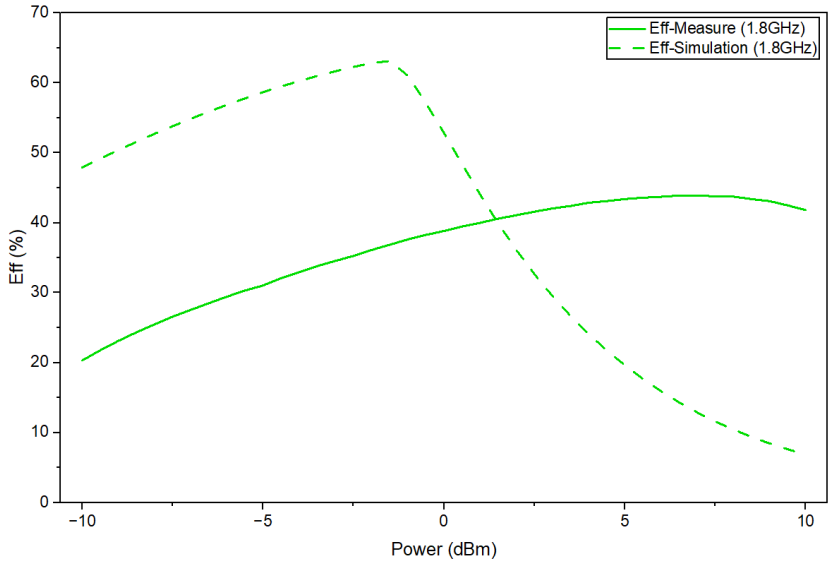
Hình 3.9: Dạng sóng điện áp đầu ra tại Pin = 0dBm



Hình 3.10: Đo điện áp mạch chỉnh lưu 1.8GHz tại Pin = 0dBm



Hình 3.11: Đồ thị điện áp đầu ra theo công suất đầu vào



Hình 3.12: Đồ thị so sánh hiệu suất mô phỏng và hiệu suất thực tế

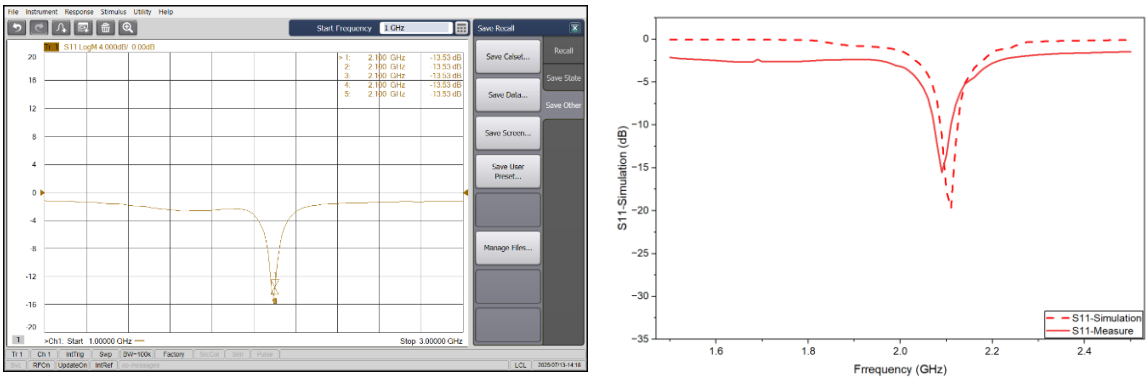
Kết quả cho thấy:

- Mạch có độ phản xạ nhỏ, phối hợp trở kháng tốt.
- Dạng sóng đầu ra ổn định
- Điện áp đầu ra đạt 0.569V tại -5dBm; 1.132V tại 0dBm; 2.128V tại 5dBm
- Hiệu suất thực tế đạt 31.02% tại -5dBm; 38.83% tại 0dBm; 43.39% tại 5dBm

➢ **Nhận xét:** Kết quả đo mạch thực tế cho kết quả khá tương đồng với mạch mô phỏng và đạt yêu cầu đặt ra của hệ thống. Hiệu suất thực tế và mô phỏng khác nhau khá nhiều do quá trình chế tạo mạch thủ công gặp nhiều vấn đề như hàn mạch, sai số của diode…

3.2.3. Mạch chỉnh lưu 2.1GHz

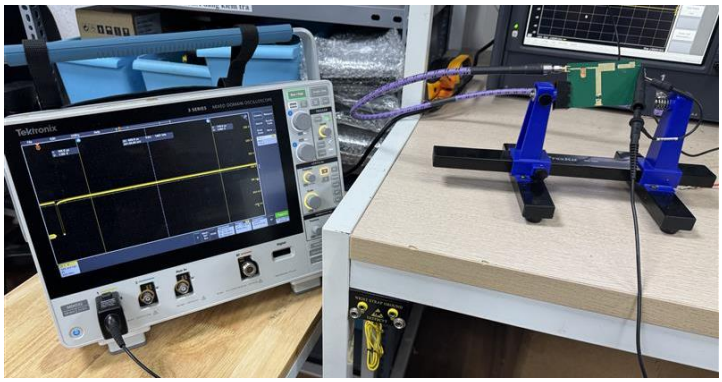
Sử dụng máy VNA E5080B để đo hệ số phản xạ đầu vào và cấp nguồn công suất đầu vào trong dải từ -10dBm đến 10dBm, sau đó tiến hành đo điện áp và dạng sóng đầu ra



a) S-parameter S11 mạch chỉnh lưu 2.1GHz

b) So sánh hệ số S11 mạch mô phỏng và mạch thực tế

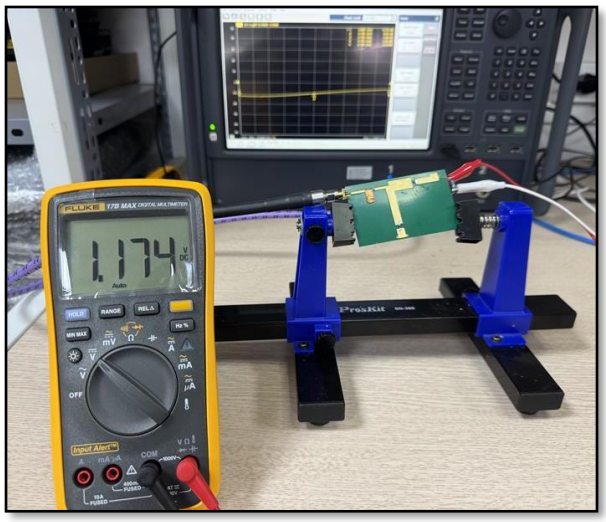
Hình 3.13: Hệ số phản xạ thực tế mạch chỉnh lưu 2.1Ghz



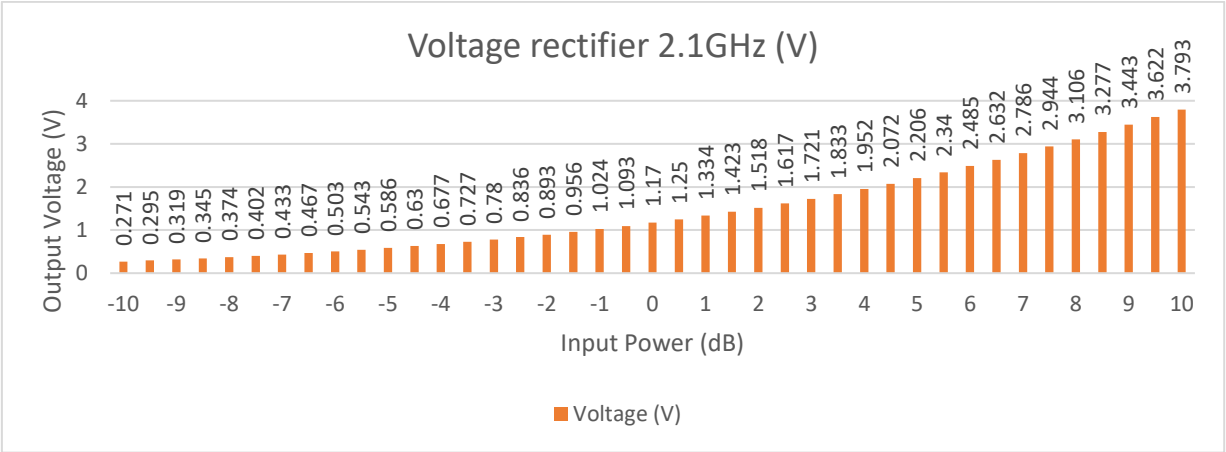
Hình 3.14: Đo dạng sóng đầu ra của mạch chỉnh lưu 2.1GHz tại Pin = 0dBm



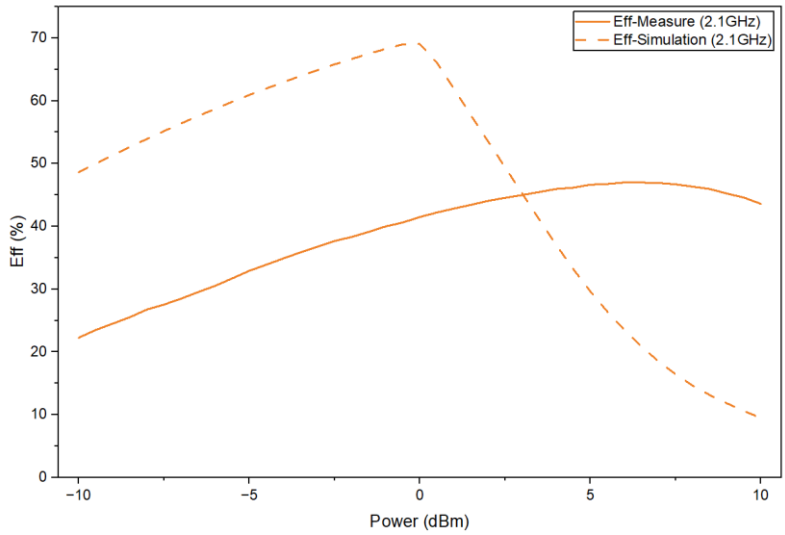
Hình 3.15: Dạng sóng điện áp đầu ra tại Pin = 0dBm



Hình 3.16: Đo điện áp mạch chỉnh lưu 2.1GHz tại Pin = 0dBm



Hình 3.17: Đồ thị điện áp đầu ra theo công suất đầu vào



Hình 3.18: Đồ thị so sánh hiệu suất mô phỏng và hiệu suất thực tế

Kết quả cho thấy:

- Mạch có độ phản xạ nhỏ, phối hợp trở kháng tốt. Kết quả thực tế khá tương đồng kết quả mô phỏng
- Dạng sóng đầu ra ổn định
- Điện áp đầu ra đạt 0.586V tại -5dBm; 1.17V tại 0dBm; 2.206V tại 5dBm
- Hiệu suất thực tế đạt 32.9% tại -5dBm; 41.48% tại 0dBm; 46.63% tại 5dBm

➢ **Nhận xét:** Kết quả đo mạch thực tế cho kết quả khá tương đồng với mạch mô phỏng và đạt yêu cầu đặt ra của hệ thống. Hiệu suất thực tế và mô phỏng khác nhau khá nhiều do quá trình chế tạo mạch thủ công gặp nhiều vấn đề như hàn mạch, sai số của diode…

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN TIẾP THEO

1. Kết luận

Đề tài "***Nghiên cứu, thiết kế bộ thu thập năng lượng sóng vô tuyến ứng dụng trong IoT***" đã hoàn thành các nội dung trong đề cương được phê duyệt. Đề tài đã đạt được một số kết quả chính như sau:

- Tìm hiểu về tiềm năng của năng lượng sóng điện từ có trong môi trường.
- Nắm được lý thuyết về bộ lọc và bộ chỉnh lưu cao tần.
- Tìm hiểu, nghiên cứu và thiết kế bộ thu thập năng lượng sóng điện từ với các thành phần bộ lọc và bộ chỉnh lưu.
- Thiết kế và chế tạo thành công mạch lọc diplexer và hai mạch chỉnh lưu hoạt động ở hai dải tần 1.8Ghz và 2.1GHz.

Kết quả đo thực tế của hệ thống khá tương đồng với kết quả mô phỏng, đạt mục tiêu thiết kế đề ra của hệ thống. Tuy nhiên, bộ thu thập năng lượng vẫn còn tồn tại một số nhược điểm do thời gian nghiên cứu, kinh nghiệm và kiến thức của học viên còn hạn chế.

Bộ thu thập năng lượng cần được cải thiện ở những vấn đề sau:

- Nâng cao hiệu suất chuyển đổi năng lượng. Hiện tại, hiệu suất đầu ra còn thấp hơn so với kết quả mô phỏng.
- Điện áp đầu ra thấp ở dải công suất đầu vào thấp, chưa đáp ứng được với nhiều dải điện áp khác nhau.
- Băng thông của các mạch chỉnh lưu còn khá hẹp (~40MHz).

2. Định hướng phát triển

Dựa theo ưu và nhược điểm của bộ thu thập năng lượng, hướng phát triển của đề tài có thể được đề xuất như sau:

- Tiếp tục cải thiện, điều chỉnh thiết kế mạch điện, các thành phần bộ lọc và bộ chỉnh lưu để tối ưu hiệu suất và điện áp đầu ra.
- Phát triển thiết kế hệ thống có thể hoạt động với nhiều băng tần khác như các băng tần WiFi.
- Bổ sung các khối lưu trữ (pin, siêu tụ…) cùng các phương pháp quản lý năng lượng để tăng tính khả thi khi đưa và hoạt động trong các ứng dụng thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] M. T. Le, Q. C. Tran, A. T. Le and D. Minh, "A Multidirectional Triple-Band Rectenna for Outdoor RF Energy Harvesting from GSM900/GSM1800/UMTS2100 Toward Self-Powered IoT Devices" *Progress In Electromagnetics Research M,* vol. 104, pp. 1-12, 2021.

[2] S. Shen, C.-Y. Chiu and R. D. Murch, "A Dual-Port Triple-Band L-Probe Microstrip Patch Rectenna for Ambient RF Energy Harvesting," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,* vol. 16, pp. 3071 - 3074, 2021.

[3] S. Shen, Y. Zhang, C.-Y. Chiu and R. Murch, "A Triple-Band High-Gain Multibeam Ambient RF Energy Harvesting System Utilizing Hybrid Combining," *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* vol. 67, no. 11, pp. 9215 - 9226, 2020.

[4] Z. Liu, Z. Zhong and Y.-X. Guo, "High-efficiency triple-band ambient RF energy harvesting for wireless body sensor network," *2014 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications,* 2015.

[5] N. Tung, "Multi-band ambient RF energy harvesting rectifier for autonomous Wireless Sensor networks," *2016 IEEE Region 10 Conference,* 2017.

[6] D. M. Pozar, Microwave Engineering, John Wiley & Sons, Inc., 2012.

[7] A. S. Andrenko, X. Lin and M. Zeng, "Outdoor RF spectral survey: A roadmap for ambient RF energy harvesting," *TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference,* 2015.

[8] H.Tafekirt, J.Pelegri-Sebastia, A.Bouajaj and B.M.Reda, "A Sensitive TripleBand Rectifier for Energy Harvesting Applications," *IEEE Access,* vol. 8, p. 73659–73664, 2020.

[9] Z. L. Su, B. W. Xu, S. Y. Zheng, H. W. Liu and Y. L. Long, "High-Isolation and Wide-Stopband SIW Diplexer Using Mixed Electric and Magnetic Coupling," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs,* vol. 67, no. 1, pp. 32-36, 2020.

[10] R. Gómez-García, J.-M. Muñoz-Ferreras, L. Yang and D. Psychogiou, "Contiguous-Channel Dual-Band Balanced Diplexer," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 29, no. 5, pp. 318-320, 2019.

[11] W. C. Brown, The History of Power Transmission by Radio Waves, vol. 32, 1984.

[12] M. J. L. Jia-Sheng Hong, Microstrip Filters for RF/Microwave Applications, New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001.