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

TÓM TẮT ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ

HÀ NỘI- NĂM 2025

Đề án tốt nghiệp được hoàn thành tại:

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Người hướng dẫn khoa học: TS. LÊ MINH TUẤN

(Ghi rõ học hàm, học vị)

Phản biện 1: ……

Phản biện 2: ……..

Đề án tốt nghiệp sẽ được bảo vệ trước Hội đồng chấm đề án tốt nghiệp thạc sĩ tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

Vào lúc: ..... giờ ..... ngày ..... tháng .... năm .....

Có thể tìm hiểu đề án tốt nghiệp tại:

- Thư viện của Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông.

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

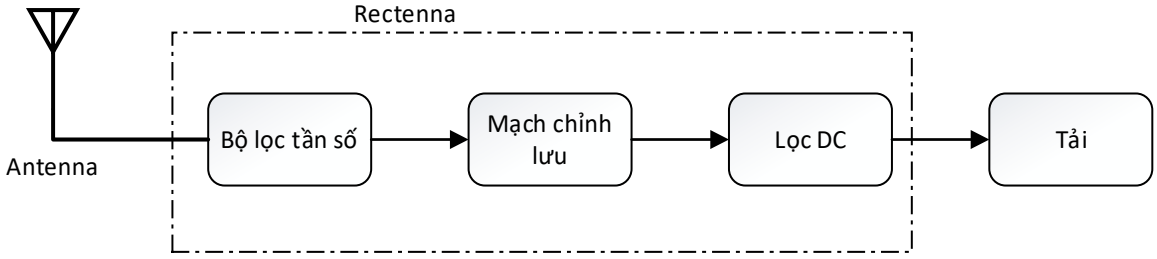
1.1 Tổng quan về thu thập năng lượng sóng vô tuyến

1.1.1 Các dạng năng lượng trong môi trường

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. 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). Chính vì lý do đó, đề tài sẽ tập trung vào việc khảo sát và thu hoạch 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

Bộ chuyển đổi năng lượng sóng điện từ, hay còn gọi là hệ thống thu hoạch 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 1.1: Sơ đồ hệ thống thu hoạch 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.
- **Rectenna**: 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**:
  - **Mạch chỉnh lưu (Rectifier)**:
  - **Lọc DC**:
- **Tải**: Đây là thành phần cuối cùng trong hệ thống sau khi năng lượng đã được chuyển đổi và thu hoạch. Ngoài ra năng lượng thu thập được có thể đưa vào các bộ lưu trữ, pin sạc.

1.1.3 Lịch sử ra đời

Lịch sử của công nghệ thu hoạch 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. 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. 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

Trong kỷ nguyên IoT phát triển mạnh, thu năng lượng RF (RFEH) trở thành công nghệ nền tảng giúp giải quyết nút thắt lớn nhất của IoT: vấn đề năng lượng. Khi số lượng thiết bị IoT tăng lên hàng tỷ, việc dùng pin truyền thống trở nên không bền vững do chi phí, bảo trì và tác động môi trường. RFEH khai thác năng lượng từ sóng RF sẵn có, giúp thiết bị tự chủ năng lượng, giảm hoặc loại bỏ nhu cầu dùng pin.

Công nghệ này mở ra các ứng dụng mới như cảm biến cấy ghép, hệ thống giám sát kết cấu dài hạn hay mạng cảm biến siêu nhỏ. Nó cũng giúp thu nhỏ thiết bị

do không cần pin và đóng góp vào một hệ sinh thái IoT xanh, bền vững hơn. Nhìn chung, RFEH không chỉ là nguồn cấp điện thay thế mà là yếu tố chiến lược thúc đẩy IoT phát triển rộng khắp, thông minh và bền vững.

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

Bảng 1.1: 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

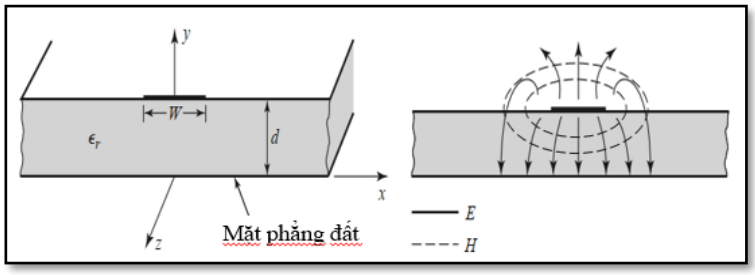
Dựa trên các cơ sở đã phân tích và so sánh, đề tài đề xuất thiết kế: Hệ thống sẽ tập trung vào hai băng tần 4G có mật độ năng lượng cao và ổn định nhất là LTE B3 (1.8GHz) và LTE B1 (2.1GHz). Để thực hiện điều này, một bộ lọc diplexer sẽ được thiết kế để tách hai băng tần này ra hai luồng xử lý riêng 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 hoạch 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

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). 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.



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

Hình 1.2: Cấu trúc đường truyền mạch dải [10]

1.3.2 Chất nền

Bảng 1.2: Bảng so sánh các thông số hai loại vật liệu

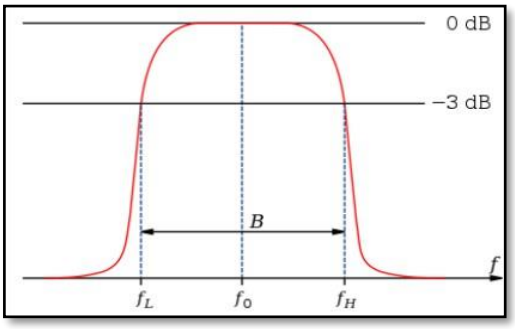
Đặc tính	FR4 (NP-140F)	Teflon (ZYF255DA)	Nhận xét
Hằng số điện môi (εr)	4.0 – 4.2 @ 1 GHz	2.55 ± 0.04 @ 10 GHz	Teflon có ε_r thấp hơn, giúp giảm kích thước mạch và suy hao pha
Hệ số tổn hao điện môi (tan δ)	0.012 – 0.014 @ 1 GHz	0.0018 @ 10 GHz	Teflon có tổn hao nhỏ hơn khoảng 7–10 lần so với FR4
Độ dẫn nhiệt (W/m·K)	≈ 0.25	0.25	Tương đương, nhưng Teflon ổn định hơn ở dải nhiệt cao
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

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

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.



Hình 1.3: Đặc tuyến biên độ thường áp dụng, gần với dạng chữ nhật lý tưởng

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

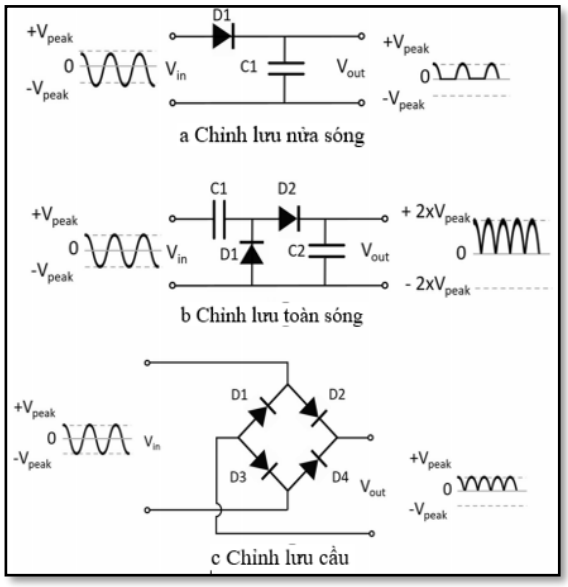
- **Tần số trung tâm (f_0)**
- **Băng thông (Bandwidth)**
- **Suy hao chèn (Insertion loss)**
- **Suy hao phản xạ (Return loss)**
- **Độ cách ly (Isolation)**
- **Khả năng chịu công suất (Power handling)**

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

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.

Cấu trúc liên kết cơ bản nhất của bộ chỉnh lưu là bộ chỉnh lưu nửa sóng bao gồm một diode D1 (Hình 1.44a). 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.



Hình 1.4: Các dạng mạch chỉnh lưu dùng diode

Thiết kế mạch của bộ chỉnh lưu toàn sóng được thể hiện trong Hình 1.4b. 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 1.44c).

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

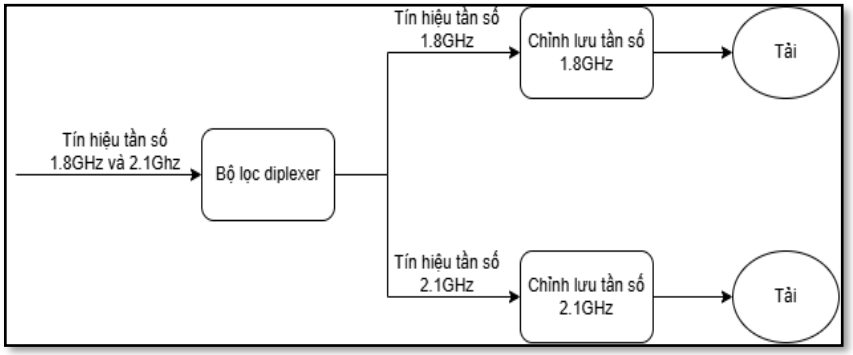
hoạt động trong khoảng 1.8–3.3V, và một số dòng MCU đặc biệt có thể hoạt động ở mức 0.8–1.2V. Từ đó có thể nhận thấy rằng việc khai thác và phục hồi năng lượng từ sóng điện từ sẵn có trong môi trường để duy trì hoạt động cho các nút cảm biến IoT hoàn toàn khả thi.

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 hoạch 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

2.1 Sơ đồ khối bộ thu thập năng lượng



Hình 2.1: Sơ đồ bộ thu hoạch 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. 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.

2.2 Xây dựng tính năng và thông số kỹ thuật

2.2.1 Thông số hệ thống

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

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

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

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 chọng các giải pháp lọc vô tuyến

2.3.1 Nguyên lý thu thập năng lượng

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.

Hiệu suất chuyển đổi nguồn RF - DC (PCE):

$$\eta_{pce} = \frac{P_{load}}{P_{retrived}} \quad (2.4)$$

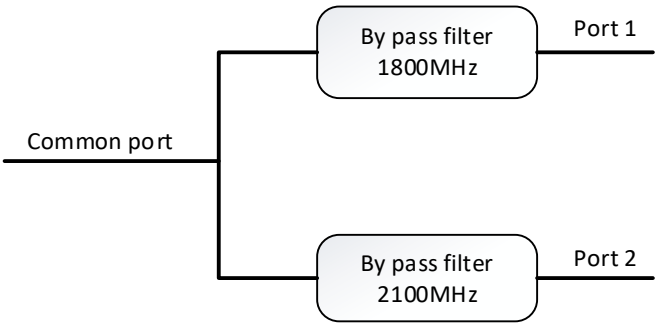
Hiệu quả chuyển đổi năng lượng RF-DC của mạch thu thập năng lượng RF là:

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{rf}} \quad (2.5)$$

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.

2.3.2 Mạch lọc 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.



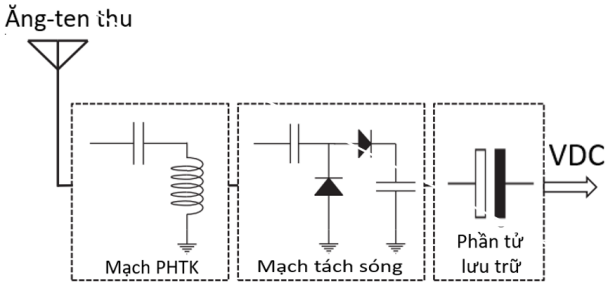
Hình 2.2: Sơ đồ cơ bản của bộ lọc Diplexer

Cấu tạo cốt lõi của một diplexer bao gồm:

- **Cổng chung (Common port)**
- **Bộ lọc thông thấp LPF**
- **Bộ lọc thông cao HPF**

Trong khuôn khổ của đề tài này, với mục tiêu thu hoạch 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



Hình 2.3: Cấu trúc của mạch thu thập năng lượng sóng vô tuyến

Chức năng của các phần tử như sau:

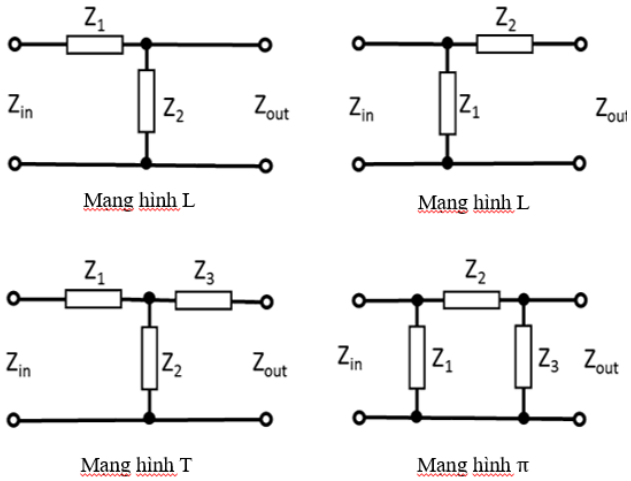
- Ăng ten thu nhận tín hiệu RF ngoài môi trường và truyền vào mạch tách sóng thông qua mạch phối hợp trở kháng.
- Mạch phối hợp trở kháng có nhiệm vụ phối hợp giữa trở kháng của ăng ten và trở kháng mạch tách sóng.
- Mạch tách sóng thức hiện quá trình chuyển đổi từ năng lượng sóng vô tuyến thành năng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

Có ba cấu hình mạch phối hợp trở kháng cơ bản là các mạch dạng L, T và π (hình 2.4). 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.

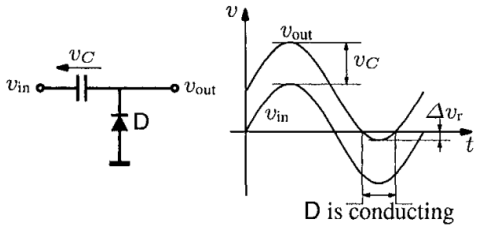


Hình 2.4: Các cấu hình mạng phối hợp trở kháng dải tần RF

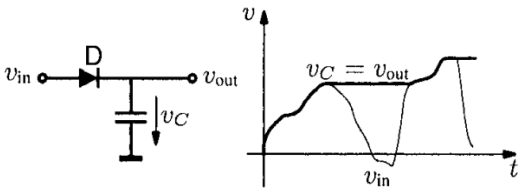
Các cấu hình dạng T và π phức tạp hơn mạch dạng L. Hơn nữa, việc tổ chức các cấu hình T và π thành nhiều giai đoạn thì trở kháng ra do mạng tạo ra sẽ là trở kháng của khớp cuối cùng, đồng thời sẽ làm thay đổi hệ số phẩm chất Q. Nhờ đó phương pháp này rất hữu ích trong việc cải thiện mức điện áp sau tách 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

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 2.5: Mạch ghim điện áp và dạng sóng đầu ra

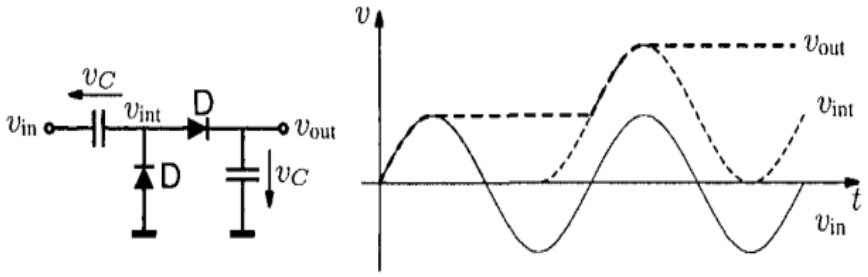


Hình 2.6: Mạch chỉnh lưu nửa sóng và dạng sóng đầu ra

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.

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.

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.

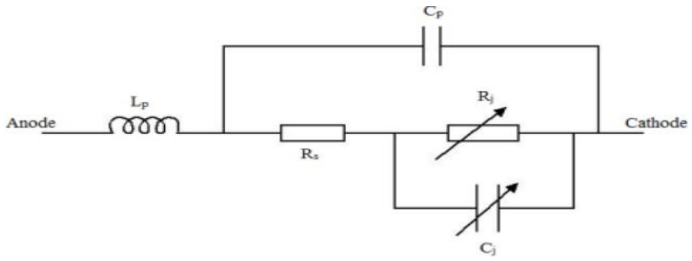


Hình 2.7: Mạch chỉnh lưu nhân đôi điện áp và dạng sóng đầu ra

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

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.



Hình 2.8: Sơ đồ tương đương của diode Schottky

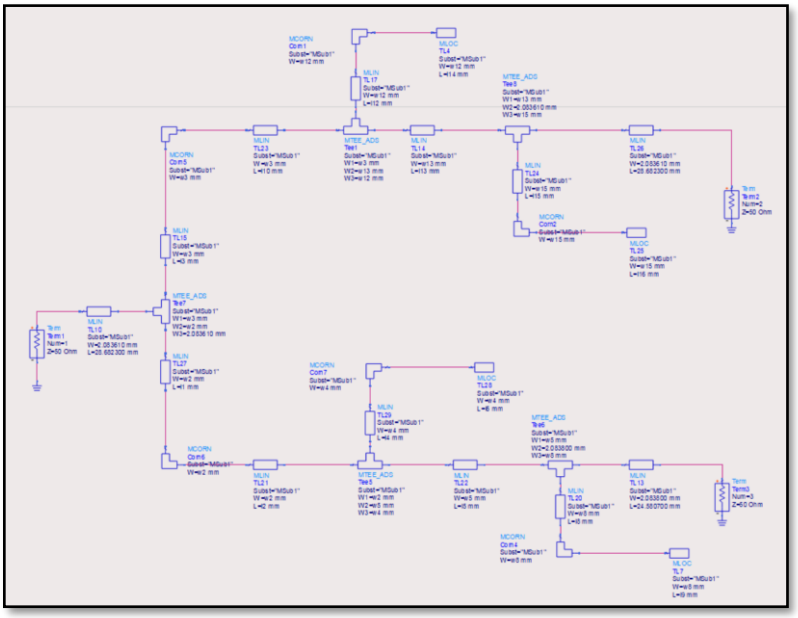
Bảng 2.6: Liệt kê so sánh một số loại Diode thường được sử dụng cho thiết kế

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.

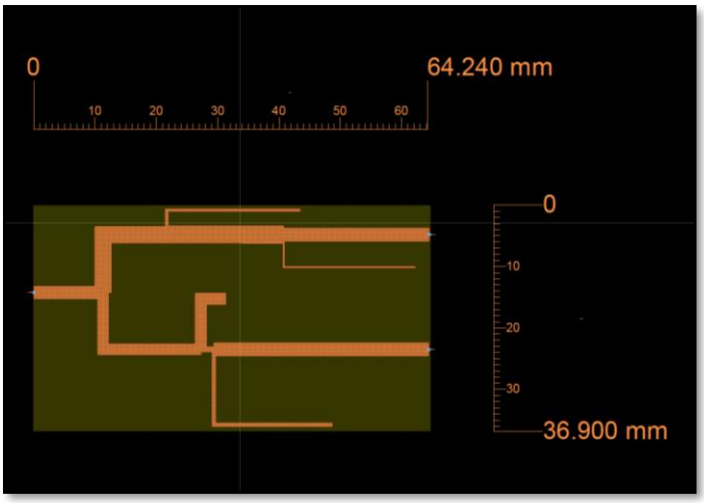
2.4 Thiết kế cấu trúc, mô phỏng mạch Diplexer

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 2.9: Sơ đồ nguyên lý mạch diplexer

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



Hình 2.2: Thiết kế layout mạch diplexer

Kích thước mạch đạt 64.24 x 36.9 mm

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.

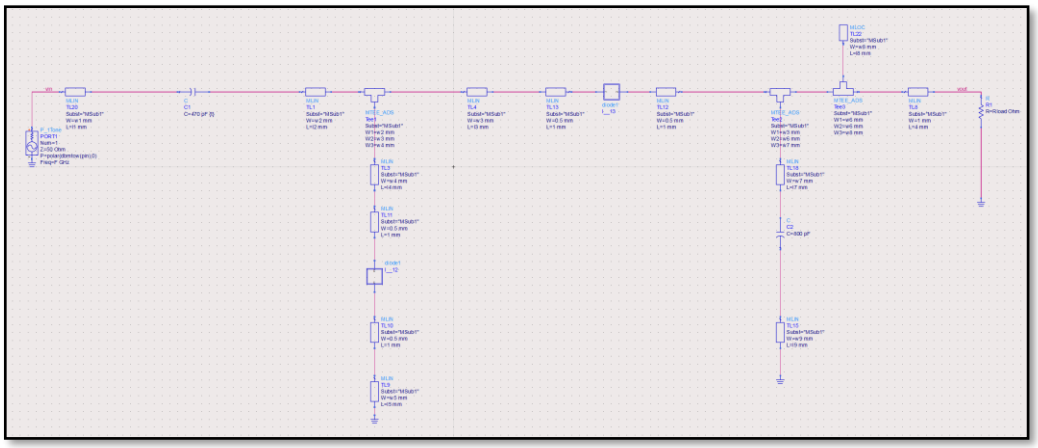
Hiệu suất truyền trong mạch mô phỏng tại port 2 (1.8GHz) là 96.6%; port 3 (2.1GHz) là 95.6%.

2.5 Thiết kế và mô phỏng mạch chỉnh lưu

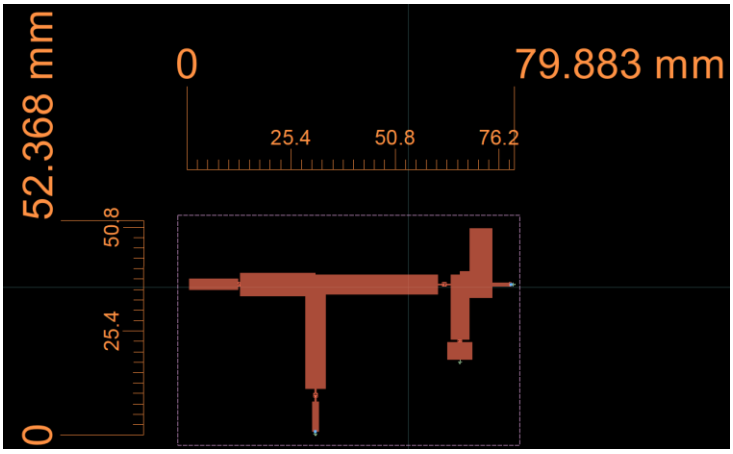
Mạch được mô phỏng sử dụng chất nền Teflon ZYF255DA có hằng số điện môi ε_r = 2.55, độ dày chất nền 0.76mm, độ dày đồng 0.035mm. Các linh kiện được sử dụng trong mạch như sau:

2.5.1 Mạch chỉnh lưu 1.8GHz

Mạch mô phỏng có cấu trúc như hình:



Hình 2.3: Sơ đồ nguyên lý mạch chỉnh lưu 1.8GHz



Hình 2.4: Thiết kế layout mạch chỉnh lưu 1.8GHz

Kích thước mạch 79.883 x 52.368 mm

Bảng 2.8: Các thông số mô phỏng mạch chỉnh lưu 1.8GHz

Thông số	Spec.	Value	Pass/Fail
S11	≤ -14 dB	-23.563 dB	**Pass**

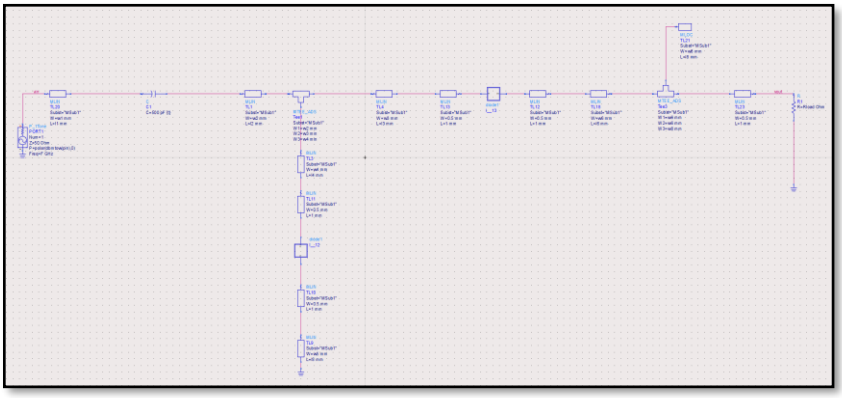
Hiệu suất (max)	≥ 30 %	69.297 %	**Pass**
Điện áp đầu ra (tại P_{in} 0dBm)	≥ 0.6 V	1.529 V	**Pass**

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.

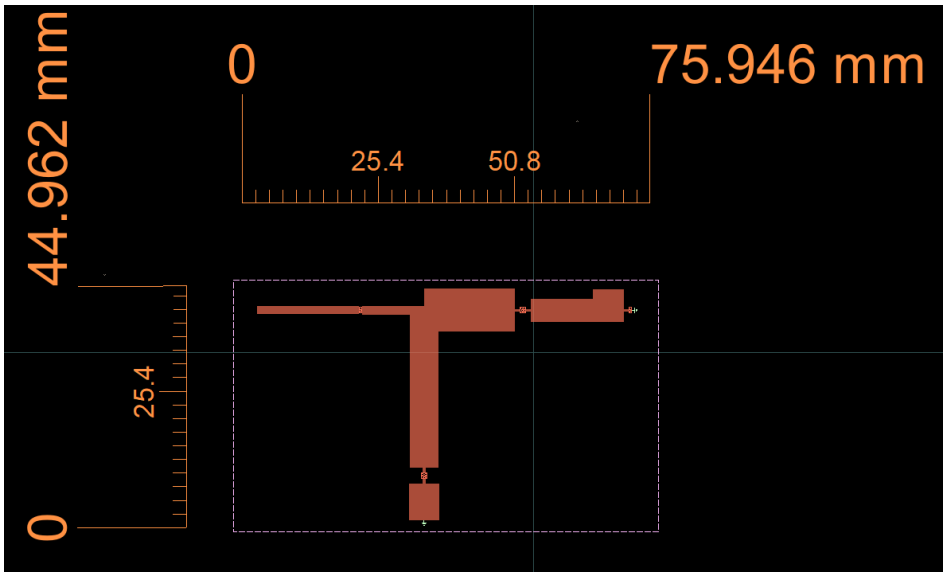
Mô phỏng cho thấy mạch thiết kế có các thông số đạt mục tiêu thiết kế đề ra. Có thể thực hiện bước chế tạo thử nghiệm tiếp theo.

2.5.2 Mạch chỉnh lưu 2.1GHz

Mạch mô phỏng có cấu trúc như hình 2.22:



Hình 2.5: Sơ đồ nguyên lý mạch chỉnh lưu 2.1GHz



Hình 2.6: Thiết kế layout mạch chỉnh lưu 2.1GHz

Kích thước mạch là 75.946 x 44.962 mm

Bảng 2.8: 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).

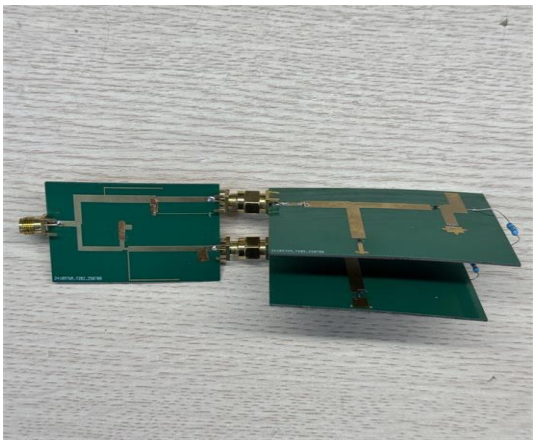
Kết quả mô phỏng cho thấy bộ lọc diplexer đạt được khả năng tách kênh tốt, độ cách ly cao và phối hợp trở kháng hiệu quả tại hai dải tần làm việc. Các mạch chỉnh lưu cũng cho hiệu suất chuyển đổi cao, điện áp đầu ra đạt yêu cầu thiết kế.

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

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.



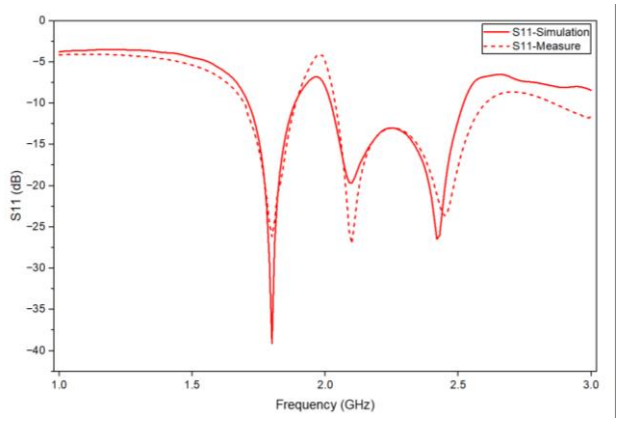
Hình 3.1: Hình ảnh thực tế các mạch thành phần cấu tạo nên bộ thu thập năng lượng hoàn chỉnh

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

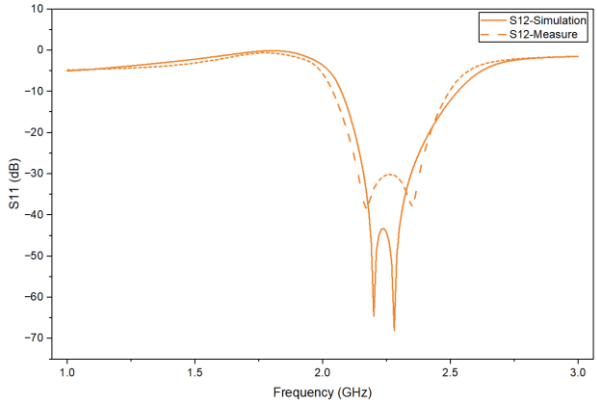
3.2.1 Mạch lọc diplexer

Bảng 3.1: Các giá trị S-parameter thực tế

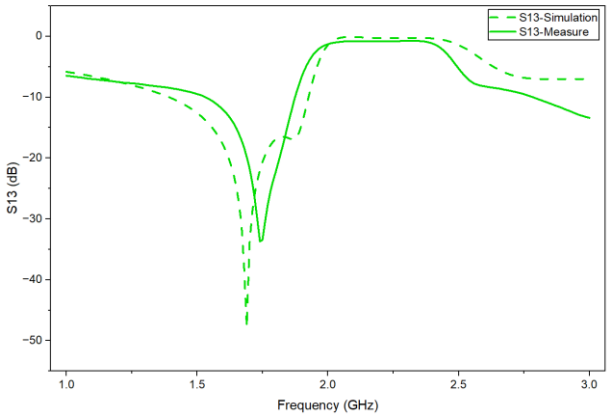
S-parameter	Tần số	Spec. (dB)	Giá trị (dB)	Pass/Fail
S11	1.8Ghz	≤ -14	-39.04	**Pass**
	2.1GHz	≤ -14	-19.7	**Pass**
S22	1.8Ghz	≤ -14	-22.78	**Pass**
S33	2.1GHz	≤ -14	-25.06	**Pass**
S12	1.8Ghz	≥ -1	-0.65	**Pass**
	2.1GHz	≤ -14	-20.42	**Pass**
S13	1.8Ghz	≤ -14	-21.89	**Pass**
	2.1GHz	≥ -1	-0.79	**Pass**



Hình 3.2: Đồ thị so sánh hệ số S11 mô phỏng và thực tế



Hình 3.3: Đồ thị so sánh hệ số S12 mô phỏng và thực tế



Hình 3.4: 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:

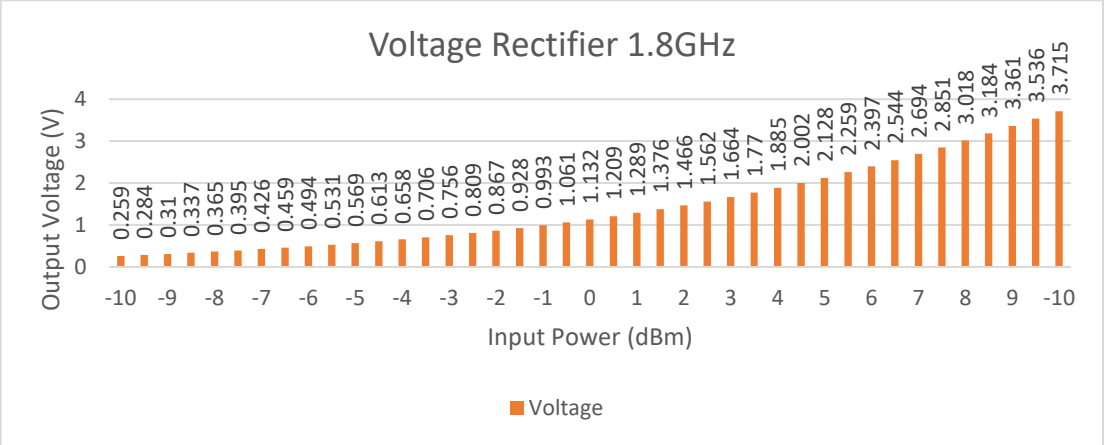
- Mạch có độ phản xạ nhỏ, mạch được phối hợp trở kháng tốt ở cả hai dải tần số 1.8GHz và 2.1GHz

- 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



Hình 3.5: Đồ thị điện áp đầu ra theo công suất đầu vào

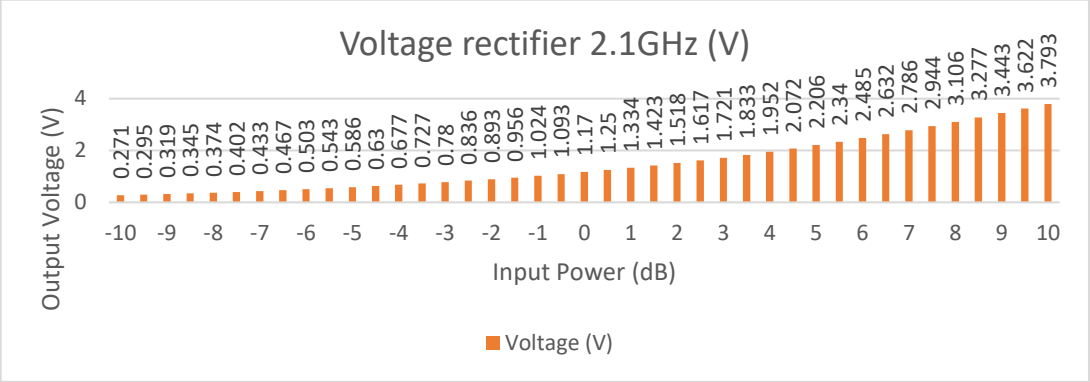
Kết quả cho thấy:

- 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.

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.



Hình 3.2: Đồ thị điện áp đầu ra theo công suất đầu vào

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.

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.