

Nghiên cứu chế tạo thử nghiệm hệ ăng ten thu phát băng thông siêu rộng cho các hệ thống thu phát làm việc trong môi trường công nghiệp

Development and experimental studies of ultra-wideband antennas for wireless transceivers employed in industrial environments

Đặng Anh Tuấn¹, Nguyễn Việt Hưng², Nguyễn Hồng Vũ¹, Lâm Hồng Thạch³, Dương Đức Anh¹

¹ Viện nghiên cứu Điện tử, Tin học, Tự động hóa

² Học viện công nghệ Bưu chính Viễn thông

³ Đại học Bách Khoa Hà Nội

*Email liên hệ: datuanitc@gmail.com

Abstract

In this paper, an ultra-wideband transceiver antenna system consisting of a TEM horn antenna for receiver and a triangle monopole antenna for transiver, has been studied and fabricated. These antennas are intergrated in circuit of a UWB sensor networks, applicable to wireless communication systems using ultra-wideband technology in industrial environments with special operating conditions. Simulation and measurement results have shown that the designs meet the requirements of the system. The antenna system has a wide operating bandwidth between 1GHz and 8GHz and offers high efficiency and great gain over the entire frequency band.

Keywords: UWB, TEM horn, monopole, wireless

Ký hiệu

| Kí hiệu | Đơn vị | Mô tả |
|---------|--------|----------------|
| G | dBi | Độ lợi ăng ten |
| S11 | dB | Hệ số phản xạ |

Từ viết tắt

| | |
|------|-----------------------------------|
| UWB | Ultra Wideband |
| TEM | Transverse Electromagnetic |
| PC | Personal Computer |
| FCC | Federal Communications Commission |
| FPGA | Field Programmable Gate Array |

Tóm tắt

Trong bài báo này, một hệ ăng ten thu phát băng siêu rộng bao gồm một ăng ten thu, là một cấu trúc thiết kế đề xuất mới ứng dụng cấu trúc ăng ten loa TEM, và ăng ten phát dạng chấn tử đơn tam giác, đã được nghiên cứu chế tạo thử nghiệm. Các ăng ten này đóng vai trò là ăng ten thu và phát của mạng cảm biến UWB, áp dụng cho hệ thống truyền tin không dây sử dụng công nghệ băng siêu rộng trong các môi trường công nghiệp với điều kiện hoạt động đặc biệt. Kết quả mô phỏng và đo lường đã cho thấy các thiết kế đáp ứng các yêu cầu của hệ thống. Hệ ăng ten đảm bảo yêu cầu về kích thước nhỏ gọn,

khả năng hoạt động trong môi trường đặc biệt, có băng thông hoạt động rộng trong khoảng từ 1GHz đến 8 GHz và có hiệu suất cao và giá trị tăng ích lớn (7-12 dBi với ăng ten thu và ~4dBi với ăng ten phát) trên toàn bộ dải tần.

1. Mở đầu

Giao tiếp tầm ngắn sử dụng các cảm biến không dây ứng dụng công nghệ truyền thông băng siêu rộng (UWB) đang là vấn đề nóng được nhiều nhà khoa học nghiên cứu phát triển trong những năm gần đây [1], [3]. Với các ứng dụng thương mại đang xuất hiện ngày càng nhiều, công nghệ này cũng chứng tỏ được khả năng ứng dụng trong truyền tin công nghiệp. Trong môi trường công nghiệp, đặc biệt tại những nơi chật hẹp, nhiều vật cản, nhiệt độ cao, không gian truyền có sự hiện diện của nhiễu phản xạ, nhiễu đa đường và sự giao thoa gây phading rất mạnh, khiến cho việc sử dụng hệ thống truyền thông sử dụng sóng mang băng hẹp truyền thống là không hiệu quả. Do đó, giải pháp sử dụng tín hiệu băng siêu rộng (UWB) đã được đề xuất. Mạng cảm biến sử dụng tín hiệu UWB được trình bày trong [2], [4], [5] chứng minh rằng hệ thống như vậy có nhiều ưu điểm hơn so với hệ thống băng hẹp.

Trong bài báo này, nhóm tác giả trình bày việc thiết kế thử nghiệm một hệ ăng ten thu phát tín hiệu băng siêu rộng cho hệ thống cảm biến không dây công nghiệp. Cụ thể, đối với

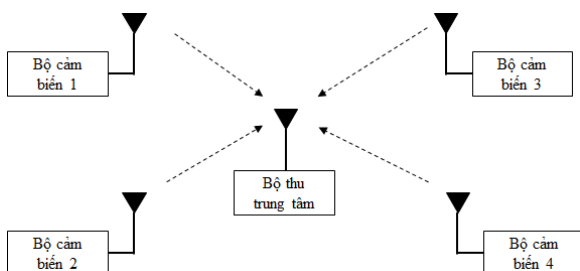
ăng ten thu, nhóm tác giả sử dụng thiết kế loa TEM (Transverse Electromagnetic) đặc biệt. Các ăng ten loa TEM đã được sử dụng làm ăng ten thu phát băng siêu rộng cho các ứng dụng khác nhau và rất thích hợp với mục tiêu nghiên cứu đặt ra. Ăng ten thu được đặt tại bộ thu trung tâm, thu nhận tất cả các tín hiệu gửi về của các bộ cảm biến không dây. Đối với ăng ten phát, nhóm tác giả sử dụng thiết kế ăng ten đơn cực dạng tam giác được cấp điện bằng dây dẫn sóng vi dải. Ưu điểm của loại ăng ten này là thiết kế nhỏ gọn mà vẫn đảm bảo băng thông cũng như hiệu suất hoạt động, do vậy nó được sử dụng để tích hợp vào mạch cảm biến gắn tại các điểm cần giám sát. Các loại ăng ten này đều có ưu điểm là băng rộng, không phân tán, độ định hướng cao và dễ dàng chế tạo.

Với mục đích đề cập ở trên, bài báo này sẽ được trình bày trong cấu trúc sau: Mô tả chung về hệ thống cảm biến không dây được trình bày trong phần 2. Các thiết kế ăng ten thu, phát cho hệ thống là trọng tâm chính của bài báo này cùng với các kết quả mô phỏng và thử nghiệm sẽ được trình bày trong phần 3. Phần cuối cùng là các ý kiến thảo luận.

2. Mô tả chung về hệ thống cảm biến không dây

Cấu trúc của mạng cảm biến không dây băng thông siêu rộng cho hệ thống giám sát động cơ đầu máy xe lửa được thể hiện trong Hình 1. Việc kết hợp các cảm biến thành nhiều nhóm dựa trên vị trí của chúng được tính toán cho phù hợp với thực tế.

Khối thiết bị điều khiển (Control Unit) bao gồm ăng ten thu, bộ thu UWB và PC.



Hình 1: Kiến trúc hệ thống cảm biến không dây sử dụng công nghệ UWB

Trong triển khai thực tế, bộ thu trung tâm sẽ được đặt ở phía đầu của buồng máy và hướng về phía động cơ. Các bộ cảm biến sẽ được đặt tại các vị trí thích hợp trên bề mặt động cơ.

2.1. Bộ cảm biến

Hệ thống thử nghiệm bao gồm 4 bộ cảm biến nhằm thu thập các dữ liệu cần thiết như nhiệt độ, độ ẩm, áp suất và các thông số công nghiệp khác. Vi điều khiển xử lý dữ liệu thành các khung liên kết dữ liệu biểu mẫu và các gói lớp vật lý. Sau đó các gói lớp vật lý này sẽ được truyền tới bộ tạo xung UWB và phát tín hiệu tới bộ thu bởi ăng ten phát.

2.2. Bộ thu trung tâm

Bộ thu bao gồm bộ khuếch đại tạp âm thấp (Low-Noise Amplifier - LNA), khối phát hiện năng lượng (Energy Detector - ED), D-trigger và FPGA. Tín hiệu nhận được từ ăng ten thu sau khi được khuếch đại sẽ được so sánh với mức tham chiếu

ngưỡng bằng cách sử dụng bộ so sánh tương tự tốc độ cao trong khối «ED». Khối D-trigger sau đó tạo thành các xung hình chữ nhật cho FPGA xử lý. Bộ thu và ăng ten thu thường có kích thước lớn so với bộ phát và ăng ten phát. Kích thước ăng ten lớn cho phép ăng ten thu tăng được độ lợi và băng thông lên đáng kể.

2.3. Yêu cầu kỹ thuật đối với các ăng ten thiết kế

Theo các yêu cầu phân tích của hệ thống, hệ ăng ten cho các thiết bị thu và phát của hệ thống cần đạt một số chỉ tiêu nhằm đảm bảo hiệu suất chung của hệ thống trong môi trường công nghiệp với điều kiện kênh truyền phức tạp.

Cụ thể ăng ten phát cần đạt được các chỉ tiêu kỹ thuật như sau:

- Băng tần hoạt động từ 1GHz đến 8GHz.
- Mỏng nhẹ với kích thước tổng thể không quá 5cm.
- Có khả năng chịu nhiệt cao (lên đến 100°C).
- Bức xạ đẳng hướng.
- Hệ số khuếch đại và hiệu suất bức xạ tương đối cao trên toàn băng.
- Phối hợp trở kháng tốt trên toàn bộ dải tần hoạt động.
- Không yêu cầu sử dụng thiết bị cân bằng và phối hợp riêng biệt.

Ăng ten thu cần đạt được các chỉ tiêu kỹ thuật như sau:

- Băng tần hoạt động từ 1GHz đến 8GHz.
- Kích thước tổng thể (đường kính của đường cầu ngoại tiếp ăng ten) không quá 10-15 cm.
- Định hướng với độ lợi cao.
- Không bị phân tán pha.
- Phối hợp trở kháng tốt trên toàn bộ dải tần hoạt động.
- Không yêu cầu sử dụng thiết bị cân bằng và phối hợp riêng biệt.

Từ các yêu cầu kỹ thuật này, các đề xuất thiết kế ăng ten thu và phát sẽ được trình bày trong phần tiếp theo.

3. Thiết kế chế tạo hệ ăng ten

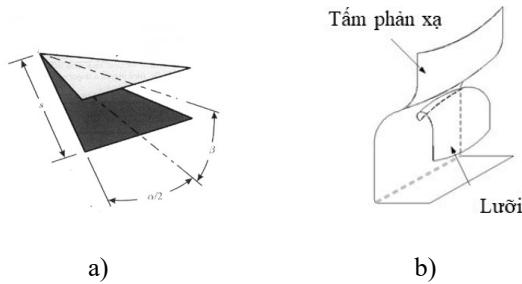
3.1. Thiết kế chế tạo hệ ăng ten

3.1.1. Ăng ten thu

Để thiết kế ăng ten thu cho hệ thống, nhóm tác giả đã tiếp cận và tham khảo mẫu thiết kế dựa trên một phiên bản ăng ten loa TEM cổ điển được trình bày tại [6], [7] theo kết quả trong tài liệu, cho thấy ăng ten có băng thông cực lớn và độ lợi cao mặc dù kích thước khá nhỏ của nó (Hình 2a). Trong [6] trình bày một phương pháp thiết kế mới cho một ăng ten TEM được đề xuất trên cơ sở lý thuyết ống dẫn sóng song song. Ăng ten TEM có hình dạng tam giác này có cấu trúc giảm dần tuyến tính để tăng băng thông phù hợp. Một ăng ten băng rộng mở rộng theo cấp số mũ theo chiều dọc và có một balun được thiết kế trong [8]. Balun được sử dụng để cải thiện đặc tính trở kháng của ăng ten TEM. Ăng ten được thiết kế có thể được sử dụng không chỉ cho các phép đo EMC, mà còn cho các hệ thống truyền thông băng thông rộng. Các công thức phân tích và thiết kế được trình bày trong [9], dựa trên ánh xạ bảo giác (Conformal Mapping), tính toán trở kháng đặc trưng của ăng ten loa TEM. Ngoài ra một số thiết kế cải tiến khác cũng được đề xuất trong các công trình [10-13].

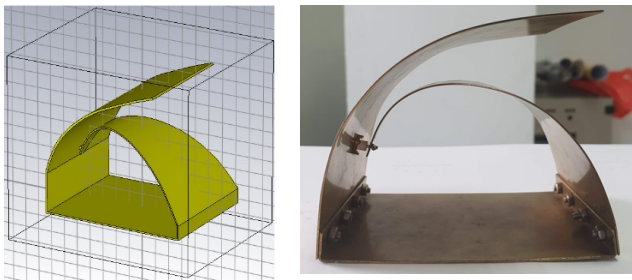
Trong [10], Boryssenکو và các cộng sự đề xuất một thiết kế dựa trên một loại ăng ten có độ phân tán thấp có mặt phát xạ

xung UWB khác biệt so với các bộ phát xạ UWB đã biết. Ăng ten này được hình thành bởi hai tấm kim loại song song dần dần tách ra theo hai hướng ngược nhau đóng vai trò là mặt phản xạ (Reflector), mặt phát xung nằm ở giữa được gọi là "Lưỡi" đóng vai trò là mặt phát xạ, (Hình 2b).



Hình 2: Ăng ten loa TEM cổ điển a) và Ăng ten loa "Lưỡi" TEM b).

Thiết kế ăng ten này sử dụng nguyên lý của một mặt bức xạ băng rộng, nó hoạt động như một bộ chuyển đổi được phối hợp trở kháng tốt trên băng rộng, để dòng kích thích tại cổng chuyển thành trường bức xạ tại mặt mở của ăng ten và tạo ra năng lượng bức xạ trong không gian theo một mật độ mong muốn. Bộ chuyển đổi này được tạo ra bởi hai tấm phẳng dạng tam giác có đáy mở rộng dần, có cấu trúc hình học thích hợp. Cụ thể, tấm thứ nhất, kích thước lớn hơn, được gọi là "tấm phản xạ". Tấm thứ hai, kích thước nhỏ hơn, được gọi là "lưỡi", và là bộ phận bức xạ sóng điện từ.



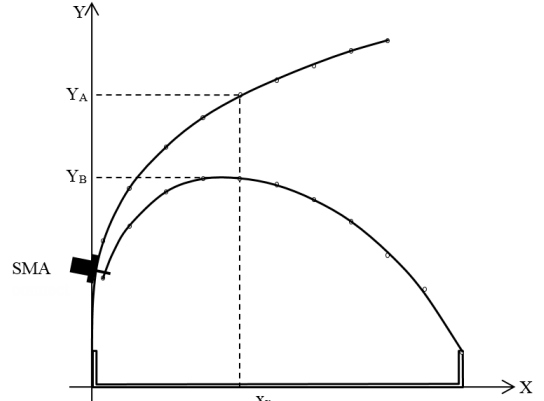
Hình 3: Mô hình mô phỏng a) và hình ảnh chế tạo thực tế b)

Trong bài báo này, thiết kế nhóm tác giả đề xuất nối ngắn mạch tấm lưỡi xuống mặt đế, đây là giải pháp để thu nhỏ kích thước ăng ten mà vẫn đảm bảo được các yêu tố hiệu năng như băng thông và độ lợi. Ngoài ra thiết kế này cũng giúp kết cấu ăng ten vững chắc hơn do tấm lưỡi được giữ cố định. Việc cấp điện cho ăng ten được thể hiện trong Hình 3 trong đó đầu nối cáp đồng trục UHF 50-Ω được gắn từ mặt sau của nó, mặt đế được hàn với tấm phản xạ, và đầu trục của cáp được nối với tấm bức xạ.

Kích thước tổng thể của ăng ten là 140 x 80 x 100mm (Dài x Rộng x Cao). Ăng ten được chế tạo từ vật liệu đồng thau có độ dày 1mm. Kích thước đường cong tối ưu được thể hiện trong Hình 4. Một số lưu ý trong quá trình thiết kế ăng ten thu như sau:

- Tấm phản xạ tấm phát xạ được gắn cố định ở bên ngoài vào mặt đế bằng các vít và đai ốc M3 (8 chiếc).
- Đầu dây nối trung tâm được đưa vào lỗ ở cuối của tấm phát xạ và đóng kín ở phía bên kia. Khoảng cách giữa tấm phát xạ và tấm phản xạ trong khu vực kết nối của đầu nối nên là 2 - 3 mm và được điều chỉnh tối ưu trong quá trình mô phỏng và đo đạc thực tế.

Hình dạng của các đường cong của tấm phản xạ và tấm phát xạ được chọn dựa trên các kết quả kinh nghiệm.



| | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| k | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| X _k , MM | 0 | 3 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| Y _A , MM | 0 | 40 | 54 | 65 | 73 | 79 | 83 | 87 | 91 | 94 | - | - |
| Y _B , MM | - | 30 | 44 | 53 | 57 | 57 | 55 | 51 | 45 | 36 | 27 | 10 |

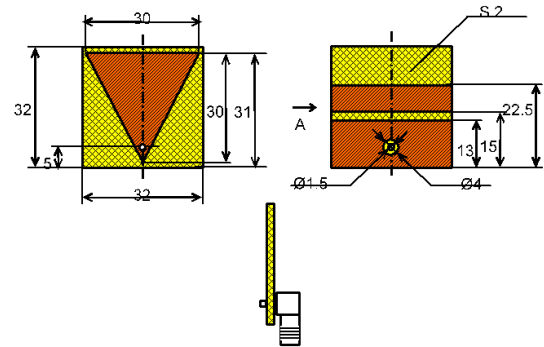
Hình 4: Kích thước tối ưu của các tham số đường cong của tấm phản xạ và phát xạ

3.1.2. Ăng ten phát

Do yêu cầu về kích thước nhỏ gọn, cấu trúc đơn giản và có khả năng tích hợp với mạch của các bộ cảm biến, công nghệ vi dai được lựa chọn để chế tạo ăng ten phát. Môi trường hoạt động công nghiệp có tính khắc nghiệt cao với nhiệt độ có thể lên tới trên 100 độ C. Để ăng ten hoạt động ổn định trong điều kiện nhiệt độ cao, vật liệu chế tạo mạch in cho hệ thống nói chung và ăng ten nói riêng cần phải lựa chọn loại riêng biệt. Tiêu biểu có thể kể đến vật liệu TMM4 do Rogers sản xuất, đây là vật liệu chuyên dụng cho các ứng dụng sóng điện từ hoạt động trong điều kiện nhiệt độ khắc nghiệt (Thermoset Microwave Materials – TMM) [14]. Chi tiết các giá trị tham số của vật liệu TMM4 được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1: Chi tiết các tham số của vật liệu Rogers TMM4

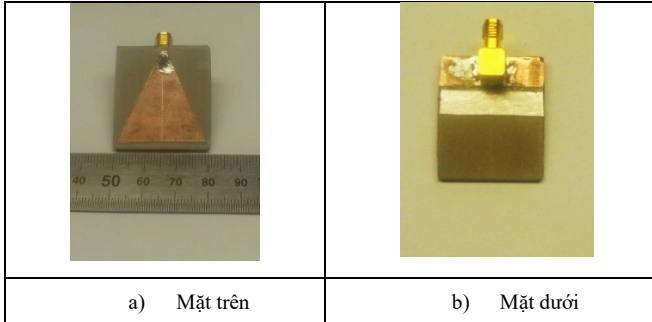
| Tham số | Giá trị |
|--|---------------------------------------|
| Độ dẫn nhiệt (Thermal Conductivity) | 0.70 W/m/K |
| Hằng số điện môi ϵ_r | 4.50 |
| Hệ số nhiệt của ϵ_r (Trong dải -55 đến 125°C) | 14 ppm/K |
| Hệ số nở nhiệt (Trong dải 0 đến 140°C) | 16 (Theo trục X, Y), 21 (Theo trục Z) |
| Độ dày | 1.524mm |



Hình 5: Kích thước thiết kế của ăng ten phát

Thiết kế được sử dụng cho ăng ten phát là một ăng ten đơn cực dạng tam giác được in trên một đế điện môi. Phần tử bức xạ của ăng ten được in trên một mặt của đế điện môi và được

tiếp điện bởi một đường tiếp điện vi dài 50 Ω. Không giống như ăng ten vi dài thông thường, phần mặt đế không được che phủ hoàn toàn bởi lớp kim loại mà được sửa đổi để mở rộng băng thông. Qua quá trình hiệu chỉnh các kích thước của ăng ten trên phần mềm thiết kế và mô phỏng nhằm đạt được các yêu cầu đã đặt ra, mẫu ăng ten cuối cùng có kích thước được mô tả trong Hình 5.



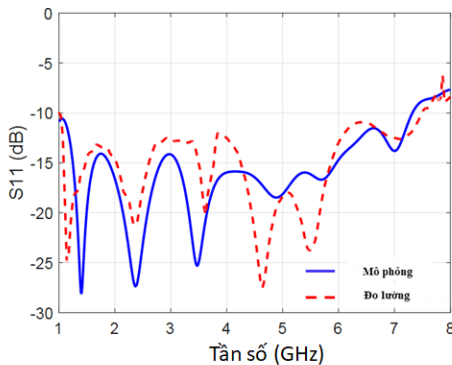
Hình 6: Mẫu chế tạo thử nghiệm ăng ten phát

3.2. Kết quả mô phỏng và đo thực nghiệm các mẫu ăng ten

Trong bài báo này, việc mô phỏng và tinh chỉnh thông số ăng ten thu được thực hiện trên phần mềm CST, việc đo kiểm chất lượng ăng ten được thực hiện trên máy PNA-L- Network Analyser N5234 A-10 Mhz- 43.5 GHz của hãng Keysight và phòng âm (buồng không phản xạ Anechoic Chamber).

3.2.1. Ăng ten thu

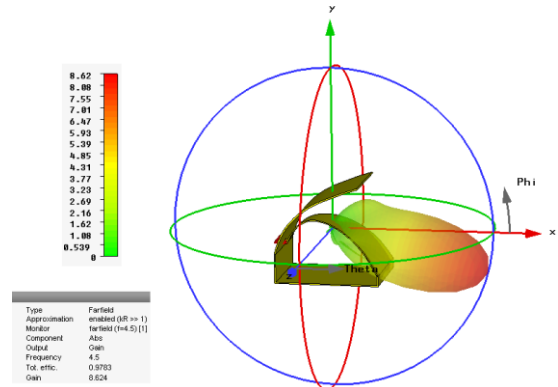
Kết quả mô phỏng và đo lường được trình bày trong Hình 7, Hình 8 và Hình 9 cho thấy sự tương ứng tốt giữa mô phỏng và chế tạo thực thể. Ăng ten có băng tần hoạt động siêu rộng với hệ số S11 đo được nhỏ hơn -10dB trong dải từ 1GHz đến 7.5 GHz. Trong băng tần gần 8GHz, S11 đạt xấp xỉ -8dB, giá trị này có thể coi là vẫn chấp nhận được đối với các thiết bị hoạt động trong môi trường công nghiệp.



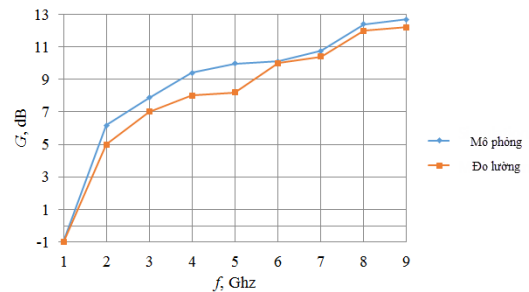
Hình 7: Kết quả mô phỏng và đo thực tế tham số S11 của ăng ten thu

Kết quả mô phỏng trong Hình 8 cho thấy, trong mặt phẳng đứng, hướng của cực đại của bức xạ chính thay đổi theo tần số. Tuy nhiên, trong khoảng 3-6 GHz những thay đổi này là không đáng kể và tối đa không vượt quá giới hạn của khu vực từ 10 đến 15 độ theo góc φ (đồ thị hơi nghiêng xuống dưới). Mô phỏng bức xạ của ăng ten cũng cho thấy hiệu suất rất tốt là 97% và đạt được độ lợi cao (từ 7-12 dBi ở tần số 3GHz và các tần số cao hơn). Các giá trị thực tế đo kiểm thấp hơn một chút so với kết quả mô phỏng như trong Hình 9. Tuy nhiên,

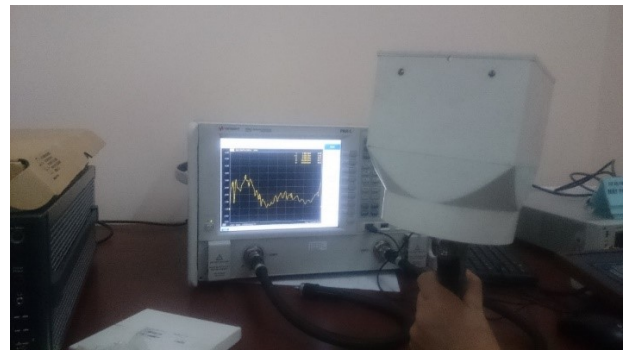
vẫn đạt được yêu cầu thiết kế trong thực tế với hệ số khuếch đại trong khoảng từ 3-8GHz luôn đạt trên 7dBi. Với thiết kế hệ thống đặt bộ thu cách vị trí đặt của các khối cảm biến trên 10m, độ rộng búp sóng của ăng ten (20°), và hệ số khuếch đại nhận được đảm bảo bộ thu có thể thu được tất cả tín hiệu từ các khối bộ cảm biến.



Hình 8: Đồ thị bức xạ của ăng ten thu tại tần số 3,5 GHz



Hình 9: Độ lợi của ăng ten thu



Hình 10: Đo hệ số phản xạ S11 của ăng ten thu

Kết quả đo kiểm của ăng ten thu được so sánh với các kết quả công bố trong Bảng 2

Bảng 2: So sánh kết quả với các nghiên cứu tương đương

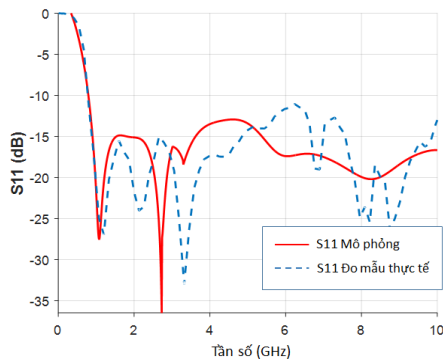
| Tham số | [10] | [13] | [7] | Đề xuất |
|---------------------------------------|-----------|--------------|-----------------|----------------|
| Kích thước (mm) (rộng x cao x dài) | 30x80x70 | 74x74 x60 | 240x360 x460 | 80x100 x140 |
| Băng thông | 2 – 8 GHz | 2 - 14 GHz | 0.28 - 1.75 GHz | 1 – 8GHz |

| | | | | |
|-----------------------------------|--------|--------|------|--------|
| Độ lợi tại tần số trung tâm (dBi) | 0 | 10 | 10 | 9 |
| Độ lợi toàn băng (dBi) | -2 - 0 | 4 - 12 | 3-12 | 1 - 13 |

Kết quả thể hiện trong bảng 2 cho thấy, mẫu ăng ten thu đề xuất có kích thước nhỏ gọn và thu được băng thông tương đối và độ lợi tốt, tương đương với các nghiên cứu liên quan. Với băng thông tương đối ~ 200% và độ lợi xung quanh tần số trung tâm ~ 9dBi. So sánh với mẫu ăng ten trong [10], thiết kế gốc mà thiết kế bài báo này đề xuất dựa vào để phát triển. Kích thước của ăng ten đề xuất nhỏ hơn (0.46λ so với 0.53λ tại tần số thấp nhất). Bên cạnh đó, độ lợi của ăng ten đề xuất trong bài báo tăng đáng kể so với thiết kế gốc (9 dBi so với 0 dBi). Bên cạnh đó các kết quả này hoàn toàn có thể có thể được cải thiện thông qua việc thực hiện tối ưu các kích thước của ăng ten cũng như áp dụng các kỹ thuật cải thiện hiệu suất.

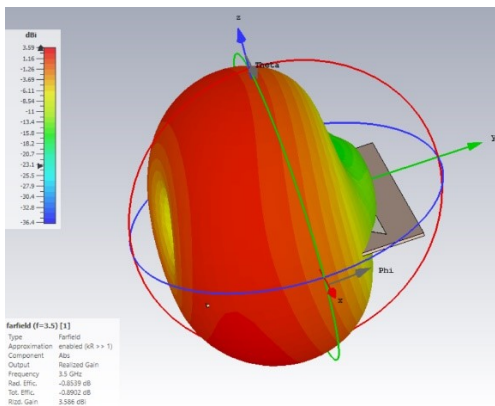
3.2.2. Ăng ten phát

Kết quả mô phỏng và mẫu đo thực tế băng tần làm việc của ăng ten được thể hiện trong Hình 11.

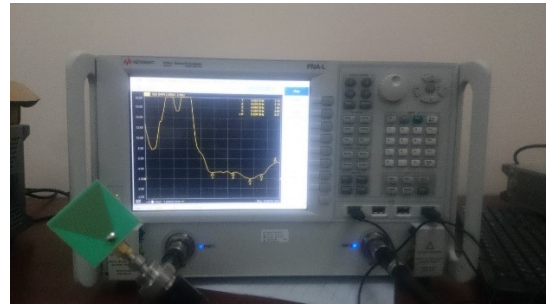


Hình 11: Kết quả mô phỏng và đo thực tế tham số S11 của ăng ten phát

Kết quả mô phỏng và mẫu thử nghiệm có kết quả tần số cộng hưởng đầu tiên là trùng nhau, ở khoảng 1 GHz. Ở các tần số cao hơn, có sự sai khác về giá trị của hệ số S11. Điều này có thể lý giải bởi công nghệ chế tạo còn gặp nhiều sai số. Ngoài ra do kích thước của ăng ten là tương đối nhỏ nên cấp đo cũng làm ảnh hưởng đến bức xạ của ăng ten. Tuy nhiên, nhìn chung, băng tần hoạt động của ăng ten trong mô phỏng và mẫu đo thực tế đều cho thấy ăng ten có dải tần hoạt động rất rộng (Từ 1 GHz đến trên 10 GHz), do đó đáp ứng được yêu cầu làm ăng ten phát cho hệ thống.



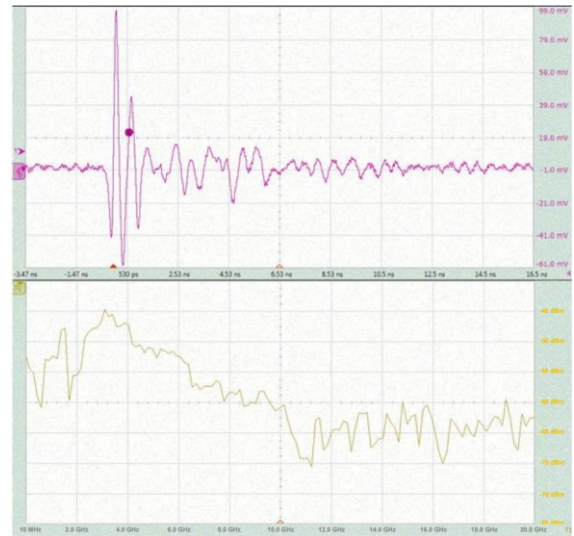
Hình 12: Đồ thị bức xạ của ăng ten phát tại tần số 3,5 GHz



Hình 13: Đồ hệ số phân xạ của ăng ten phát

Đồ thị bức xạ của ăng ten được thể hiện trong Hình 12. Ăng ten thể hiện bức xạ đẳng hướng đúng với yêu cầu thiết kế nhằm đảm bảo việc phát sóng theo mọi hướng không phụ thuộc vào vị trí lắp đặt và hướng của cảm biến. Hệ số khuếch đại của ăng ten xác định trong mô phỏng tại tần số điển hình 3,5GHz là tương đối tốt với giá trị đạt 3,6 dBi với hiệu suất bức xạ đạt 82%. Thông thường với ăng ten chấn từ đơn, hệ số khuếch đại có thể đạt đến khoảng 4 dBi. Mẫu ăng ten thiết kế với kích thước nhỏ gọn và băng thông siêu rộng, nên giá trị hệ số khuếch đại đạt được 3,6 dBi là hoàn toàn chấp nhận được và đáp ứng được yêu cầu để sử dụng làm ăng ten phát cho hệ thống.

Kết quả đo xung UWB từ ăng ten phát thể hiện trong Hình 14 cho thấy thời gian xung nhỏ hơn 10ns. Kết quả đo phổ cũng cho thấy tần số trung tâm của tín hiệu ở khoảng 4,2 GHz và mật độ phổ trên toàn băng không vượt quá -41,3 dBm/MHz, thoả mãn các yêu cầu của FCC về tín hiệu UWB.



Hình 14: Xung phát và phổ của tín hiệu UWB

4. Kết luận

Trong bài báo này, nhóm tác giả đã trình bày việc thiết kế, chế tạo và thử nghiệm hệ ăng ten thu phát ứng dụng cho việc truyền tin của hệ thống cảm biến không dây trong môi trường công nghiệp. Các mẫu ăng ten đề xuất đã đảm bảo được các yêu cầu về kích thước nhỏ gọn, có khả năng hoạt động trong môi trường khắc nghiệt. Các tham số về băng thông và hiệu suất cũng như hệ số khuếch đại cũng thoả mãn được các yêu cầu đặt ra. Từ các dữ liệu mô phỏng và đo kiểm mẫu thử, các mẫu chế tạo thử nghiệm của hệ ăng ten thu phát đã được triển khai thử nghiệm với hệ thống truyền tin không dây trong môi

trường thực tế. Hệ thống giám sát được triển khai trên đầu máy D19E- 921 trong buồng máy diesel Caterpillar 3512B. Các mô-đun và cảm biến được đặt cố định trực tiếp trên bề mặt động cơ. Máy thu có ăng ten được lắp cố định ở vị trí phù hợp. Các thành phần hệ thống được cung cấp bởi pin 24V. Khoảng cách từ Bộ cảm biến số 1 và Bộ cảm biến số 2 tới bộ thu là 1.5m, khoảng cách từ Bộ cảm biến số 3 và Bộ cảm biến số 4 tới bộ thu là 4.5m. Thí nghiệm 1 bao gồm kiểm tra hoạt động của hệ thống với động cơ đầu máy diesel chạy không tải trong 1,5 giờ, thí nghiệm 2 được thực hiện khi đầu máy chuyển động trong vòng 40 phút. Kết quả hoạt động của hệ thống được đảm bảo với chu kỳ truyền ký hiệu 5 gói tin/s, mỗi gói chứa 28480 bit, cho tốc độ truyền tổng ~ 142 Kbit/s. Tỷ lệ truyền thành công được thể hiện trong Bảng 3. Từ Bảng 3 có thể thấy việc thu phát tín hiệu từ các bộ cảm biến 1 và 2 (đặt gần bộ thu hơn) là rất tốt. Tuy nhiên tỷ lệ thu chính xác từ Bộ cảm biến số 3 và Bộ cảm biến số 4 chưa cao, điều này có thể là do ngưỡng của bộ so sánh tại mạch xử lý tín hiệu trên bộ thu chưa được điều chỉnh tối ưu, ngưỡng này cần được điều chỉnh theo tín hiệu của máy phát ở vị trí xa nhất trong các trường hợp cụ thể. Tuy nhiên vấn đề này không nằm trong phạm vi nghiên cứu của bài báo. Một kết quả quan trọng khác có thể được rút ra từ Bảng 3 là hệ thống hoạt động ổn định trong cả 2 trường hợp thử nghiệm. Kết quả thực nghiệm đã chứng minh hệ ăng ten thu được thiết kế đã đáp ứng đầy đủ các yêu cầu kỹ thuật cho hệ thống truyền tin không dây của hệ cảm biến trong môi trường công nghiệp với kênh truyền có độ phức tạp cao. Hơn nữa, các thiết kế này có thể được coi là hoàn toàn độc lập, phù hợp với nhiều ứng dụng UWB khác nhau.

Bảng 3: Kết quả hoạt động truyền tin của hệ thống thử nghiệm

| Tên thành phần | Phần trăm gói tin được phân phối chính xác | |
|----------------|--|--------------|
| | Thí nghiệm 1 | Thí nghiệm 2 |
| Bộ cảm biến-1 | 99.97% | 92.60% |
| Bộ cảm biến-2 | 99.99% | 96.35% |
| Bộ cảm biến-3 | 65.29% | 63.04% |
| Bộ cảm biến-4 | 63.88% | 61.36% |

Tài liệu tham khảo

- [1] R. Cicchetti, E. Miozzi, and O. Testa, "Wideband and UWB Antennas for Wireless Applications: A Comprehensive Review," *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2017, pp. 1–45, 2017, doi: 10.1155/2017/2390808.
- [2] E. Slottke, M. Kuhn, A. Wittneben, H. Luecken, and C. Cartalemi, "UWB Marine Engine Telemetry Sensor Networks: Enabling Reliable Low-Complexity Communication," in *2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall)*, Boston, MA, USA, Sep. 2015, pp. 1–5. doi: 10.1109/VTCFall.2015.7391187.
- [3] K. Siwiak and D. McKeown, *Ultra-wideband radio technology*. Chichester; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2004.
- [4] C. U. Bas and S. C. Ergen, "Ultra-wideband Channel Model for Intra-vehicular Wireless Sensor Networks Beneath the Chassis: From Statistical Model to Simulations," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 62, no. 1, pp. 14–25, Jan. 2013, doi: 10.1109/TVT.2012.2215969.
- [5] Y. Jin, D. Kwak, K. J. Kim, and K. S. Kwak, "Cyclic Prefixed Single Carrier Transmission in Intra-Vehicle Wireless Sensor Networked Control Systems," in *2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Seoul, South Korea, May 2014, pp. 1–5. doi: 10.1109/VTCSpring.2014.7023158.
- [6] R. T. Lee and G. S. Smith, "A design study for the basic TEM horn antenna," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 46, no. 1, pp. 86–92, Feb. 2004, doi: 10.1109/MAP.2004.1296150.
- [7] A. A. H. Ameri, G. Kompa, and A. Bangert, "Study About TEM Horn Size Reduction for Ultra- Wideband Radar Application," in *2011 German Microwave Conference*, 2011, p. 4.
- [8] Kyungho Chung, S. Pyun, and Jaehoon Choi, "Design of an ultrawide-band TEM horn antenna with a microstrip-type balun," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 10, pp. 3410–3413, Oct. 2005, doi: 10.1109/TAP.2005.856396.
- [9] S. Yin, Yang Sun, and Peng Li, "A new design of TEM horn antenna based on ultra-wide band broken line," in *2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*, Shanghai, China, Aug. 2016, pp. 4375–4378. doi: 10.1109/PIERS.2016.7735630.
- [10] A. O. Boryszenko and D. L. Sostanovsky, "A NEW TWO-FLARE-SHAPED UWB ANTENNA ELEMENT," *Proc. 2005 Antenna Appl. Symp.*, pp. 451–471, Sep. 2005.
- [11] K. Harima, T. Kubo, and T. Ishida, "Evaluation of a TEM horn antenna for radiated immunity tests in close proximity," *IEICE Commun. Express*, vol. 9, no. 2, pp. 60–65, 2020, doi: 10.1587/comex.2019XBL0137.
- [12] K. Moussakhani, R. K. Amineh, and N. K. Nikolova, "High-efficiency TEM horn antenna for ultra-wide band microwave tissue imaging," in *2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, Spokane, WA, Jul. 2011, pp. 127–130. doi: 10.1109/APS.2011.5996657.
- [13] F. Karshenas, A. R. Mallahzadeh, and A. Imani, "Modified TEM horn antenna for wideband applications," in *2009 13th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and the Canadian Radio Science Meeting*, Banff, AB, Canada, Feb. 2009, pp. 1–5. doi: 10.1109/ANTEMURSI.2009.4805077.
- [14] Rogers Cooperation, "Rogerss Thermoset Microwave Materials Data Sheet." Accessed: Jan. 24, 2021. [Online]. Available: <https://www.rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-electronics-solutions/english/data-sheets/>
- [15] V. V. Yêm, "Phân tích, thiết kế và chế tạo anten kích thước nhỏ sử dụng vật liệu có cấu trúc đặc biệt cho hệ thống vô tuyến băng thông rộng,." Đề tài cấp nhà nước. Mã số: 11/355/2008.