

Giải pháp nâng cao hiệu quả xác định tần số vô tuyến

Trần Đình Lâm*, Vũ Lê Hà, Đại Xuân Lợi, Lưu Thị Thu Hồng

Viện Điện tử, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, 17 Hoàng Sâm, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam.

*Tác giả liên hệ: lamtdvdt@gmail.com

Nhận bài: 04/9/2024; Hoàn thiện: 12/11/2024; Chấp nhận đăng: 15/11/2024; Xuất bản: 06/12/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2024.128-134>

TÓM TẮT

Xác định tần số vô tuyến là một trong những tham số quan trọng trong phát hiện, nhận dạng và phân loại mục tiêu. Một số giải pháp kỹ thuật được sử dụng để xác định tần số phổ biến là phân tích phổ bằng biến đổi Fourier nhanh (FFT: Fast Fourier Transform), xác định tần số trực tiếp (IFM: Instantaneous Frequency Measurement) và tính tự tương quan tín hiệu. Bài báo đề xuất giải pháp xác định tần số vô tuyến áp dụng cho các hệ thống quan sát, theo dõi mục tiêu dựa trên kỹ thuật lai ghép giữa hiệu ứng các bộ lọc xếp chồng và phân tích phổ thời gian thực (IFM-FFT). Giải pháp lai ghép IFM-FFT đề xuất cải thiện được độ chính xác phát hiện tần số và giảm thiểu sự khắt khe trong thiết kế các bộ lọc xếp chồng so với giải pháp IFM. Đồng thời, so với giải pháp FFT, IFM-FFT có thời gian phát hiện nhanh hơn trên một dải tần số rộng.

Từ khoá: Đo tần số vô tuyến; Phân tích phổ thời gian thực; Đo tần số trực tiếp

1. MỞ ĐẦU

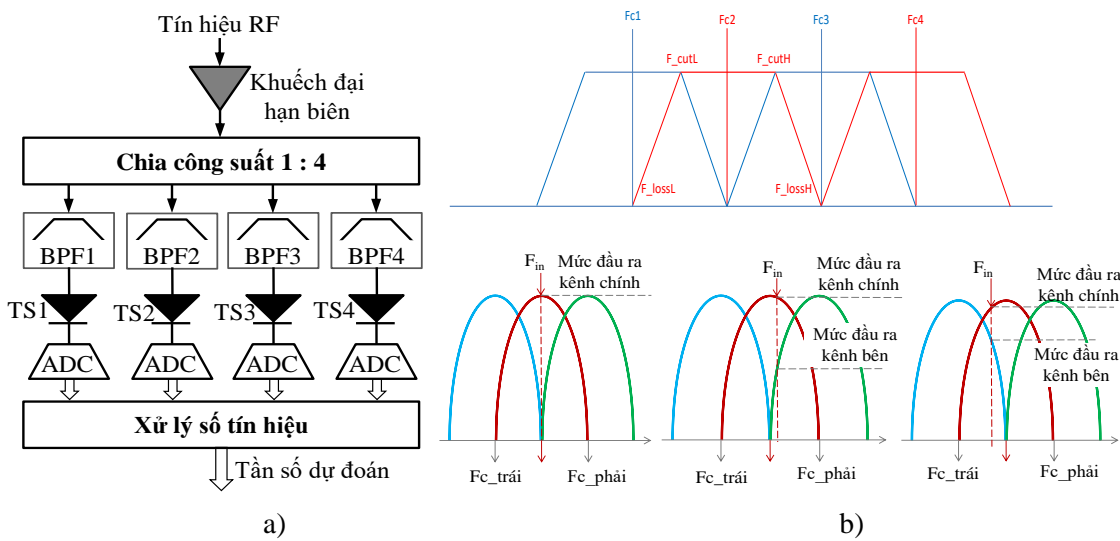
Xác định tần số sóng mang là một yêu cầu cấp thiết trong các hệ thống quan sát, phát hiện mục tiêu vô tuyến. Hầu hết các hệ thống này sử dụng giải pháp IFM để xác định tần số mục tiêu [1, 2]. Ngoài ra, kỹ thuật tương quan cũng được sử dụng để đo pha giữa tín hiệu nhận được và tín hiệu được trễ của nó để trích xuất thông tin tần số. Một đường trễ được sử dụng để tạo ra tín hiệu bị trễ pha và một bộ phân biệt pha để đo độ lệch pha [3, 4]. Một bộ phân biệt pha được cấu thành từ bộ chia công suất, bộ ghép lai và bộ dò luật bình phương cực tiểu [1, 5]. Để có được độ chính xác cao trong việc đo tần số, các phần tử của hệ thống IFM phải được thiết kế, chế tạo và tích hợp một cách chính xác, đồng đều. Việc phối hợp trở kháng và cách ly rất tốt giữa các thành phần, độ nhạy tuyến thu, sự ổn định tuyến trễ so với sự thay đổi nhiệt độ và giải pháp bù tổn thất đường trễ là cần thiết cho giải pháp này [1, 6]. Vì vậy, các kỹ thuật thiết kế, công nghệ chế tạo phần tử siêu cao tần và các phần tử xử lý số tín hiệu đạt được độ chính xác cao là hết sức quan trọng, đòi hỏi kinh nghiệm và chu trình thiết kế, chế thử, đo kiểm lặp lại nhiều lần. Với các giải pháp xác định tần số bằng FFT toàn dải tín hiệu yêu cầu về hiệu năng phần cứng cao (các bộ chuyển đổi ADC (Analog – Digital Converter), chip xử lý tín hiệu,...). Nền tảng phần cứng để xác định tần số trên dải rộng cần có băng thông lớn, tốc độ xử lý nhanh với xung nhịp hệ thống lên tới hàng chục GHz, kéo theo đó là mức độ tiêu thụ nguồn tăng lên. Bài báo đề xuất một giải pháp lai ghép giữa kỹ thuật IFM và FFT (IFM-FFT) để xác định tần số ứng dụng trong các hệ thống quan sát, phát hiện mục tiêu vô tuyến. Giải pháp IFM-FFT đề xuất kế thừa kỹ thuật IFM với ưu thế về độ trễ xử lý nhưng có thể giảm độ khắt khe tham số thiết kế, công nghệ chế tạo. Đồng thời giải pháp IFM-FFT giảm thiểu tiêu chí tốc độ, hiệu năng nhưng vẫn đảm bảo hoạt động trên băng tần rộng so với kỹ thuật FFT. Các kỹ thuật IFM, FFT và cấu trúc hệ thống giải pháp IFM-FFT đề xuất được trình bày trong mục II. Mô hình mô phỏng hệ thống trên công cụ SystemVue, các kết quả mô phỏng, đánh giá và so sánh với các kết quả nghiên cứu được trình bày trong mục III. Mục IV kết luận các kết quả đạt được của bài báo và đề xuất các hướng nghiên cứu, phát triển tiếp theo.

2. ĐỀ XUẤT MÔ HÌNH HỆ THỐNG IFM-FFT

2.1. Giải pháp IFM

Nguyên lý ước lượng tần số vô tuyến theo kỹ thuật IFM được mô tả như trên hình 1. Hình 1.a

mô tả sơ đồ khối nguyên tắc hoạt động của bộ xác định tần số vô tuyến tức thời dựa trên dãy bộ lọc xếp chồng. Tín hiệu RF được khuếch đại hạn biên đảm bảo đủ mức tín hiệu cho bộ chia công suất 1:4. Các tín hiệu đầu ra được đưa tới các bộ lọc xếp chồng có đặc tuyến chồng lấn nhau như hình 1.b, đầu ra các bộ lọc được tách sóng đường bao, chuyển đổi ADC và đưa vào khối xử lý số tín hiệu, thực hiện so sánh chênh lệch biên độ các băng lân cận (minh họa trong hình 1.b) để ước lượng tần số đầu vào [2]. Để ước lượng tần số theo phương pháp IFM, độ tuyến tính các đặc tuyến ngoài băng (side band) của bộ lọc xếp chồng là hết sức quan trọng. Thực tế, việc thiết kế, chế tạo các bộ lọc thông dải đảm bảo đặc tính này là hết sức khó khăn, vì vậy giải pháp IFM cho kết quả với sai số đáng kể. Như trên hình 1.b, tùy tần số tín hiệu đầu vào rơi vào vị trí nào trong băng của bộ lọc trung tâm, độ chênh lệch các biên độ đầu ra bộ lọc trung tâm và bộ lọc lân cận sẽ có tỷ lệ khác nhau. Tỷ lệ này là cơ sở để các bộ xử lý số phía sau truy nhập bộ nhớ và trích xuất một giá trị tần số được định nghĩa trước (gần nhất với tần số thực tín hiệu vào).



Hình 1. Nguyên lý ước lượng tần số vô tuyến bằng kỹ thuật IFM.

Kỹ thuật IFM có thời gian ước lượng tần số nhanh (tức thời), phụ thuộc chủ yếu vào tốc độ biến đổi ADC và tính toán độ chênh lệch điện áp giữa băng trung tâm và băng liền kề để xác định địa chỉ bảng tra giá trị tần số ước lượng (được nạp trước) mà không mất thời gian tính toán. Hơn nữa, các kiến trúc ADC và DSP (Digital Signal Processor) phía sau chỉ xử lý các tín hiệu đường bao tần số thấp, vì vậy không yêu cầu tốc độ xung nhịp lớn. Tuy vậy, độ chính xác tần số theo phương pháp IFM là không cao do sử dụng phương pháp ước lượng, phụ thuộc lớn vào chất lượng các bộ lọc xếp chồng, phẩm chất, độ ổn định của các phần tử analog (khuếch đại, tách sóng, chia công suất,...).

2.2. Giải pháp FFT

Giải pháp FFT thực hiện phân tích tín hiệu trên miền tần số một cách hiệu quả hơn về mặt tốc độ so với giải pháp biến đổi Fourier rời rạc [7, 8]. FFT xác định các đỉnh tín hiệu tại các bin tần số trong toàn dải tần quan sát với ưu điểm là sai số tần số khá nhỏ, phụ thuộc vào băng thông và tốc độ của ADC và DSP. Độ phân giải và độ chính xác tần số có thể điều chỉnh được. Kiến trúc phần cứng khá đơn giản và ổn định hơn so với giải pháp IFM. Tuy nhiên, nhược điểm của FFT là thời gian xác định tần số tín hiệu lớn hơn, đặc biệt khi cần quan sát tín hiệu trong dải tần số rộng và yêu cầu độ chính xác tần số cao. Đồng thời, công suất tiêu thụ lớn hơn do phải sử dụng các hệ thống chuyển đổi ADC và DSP có tốc độ xung nhịp cao hơn nhiều so với giải pháp IFM.

2.3. Đề xuất giải pháp lai ghép sử dụng kỹ thuật kết hợp IFM và FFT

Trên cơ sở phân tích các ưu nhược điểm của một số giải pháp xác định tần số tín hiệu vô tuyến, nhóm nghiên cứu đề xuất giải pháp lai ghép IFM-FFT. Giải pháp này kết hợp các ưu điểm của mỗi

giải pháp đã phân tích, đồng thời bổ trợ, giảm thiểu nhược điểm của chúng để thiết kế một hệ thống đo tần số tín hiệu trên dải tần số rộng đáp ứng được yêu cầu về độ chính xác, thời gian phản ứng, độ phức tạp thiết kế phần tử siêu cao tần và công suất tiêu thụ.

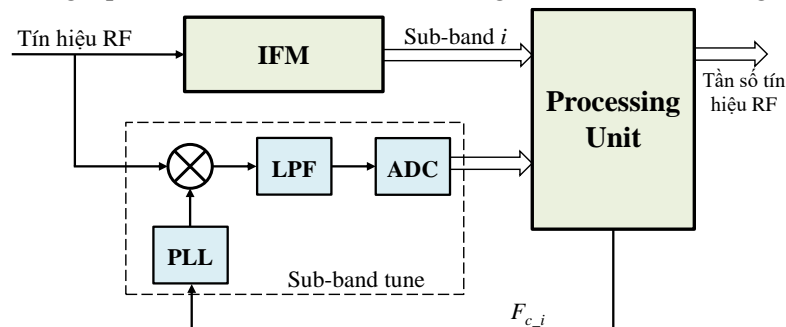
2.3.1. Nguyên lý của giải pháp lai ghép IFM-FFT đề xuất

Trong giải pháp IFM-FFT, dải tần số cần quan sát được chia nhỏ thành một số dải con bởi dãy bộ lọc xếp chồng, trong đó, IFM chỉ thực hiện chức năng xác định xem tín hiệu tới xuất hiện trong băng tần con nào. Vì vậy, giải pháp IFM ở đây được đơn giản hóa hơn về độ khắt khe so với các giải pháp IFM trong [1, 2] do không yêu cầu cao về độ đồng đều đặc tuyến các bộ lọc xếp chồng cũng như độ đồng đều tín hiệu trong mỗi kênh xử lý. Đồng thời bộ IFM ở đây không yêu cầu tính ổn định của các linh kiện cao tần dưới ảnh hưởng của các điều kiện môi trường. Vì vậy, rút ngắn được thời gian, chi phí thiết kế và chế tạo, hiệu chỉnh phần cứng.

Sau đó, giải pháp FFT được áp dụng để xác định chính xác tần số tín hiệu trong băng tần đã chọn. So với phân tích phổ toàn dải tần, việc chỉ phân tích phổ FFT một trong n băng tần con sẽ giảm được thời gian quan sát phổ. Với giải pháp FFT thông thường, bộ tổ hợp tần số PLL (Phase Lock Loop) phải lần lượt quét n băng tần con xác định đỉnh tín hiệu, vì vậy thời gian thực thi sẽ tăng lên và có khả năng bỏ sót mục tiêu xuất hiện trong thời gian ngắn. Ngược lại, với giải pháp lai ghép IFM-FFT, bộ PLL nhanh chóng chuyển về băng tần con do kiến trúc IFM cung cấp ngay khi có tín hiệu xuất hiện mà không cần quét lần lượt qua toàn bộ các băng con khác. Vì vậy, thời gian phản ứng của hệ thống sẽ được cải thiện đáng kể so với giải pháp FFT thông thường.

2.3.2. Kiến trúc bộ IFM-FFT lai ghép đề xuất

Bộ IFM-FFT lai ghép đề xuất có sơ đồ khối chức năng như được mô tả trong hình 2.



Hình 2. Sơ đồ khối chức năng kiến trúc IFM-FFT lai ghép đề xuất.

Hệ thống sử dụng kiến trúc IFM đơn giản hóa để xác định thô tín hiệu mục tiêu xuất hiện trong băng tần con nào. Từ đó, đưa ra thông tin về số hiệu băng tần con cho hệ thống xử lý trung tâm PU (Processing Unit). PU điều khiển bộ PLL (thông qua F_{ci}) để chuyển đổi tín hiệu về băng tần gốc có độ rộng băng tần bằng băng thông của các bộ lọc xếp chồng. Tín hiệu băng gốc, thông qua các cơ cấu lọc, ADC để thực hiện phân tích phổ. PU sử dụng kết quả phân tích phổ kết hợp với thông tin băng tần con đầu vào để xác định chính xác tần số tín hiệu mục tiêu.

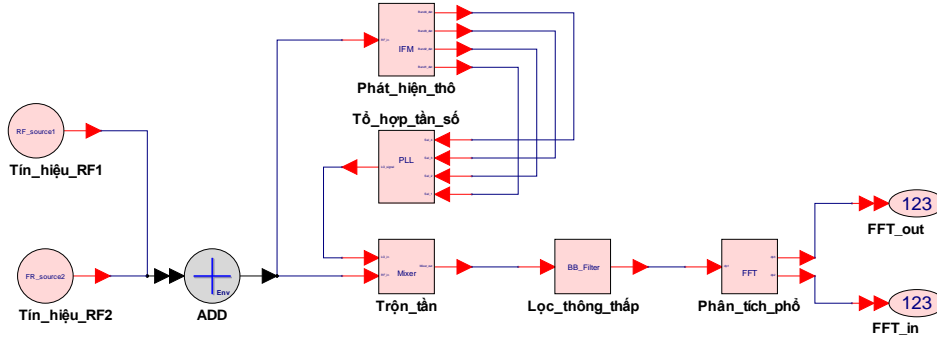
3. MÔ PHỎNG ĐÁNH GIÁ GIẢI PHÁP ĐỀ XUẤT

Giải pháp IFM-FFT đề xuất được mô hình hóa, thiết kế và mô phỏng, kiểm chứng bằng công cụ phần mềm SystemVue [9]. Đồng thời, các hệ thống IFM và FFT đơn thuần cũng được mô phỏng làm cơ sở cho việc so sánh một số tham số như độ chính xác tần số, thời gian ... với điều kiện như nhau nhằm đánh giá hiệu quả của giải pháp đề xuất. Từ kết quả mô phỏng, công cụ ADS được sử dụng để thiết kế, mô phỏng các băng lọc xếp chồng đầu vào.

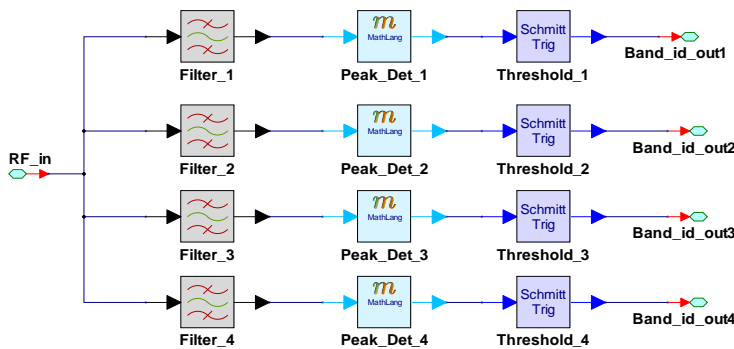
3.1. Xây dựng mô hình mô phỏng kiến trúc

Từ cấu trúc đề xuất IFM-FFT (hình 2), hệ thống được tính toán, mô hình hóa và thiết kế bằng

công cụ SystemVue như mô tả trong hình 3. Hình 4 mô tả mô hình thiết kế, mô phỏng cho thành phần IFM của cấu trúc IFM-FFT trên SystemVue. Các phép mô phỏng được thực hiện để đánh giá tính đúng đắn về nguyên lý hoạt động với dải tần số 8÷9 GHz, được chia thành 4 băng con có độ rộng 250 MHz. Giả thiết hai tín hiệu siêu cao tần đầu vào có tần số $f_1 = 8120$ MHz và $f_2 = 8700$ MHz, rơi vào các băng con thứ nhất và thứ tư.



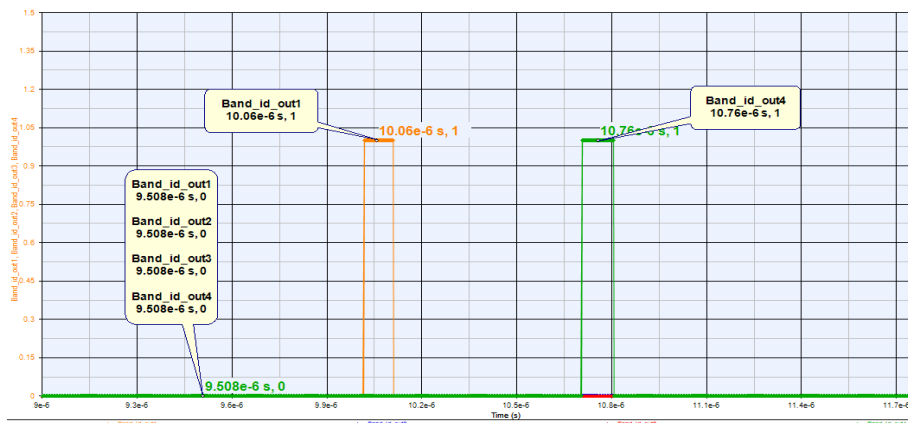
Hình 3. Mô hình mô phỏng hệ thống IFM-FFT trên SystemVue.



Hình 4. Mô hình mô phỏng cấu trúc, hoạt động của IFM trên SystemVue.

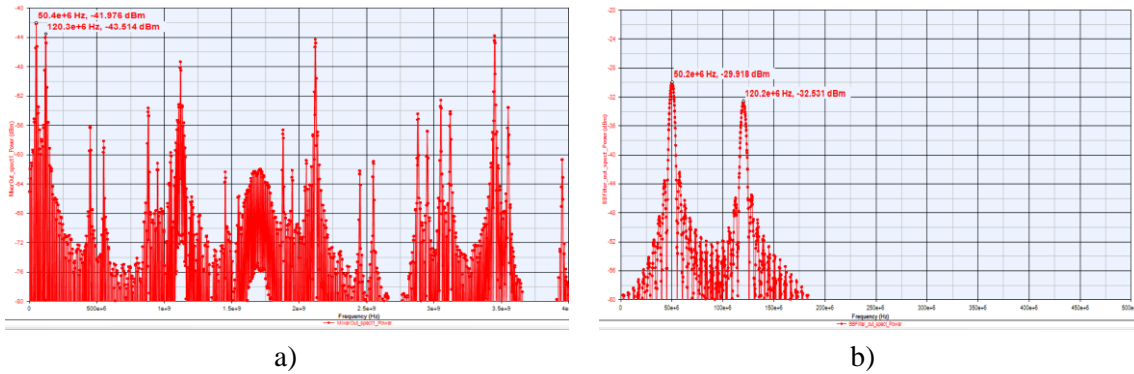
3.2. Các kết quả mô phỏng

Xác định băng tần con bằng kỹ thuật IFM: Kết quả mô phỏng (hình 5) cho thấy bộ IFM đã xác định đúng số hiệu 2 băng tần (1 và 4) có xuất hiện tín hiệu đầu vào bằng 2 xung có mức lô gic ‘1’ trong thời gian xuất hiện các tín hiệu vào. Trong khi đó, các băng tần con số 2 và 3 không phát hiện tín hiệu đầu vào trong suốt thời gian mô phỏng.



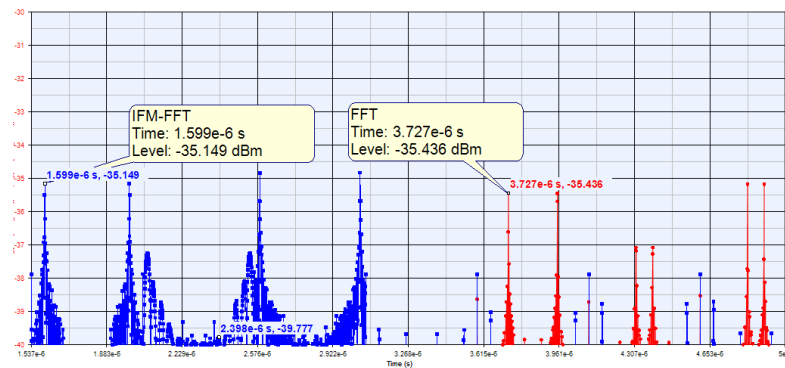
Hình 5. Kết quả xác định băng tần con khi có 2 tín hiệu mục tiêu tới.

Tín hiệu đầu ra bộ trộn tần số: Sau khi xác định thô được băng tần con, PU điều khiển bộ PLL tạo ra các dao động nội LO (Local Oscillator) là 8000 và 8750 MHz để chuyển đổi các tín hiệu về băng gốc để FFT nhằm xác định tần số f_1 và f_2 . Kết quả phân tích phổ tín hiệu sau trộn (hình 6.a) và lọc (hình 6.b) cho thấy xuất hiện 2 thành phần băng gốc 120,3 MHz (tương ứng $f_1 = 8120$ MHz) và 50,4 MHz (tương ứng $f_1 = 8700$ MHz).



Hình 6. Kết quả mô phỏng tín hiệu sau trộn tần số (a) và sau lọc thông thấp (b).

So sánh, đánh giá trễ xử lý: Trễ xử lý của IFM-FFT phụ thuộc chủ yếu vào thời gian thực thi FFT trong PU và biến đổi ADC, còn trễ của các khâu trước (như khuếch đại, chia công suất, lọc,...) là không đáng kể. Với mô hình mô phỏng, ta bỏ qua trễ ADC, và giả thiết 2 hệ thống này sử dụng ADC như nhau. Khi đó, sự khác nhau về độ trễ xử lý của hệ thống IFM-FFT đề xuất và FFT đơn thuần được quyết định bởi khâu FFT trong khối PU. Trễ FFT được xác định dựa trên sự xuất hiện của mẫu phổ tín hiệu đầu ra so với tín hiệu đầu vào. Hình 7 mô tả sự so sánh trễ xử lý của giải pháp IFM-FFT so với FFT.



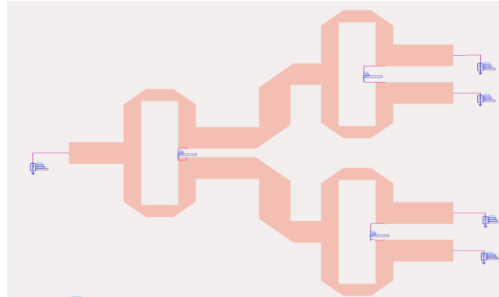
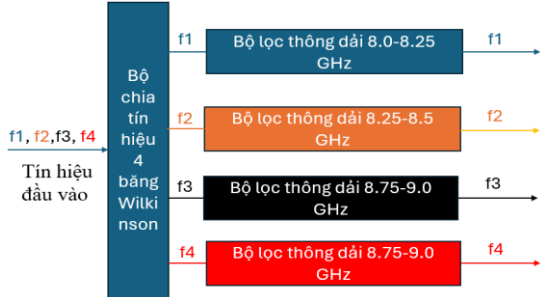
Hình 7. So sánh, đánh giá độ trễ do biến đổi FFT để xác định tần số tín hiệu vào.

Như trên hình 7, với IFM-FFT băng thông phát hiện chỉ 250 MHz, so với giải pháp FFT đơn thuần phải đo tần số trong cả dải tần 8 – 9 GHz, với cùng độ chính xác đo tần số thì số điểm dữ liệu phân tích phổ của IFM-FFT chỉ bằng $\frac{1}{4}$ so với giải pháp FFT. Kết quả là thời gian phân tích phổ của IFM-FFT chỉ là $\approx 1,6 \mu\text{s}$ so với $3,73 \mu\text{s}$ của FFT đơn thuần.

3.3. Thiết kế, mô phỏng cơ cấu lọc chia băng xếp chồng

Cơ cấu lọc chia băng thường được thiết kế theo công nghệ vi dải bằng công cụ ADS. Cơ cấu 4 băng lọc trong đề xuất được mô tả trên hình 8. Bộ chia Wilkinson ở đầu vào để chia đều (về biên độ) tín hiệu ra 4 công riêng biệt, tín trên mỗi kênh sau đó được đưa qua bộ lọc thông dải của từng kênh để loại bỏ các tín hiệu không mong muốn. Bộ chia tín hiệu Wilkinson được thiết kế trên phần mềm ADS như trên hình 9. Các bộ lọc băng con xếp chồng, được thiết kế để chia dải tần lớn ($8 \div 9$ GHz) thành 4 băng tần gồm bộ lọc 8.0-8.25 GHz với $\text{FBW} = 3\%$, bộ lọc 8.25 - 8.5 GHz với

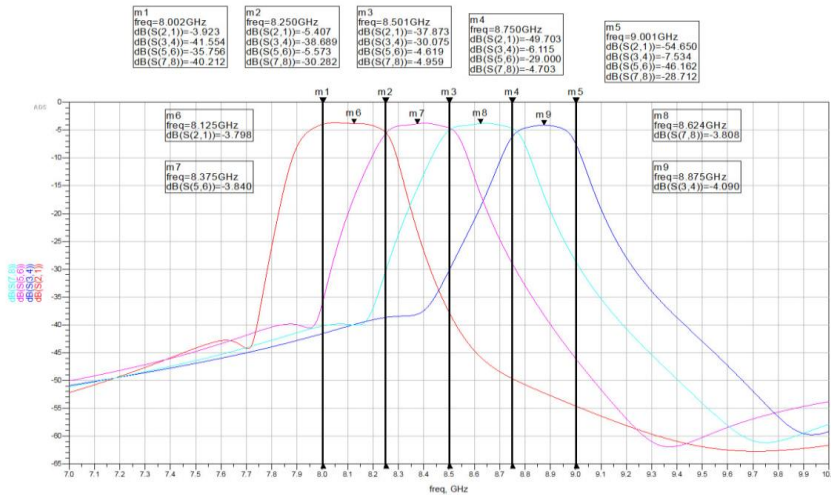
FBW = 2.98%, bộ lọc 8.5 - 8.75 GHz với FBW = 2.89% và bộ lọc 8.75 - 9 GHz với FBW = 2.816%. Các bộ lọc sử dụng cấu trúc Hairpin được trình bày trong các nghiên cứu [10, 11]. Đặc điểm của bộ lọc Hairpin có độ chọn lọc tần số ngoài dải tốt (> 40 dBc).



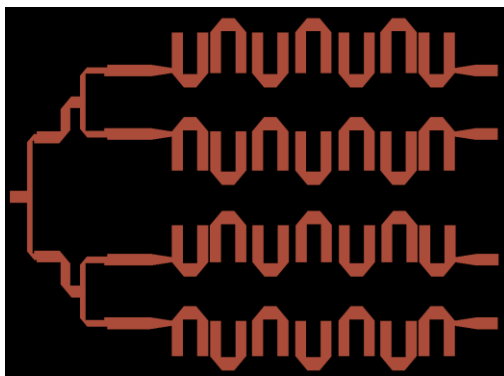
Hình 8. Cấu trúc bộ lọc xếp chồng 4 băng.

Hình 9. Sơ đồ thiết kế bộ chia Wilkinson.

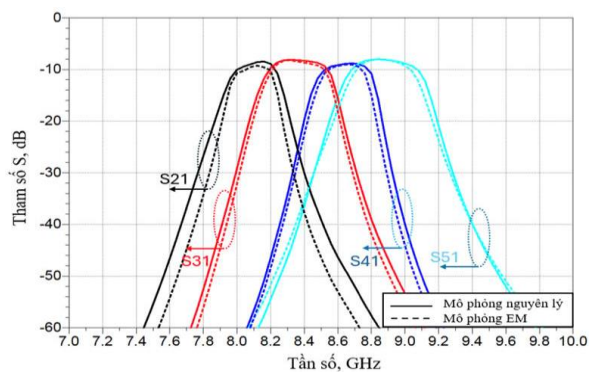
Các bộ lọc xếp chồng sau thiết kế độc lập được mô phỏng trên phần mềm ADS, kết quả mô phỏng đặc tuyến của các cơ cấu lọc được mô tả trong hình 10.



Hình 10. Kết quả mô phỏng các bộ lọc xếp chồng.



Hình 11. Thiết kế cơ cấu lọc chia băng.



Hình 12. Kết quả mô phỏng thiết kế sau Layout.

Nhóm tác giả thực hiện thiết kế, layout thử nghiệm băng lọc xếp chồng gồm 4 bộ lọc liền kề với các tần số trung tâm là 8,125 GHz, 8,375 GHz, 8,625 GHz và 8,875 GHz tích hợp cùng phần tử chia công suất đầu vào và ghép đầu ra. Sơ đồ thiết kế layout của cơ cấu chia-lọc băng-ghép được mô tả trong hình 11. Hình 12 là so sánh kết quả mô phỏng cơ cấu sau layout và nguyên lý. Đáp

ứng tần số của các bộ lọc băng con khá tương đồng về băng thông, độ chồng lấn, độ dốc và sai lệch không nhiều so với mô phỏng nguyên lý.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất mô hình mới nhằm xác định tần số vô tuyến ứng dụng trong các hệ thống quan sát, phát hiện mục tiêu vô tuyến. Giải pháp đề xuất có tính linh hoạt, hiệu quả, khả thi trong vấn đề giảm thiểu độ phức tạp công nghệ, ít ảnh hưởng với điều kiện môi trường hơn, ít khắt khe hơn trong tham số thiết kế, tốc độ xử lý và nguồn tiêu thụ trong khi vẫn đảm bảo yêu cầu về độ chính xác và thời gian đáp ứng của hệ thống. Hướng nghiên cứu tiếp theo tập trung thiết kế, tích hợp phần cứng hệ thống để đo đạc, đánh giá thử nghiệm thực tế, trên cơ sở đó xây dựng giải pháp mở rộng băng tần đảm bảo quan sát được mục tiêu vô tuyến trong toàn bộ dải tần X.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Badran, H., & Deeb, M., “A new low cost instantaneous frequency measurement system”. Progress In Electromagnetics Research M, 59, 171–180, (2017).
- [2]. Badran, H., & Deeb, M., “A 2 to 4 GHz instantaneous frequency measurement system using multiple band-pass filters”. Progress In Electromagnetics Research M, 62, 189–198, (2017). doi:10.2528/pierm17101605.
- [3]. Helton, J., Chen, C.-I. H., Lin, D. M., & Tsui, J. B. Y., “FPGA-Based 1.2 GHz Bandwidth Digital Instantaneous Frequency Measurement Receiver”. 9th International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED 2008). doi:10.1109/isqed.2008.4479798
- [4]. Badran, H. “A 2-6 GHz Instantaneous Frequency Measurement System Using Band-Pass Filter”, (2018). <https://www.researchgate.net/publication/324133334>.
- [5]. Daniel H-B., Oleg S., Vera T. and Larysa B., “Mehtod for fast and accurate frequency measurement”, (2009). <https://www.researchgate.net/publication/228811071>
- [6]. Rahimpour, H., Masoumi, N., Keshani, S., & Safavi-Naeini, S., “A High Frequency Resolution Successive-Band Shifted Filters Architecture for a 15-bit IFM Receiver”. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1–8, (2019). doi:10.1109/tmtt.2019.2904259
- [7]. Heo, J.; Jung, Y.; Lee, S.; Jung, Y. “FPGA Implementation of an Efficient FFT Processor for FMCW Radar Signal Processing”. *Sensors*, 21, 6443, (2021). Doi: 10.3390/s21196443
- [8]. https://en.wikipedia.org/wiki/Fast_Fourier_transform
- [9]. <https://www.aldec.com/en/support/resources/documentation/articles/1507>
- [10]. Purohit A., Toshniwal S., “Design and simulation of hairpin band pass filter for different substrate”. IJETR, ISSN:2321-0869, Vol.3, Iss.1, pp. 68-70, (2015).
- [11]. Kavitha K., Jayakuma M., “Design and Performance Analysis of Hairpin Bandpass Filter for Sattelite Applications”. ICACC-2018 proceeding, pp. 886-891, (2018).

ABSTRACT

An efficient solution for radio frequency measurement

Radio frequency determination is one of the important parameters in target detection, identification and classification. Some common technical solutions used to determine frequency are spectrum analysis by FFT transformation, direct frequency determination IFM (Instantaneous Frequency Measurement) and signal autocorrelation. This paper proposes a solution to determine radio target frequency applicable to target observation and tracking systems based on the hybrid technique between the effect of stacked filters and real-time spectrum analysis. The IFM-FFT hybrid solution proposed in the paper improves the accuracy of frequency detection and reduces the strictness in the design of stacked filters compared to the IFM solution. At the same time, compared to the pure FFT spectrum analysis solution, the IFM-FFT hybrid solution ensures faster detection time over a wide frequency range.

Keywords: Radio Frequency measurement; Real-time FFT; Instantaneous Frequency Measurement.