

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A DRFM SIMULATION SYSTEM ON AN SDR PLATFORM USING HACKRF ONE FOR THE 1–1000 MHZ FREQUENCY RANGE

Bui Duc Chinh, Duong Van Minh, Pham Trong Hung, Tran Duc Anh, Ha Thanh Dat^{*}
Military Technical Academy

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	15/7/2025	In this article, the authors investigate, develop, and evaluate a jamming system utilizing Digital Radio Frequency Memory technology for generating false targets or radar jamming in electronic warfare applications. To assess the effectiveness of the Digital Radio Frequency Memory system in receiving and retransmitting signals with desired delays or Doppler frequency shifts, the authors employ a software-defined radio - Hack RF One, to capture real radar signals. Experimental evaluations conducted over a frequency range from 1-1000 MHz demonstrate that the Digital Radio Frequency Memory system is capable of accurately reproducing radar signals, achieving Doppler frequency shifts within ± 0.001 MHz and delay errors of less than 1s. The experimental results confirm the effectiveness of the proposed system in electronic warfare scenarios, laying a critical foundation for future advancements and applications of Digital Radio Frequency Memory technology.
Revised:	17/10/2025	
Published:	20/10/2025	
KEYWORDS		
DRFM		
Hack RF One		
Simulation software		
Radar		
Electronic warfare		

XÂY DỰNG VÀ ĐÁNH GIÁ HỆ THỐNG DRFM MÔ PHỎNG TRÊN NỀN SDR SỬ DỤNG HACKRF ONE TRONG DẢI TẦN 1 - 1000 MHZ

Bùi Đức Chinh, Dương Văn Minh, Phạm Trọng Hùng, Trần Đức Anh, Hà Thành Đạt^{*}
Học viện Kỹ thuật Quân sự

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	15/7/2025	Trong bài báo này, tác giả nghiên cứu, xây dựng và đánh giá một hệ thống gây nhiễu sử dụng kỹ thuật nhớ tần số nhằm tạo ra các mục tiêu giả hoặc gây nhiễu ra đa sử dụng trong tác chiến điện tử. Để đánh giá hiệu quả của hệ thống bộ nhớ tần số vô tuyến số trong thu, phát lại tần số với độ trễ mong muốn hoặc thay đổi lệch tần Doppler, tác giả sử dụng máy thu vô tuyến – Hack RF one. Các thực nghiệm trên dải tần số từ 1- 1000 MHz cho thấy hệ thống bộ nhớ tần số vô tuyến số có khả năng tái tạo tín hiệu ra đa với độ chính xác cao, độ lệch tần Doppler trong khoảng $\pm 0,001$ MHz và sai số về độ trễ dưới 1 giây. Các kết quả nghiên cứu khẳng định hiệu quả của hệ thống trong các kịch bản tác chiến điện tử, tạo nền tảng quan trọng để phát triển và ứng dụng kỹ thuật bộ nhớ tần số vô tuyến số trong tương lai.
Ngày hoàn thiện:	17/10/2025	
Ngày đăng:	20/10/2025	
TỪ KHÓA		
Bộ nhớ tần số vô tuyến số		
Thiết bị Hack RF One		
Phần mềm mô phỏng		
Ra đa		
Tác chiến điện tử		

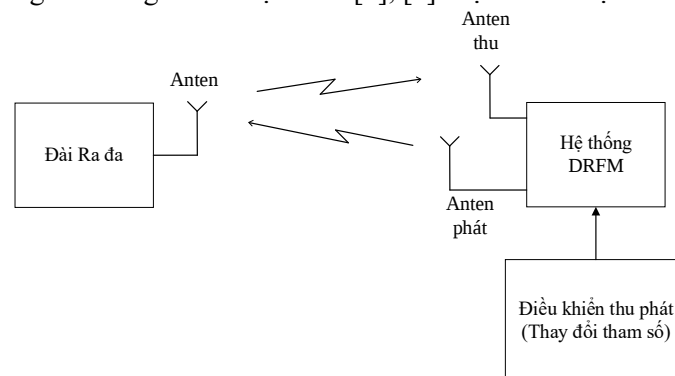
DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.13234>

^{*} Corresponding author. Email: data14k60@gmail.com

1. Giới thiệu

Tác chiến điện tử (Electronic Warfare - EW) đóng vai trò quan trọng trong quân sự hiện đại, nó có ý nghĩa trong việc bảo vệ các khí tài, hệ thống và con người trước các mối đe dọa từ đối phương. Một trong những kỹ thuật cơ bản trong tác chiến điện tử là gây nhiễu, mục đích giảm hoặc vô hiệu hóa khả năng phát hiện, định vị, và bám mục tiêu của các hệ thống ra đa hiện đại. Với sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ, các hệ thống ra đa ngày càng trở nên tinh vi hơn, tích hợp phương pháp xử lý tín hiệu như nén xung, lọc nhiễu, và chống nhiễu hiệu quả, làm gia tăng thách thức đối với việc triển khai các kỹ thuật gây nhiễu [1].

Trong số các phương pháp gây nhiễu hiện đại, kỹ thuật nhớ tần số vô tuyến số (Digital Radio Frequency Memory - DRFM) có khả năng lưu trữ, xử lý, và tái tạo linh hoạt các tín hiệu ra đa để tạo ra các mục tiêu giả mạo hoặc gây nhiễu đánh lừa ra đa đối phương [2], [3]. DRFM hoạt động dựa trên nguyên lý thu nhận tín hiệu ra đa, số hóa và lưu vào bộ nhớ tốc độ cao, sau đó tái phát tín hiệu với độ trễ, dịch tần Doppler hoặc điều chế biên độ mong muốn [4]. DRFM đặc biệt hiệu quả trong việc đánh lừa các ra đa sử dụng các kỹ thuật xử lý tín hiệu số tiên tiến, như các ra đa với khả năng nén xung và chống nhiễu mạnh mẽ [1], [5]. Kịch bản được mô tả trong Hình 1.



Hình 1. Kịch bản thu phát tín hiệu của hệ thống DRFM

Các nghiên cứu gần đây đã tập trung phát triển và tối ưu hóa các hệ thống DRFM cả về phần cứng và phần mềm, trong đó nhấn mạnh vào việc ứng dụng FPGA (Field Programmable Gate Array) và DSP (Digital Signal Processor) nhằm nâng cao hiệu suất xử lý tín hiệu thời gian thực, tăng cường độ linh hoạt và giảm thiểu chi phí triển khai hệ thống [6] - [8]. Một số nghiên cứu đã đề xuất cấu trúc DRFM sử dụng bộ lọc phân tích - tổng hợp (Analysis and Synthesis Filter Bank) để nâng cao khả năng xử lý đồng thời nhiều tín hiệu với băng rộng và độ chính xác cao [9]. Tuy nhiên, các công trình này mới chỉ dừng lại ở việc tối ưu hóa cấu trúc phần cứng và các thuật toán xử lý tín hiệu, mà chưa đi sâu đánh giá đầy đủ hiệu quả của kỹ thuật DRFM trong các tình huống thực tế có nhiều phức tạp, đặc biệt là khả năng hiển thị và phân tích tín hiệu ra đa một cách trực quan [6], [9].

Xuất phát từ khoảng trống nghiên cứu này, bài báo đề xuất xây dựng một phần mềm hệ thống DRFM sử dụng thiết bị Hack RF One như một module thu linh hoạt. Mục tiêu nghiên cứu là đánh giá khả năng thu, phát và hiển thị tín hiệu từ thiết bị Hack RF One, từ đó áp dụng kỹ thuật DRFM để tạo nhiễu giả hiệu quả trong các tình huống tác chiến cụ thể. Nghiên cứu tiến hành thử nghiệm thực tế và mô phỏng các kịch bản tác chiến điện tử nhằm phân tích rõ hiệu quả, ưu điểm và hạn chế của hệ thống DRFM được xây dựng, làm cơ sở cho việc triển khai hiệu quả hơn các hệ thống DRFM trong tương lai.

Cấu trúc của bài báo gồm 4 phần, phần 1 giới thiệu vấn đề nghiên cứu. Phương pháp nghiên cứu được trình bày ở phần 2, bao gồm các nội dung: Tổng quan nội dung về DRFM, thiết bị Hack RF One, phần mềm GNU Radio và PyQt5, cơ sở nghiên cứu vấn đề. Phần 3 trình bày kết quả và đo, thử nghiệm thực tế chứng minh hệ thống có khả năng tái tạo tín hiệu, điều chỉnh độ trễ

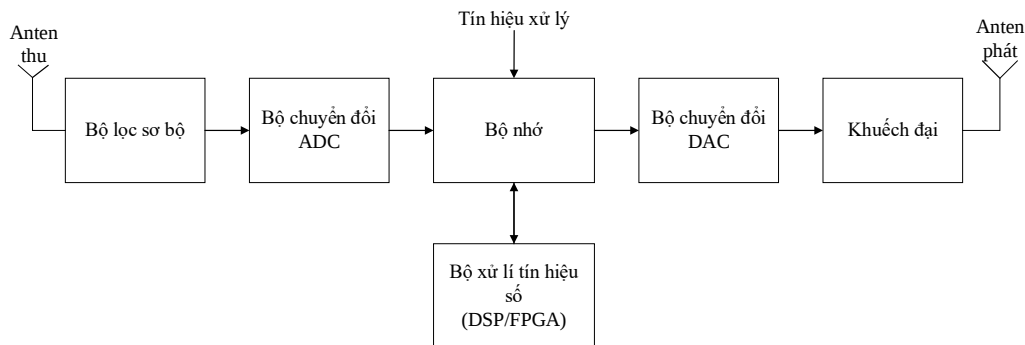
và tạo nhiều Doppler hiệu quả, chính xác. Phần 4 là kết luận tổng quan khẳng định hiệu quả và ứng dụng tiềm năng của hệ thống DRFM, đề xuất cải thiện khả năng xử lý trong tương lai.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Tổng quan về DRFM

Digital Radio Frequency Memory (DRFM) là một kỹ thuật quan trọng trong lĩnh vực tác chiến điện tử (Electronic Warfare - EW), cho phép lưu trữ, xử lý và tái tạo các tín hiệu ra đa một cách linh hoạt và chính xác. DRFM hoạt động như một bộ nhớ số tần số vô tuyến, có khả năng ghi nhận các đặc tính về tần số, pha, biên độ và độ trễ của tín hiệu ra đa, nhằm mục đích tạo ra các mục tiêu giả hoặc gây nhiễu đánh lừa hệ thống ra đa đối phương [1], [2].

Về nguyên lý hoạt động, DRFM thu nhận tín hiệu phát ra từ hệ thống ra đa đối phương, chuyển đổi xuống một tần số trung gian (IF - Intermediate Frequency), số hóa thông qua bộ chuyển đổi tương tự-số (ADC - Analog-to-Digital Converter) và lưu trữ vào bộ nhớ tốc độ cao. Tín hiệu lưu trữ sau đó được xử lý, điều chỉnh các thông số như độ trễ thời gian, dịch tần Doppler, pha và biên độ. Tín hiệu sau khi xử lý được phát ra thông qua bộ chuyển đổi số-tương tự (DAC - Digital-to-Analog Converter) [3], [4]. Sơ đồ nguyên lý hoạt động của hệ thống DRFM cơ bản được mô tả trong Hình 2.



Hình 2. Sơ đồ khối tổng quan hoạt động của DRFM

2.2. Hệ thống mô phỏng DRFM

Quy trình thu phát tín hiệu và xử lý trong hệ thống DRFM được mô phỏng trên phần mềm chuyên dụng, kết hợp với thiết bị thu phát Hack RF One và phần mềm GNU Radio nhằm tái tạo chính xác tín hiệu ra đa thực tế.

2.2.1. Phần mềm mô phỏng hệ thống DRFM

Phần mềm mô phỏng hệ thống DRFM được thiết kế nhằm thực hiện các chức năng như thu nhận, lưu trữ, xử lý và phát lại các tín hiệu ra đa để tạo ra các mục tiêu giả hoặc gây nhiễu hiệu quả. Giao diện phần mềm được mô tả trong Hình 3, bao gồm các thành phần chính như sau:

Bảng điều khiển hệ thống, dùng để cập nhật trực tiếp số liệu vào, màn hình hiển thị phổ quan sát và phổ dạng thác nước sẽ được cập nhật tức thời tại thời điểm điều chỉnh, chỉ điều khiển được tuyến thu của hệ thống (Số 1, Hình 3).

Bảng tần số cấm, tín hiệu thu được khi phát nằm trong danh sách tần số cấm sẽ không được phát ra ngoài. Độ rộng phổ cấm được tín bằng tần số cấm $\pm 0,2$ MHz (Số 2, Hình 3).

Bảng folder, người dùng quan sát sự tồn tại của file tín hiệu, kiểm tra tín hiệu đã lưu trữ ở dạng .bin. Người dùng có thể thao tác xóa file hoặc phát tín hiệu từ các file (Số 3, Hình 3).

Màn hình hiển thị phổ tín hiệu với băng thông quan sát tức thời là ± 10 MHz tính từ tần số trung tâm (Số 4, Hình 3).

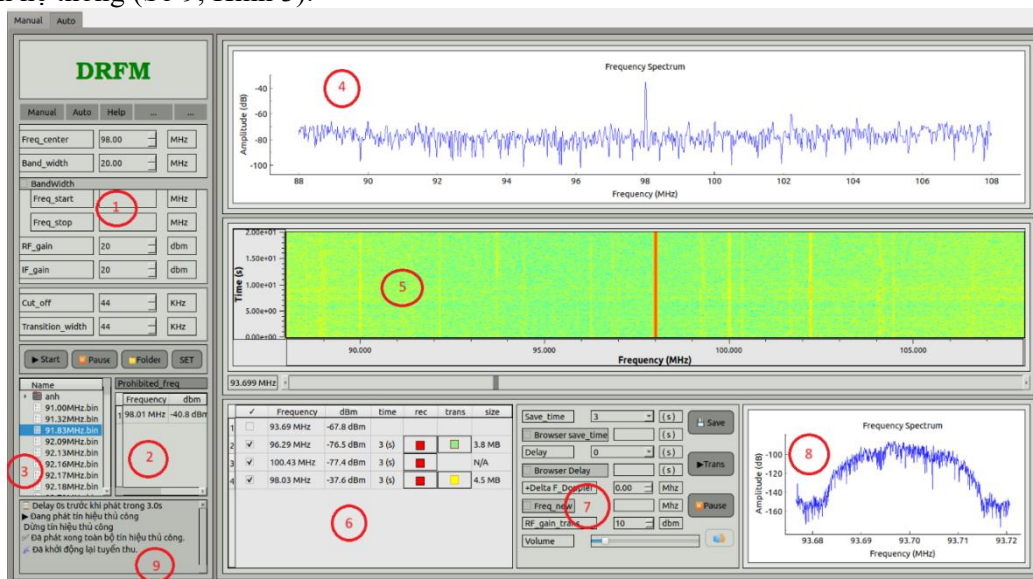
Màn hình hiển thị phổ dạng thác nước, quan sát cường độ năng lượng và thời gian tồn tại của tín hiệu với băng thông quan sát tức thời là $\pm 10\text{MHz}$, thanh trượt bên dưới giải điều chế FM cho phép nghe bản tin khi trượt đến tần số mong muốn (Số 5, Hình 3).

Bảng hiển thị tần số trình sát bao gồm: Tần số, cường độ, đèn báo, thời gian lưu, kích thước file. Tần số nhớ đưa vào bằng cách click chuột trái trên phổ tín hiệu. Đèn báo hiển thị trạng thái hoạt động như sau: Màu đỏ khi đang lưu tín hiệu, màu cam khi đang phát, màu xanh khi phát hoàn tất, và màu vàng nếu phát tín hiệu thuộc tần số cấm (Số 6, Hình 3).

Bảng điều khiển tuyến phát, cho phép thiết lập thời gian delay, phát ra ở tần số doppler hoặc tần số mới và điều chỉnh được hệ số khuếch đại đầu ra (Số 7, Hình 3).

Màn hình hiển thị phổ tín hiệu sau bộ lọc thông thấp được điều chỉnh bởi tần số cắt và băng thông lọc (Số 8, Hình 3).

Bảng terminal thông báo lỗi và các thao tác vận hành mà người dùng thực hiện trên phần mềm hệ thống (Số 9, Hình 3).



Hình 3. Giao diện phần mềm hệ thống DRFM

2.2.2. Quy trình thu phát và xử lý tín hiệu trong hệ thống DRFM

Quy trình gồm các bước xử lý từ thu nhận tín hiệu bằng module Hack RF One, qua xử lý số trên máy tính, đến khi phát lại ra môi trường thực tế được mô tả trong Hình 4, cụ thể như sau:

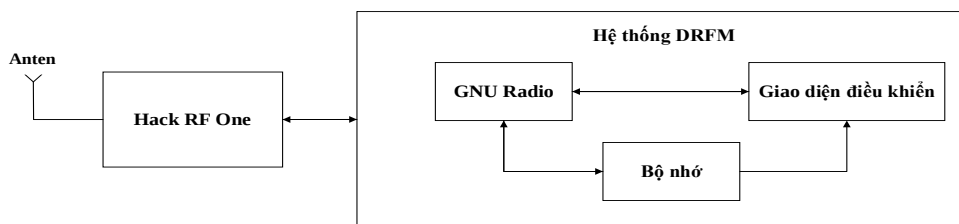
Các tín hiệu được truyền qua Ăng-ten của Hack RF One, thu được tín hiệu trong dải tần quan tâm, khuếch đại, sau đó chuyển xuống băng tần cơ sở và số hóa dòng I/Q.

Các tín hiệu sau số hóa (ADC – 8 bit) được gộp hàng và qua USB 3.0 đưa vào máy tính (Hệ thống DRFM) xử lý.

Xử lý tín hiệu trong GNU Radio: Sử dụng các khối chức năng trong GNU Radio để phân tích và xác định đặc tính tín hiệu. Chuyển đổi dữ liệu từ dạng luồng liên tục sang dạng khung gắn thẻ thời gian và các tham số cần thiết cho quá trình xử lý tiếp theo.

Giao diện điều khiển (thiết kế bằng Qt Designer) hiển thị phổ tần số tín hiệu, thiết lập tham số thời gian ghi, độ trễ, độ di tần, công suất phát,... Được kết nối GNU Radio qua Python API (file .py do GNU Radio Companion sinh ra).

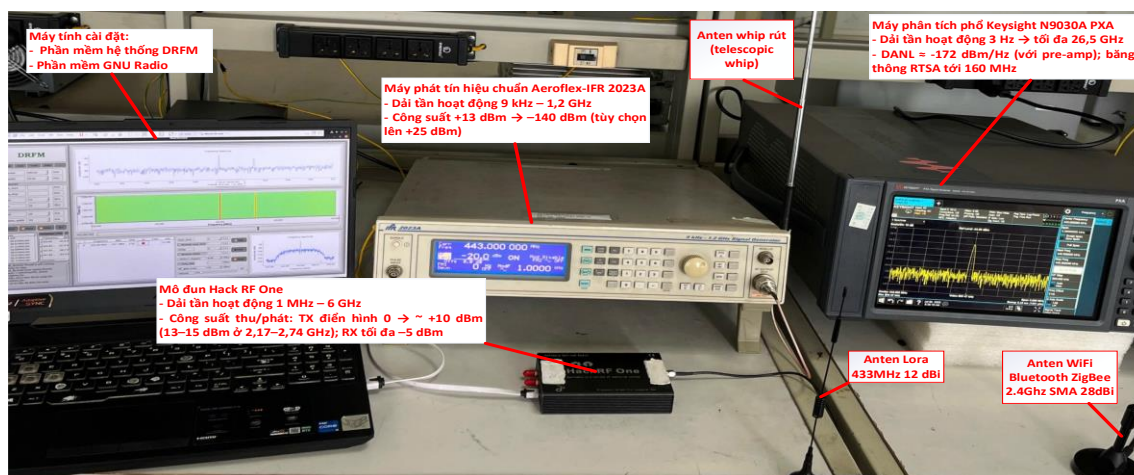
Các tín hiệu sau khi lọc, toàn bộ khung I/Q được ghi xuống tệp .bin hoặc RAM/SSD dạng vòng, thời lượng bản tin lưu do người dùng thiết lập. Chế độ phát: Tín hiệu sẽ được phát lại bằng cách đọc dữ liệu từ bộ nhớ, thông qua phần mềm thiết lập tham số độ trễ thời gian, độ di tần, phát tần số mới, sau đó chuỗi I/Q được đưa tới Hack RF One qua Ăng-ten phát tín hiệu vào môi trường.



Hình 4. Quy trình thu phát và xử lý tín hiệu trong hệ thống DRFM

3. Kết quả và bàn luận

Sơ đồ bố trí thực nghiệm được mô tả chi tiết và cụ thể trong Hình 5.



Hình 5. Sơ đồ thực nghiệm đánh giá hệ thống DRFM

3.1. Kiểm nghiệm độ ổn định tần số

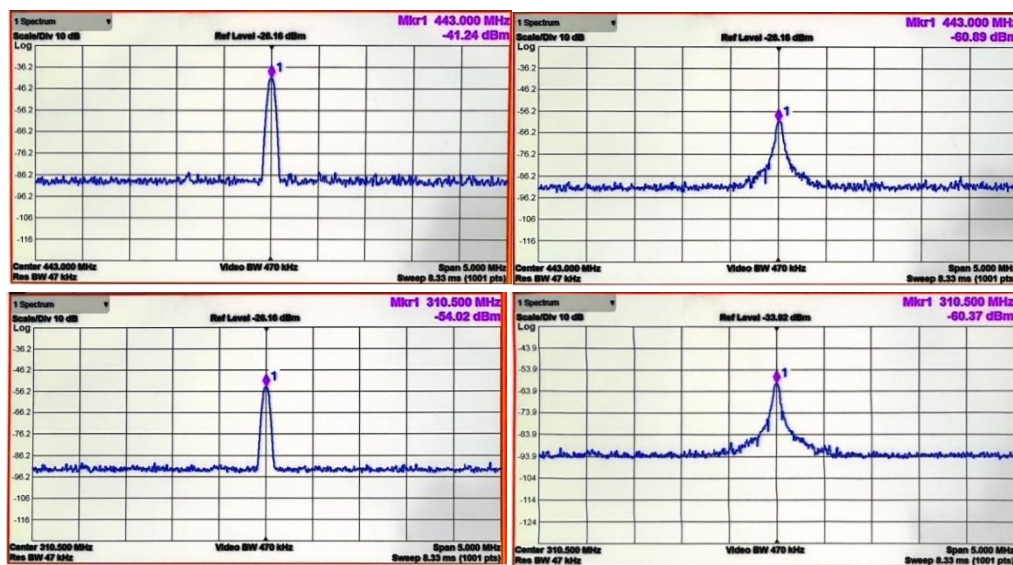
Kịch bản này nhằm mục đích đánh giá mức độ chính xác và ổn định của hệ thống DRFM trong việc thu và phát lại tín hiệu trong dải 1–1000 MHz tại các tần số: 10; 30; 80; 150; 281; 310,5; 443; 600; 800; 950; 1000 MHz, bộ tần số bao phủ đủ HF–VHF–UHF và có các điểm cận biên để phát hiện suy hao theo tần và sai lệch ở rìa băng. Tín hiệu được phát ra từ máy phát tín hiệu chuẩn với mức công suất -20 dBm, thể hiện trong Hình 6. Sau đó, Hack RF One thu tín hiệu này, lưu dữ liệu IQ và phát lại để kiểm tra khả năng tái tạo chính xác tín hiệu gốc. Các thông số như biên độ, độ rộng phổ được đo để đánh giá chất lượng tín hiệu phát lại. Một số kết quả phân tích chi tiết được trình bày trong Hình 7 và Bảng 1.



Hình 6. Màn hình cài đặt các thông số của máy phát tín hiệu chuẩn

Kết quả từ máy phân tích phổ cho thấy tín hiệu phát lại từ HackRF One có độ tương đồng cao so với tín hiệu gốc từ máy phát chuẩn. Cụ thể, sai số tuyệt đối lớn nhất ghi nhận là 1,8 kHz tại 10 MHz, tiếp đến 1,2 kHz tại 30 MHz, và 100 Hz tại 80 MHz. Ở các tần số từ 150 MHz đến 1000 MHz, sai số đo được ≤ 100 Hz, tương đương $\leq 0,67$ ppm tại 150 MHz và $\leq 0,10$ ppm tại 1000 MHz; các giá trị này thực tế đã chạm giới hạn độ phân giải đọc tần số của phép đo, tín hiệu phát lại duy trì được dạng phổ rõ nét và gần như không có sự biến dạng so với tín hiệu ban đầu. Tần

số của tín hiệu phát lại và tín hiệu chuẩn tương đồng, cho thấy rõ hệ thống DRFM sử dụng HackRF One có khả năng tái tạo tín hiệu với độ chính xác cao.



(a) Tín hiệu máy tín hiệu chuẩn

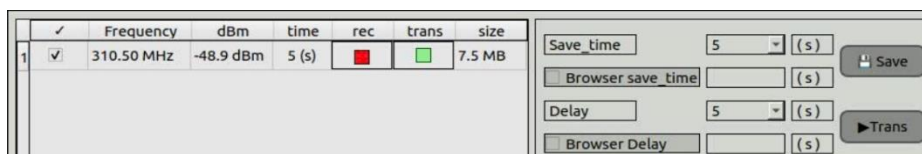
(b) Tín hiệu Hack RF One phát lại

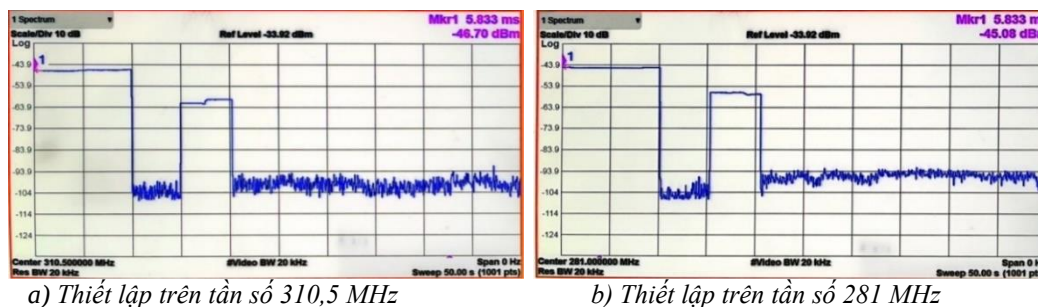
Hình 7. Màn hình hiển thị kết quả trên máy phân tích phổ**Bảng 1.** Kết quả kiểm nghiệm hệ thống DRFM trong thu và phát lại tín hiệu

Tần số tín hiệu chuẩn (MHz)	Tần số tín hiệu phát lại (MHz)	Độ lệch tần số	Công suất tín hiệu chuẩn (dBm)	Công suất tín hiệu phát lại (dBm)	Độ chênh công suất (dB)
10	9,9982	1800 Hz	-60,53	-80,28	-19,75
30	30,0012	1200 Hz	-55,12	-70,73	-15,61
80	80,0001	100 Hz	-55,89	-72,23	-16,34
150	150	0	-44,61	-62,86	-18,25
281	281	0	-41,24	-60,89	-19,6
310,5	310,5	0	-54,02	-60,37	-6,35
443	443	0	-48,01	-56,82	-8,81
600	600	0	-35,24	-49,14	-13,9
800	800	0	-24,80	-36,64	-11,84
950	950	0	-23,03	-36,35	-13,32
1000	1000	0	-24,54	-37,79	-13,25

3.2. Kiểm nghiệm khả năng tạo nhiễu giả cực ly

Trong kịch bản này, hệ thống DRFM được thiết lập nhằm tạo ra độ trễ cố định 5 giây như trong Hình 8. Quá trình thực nghiệm sử dụng tín hiệu tại tín hiệu trong dải 1–1000 MHz tại các tần số: 10; 30; 80; 150; 281; 310,5; 443; 600; 800; 950; 1000 MHz nhằm kiểm tra độ ổn định và chính xác của độ trễ mà hệ thống tạo ra. Máy phân tích phổ được cấu hình ở chế độ quét theo thời gian (zero-span mode) với thời gian quét là 50 giây, tần số trung tâm tương ứng với từng tín hiệu được thử nghiệm.

**Hình 8.** Thiết lập độ trễ trên hệ thống DRFM



a) Thiết lập trên tần số 310,5 MHz

b) Thiết lập trên tần số 281 MHz

Hình 9. Kết quả hiển thị trên máy phân tích phổ

Kết quả trên Hình 9 cho thấy khoảng thời gian xuất hiện của tín hiệu phát lại từ hệ thống DRFM đúng như kỳ vọng. Khi máy phát tín hiệu chuẩn dừng phát tín hiệu (sau 10 giây), hệ thống DRFM bắt đầu phát tín hiệu đã lưu trước đó với độ trễ chính xác là 5 giây. Các biểu đồ từ máy phân tích phổ cho thấy rõ nét tín hiệu xuất hiện lại đúng khoảng thời gian trễ đã được cài đặt, sai số chưa đến 1 giây, chứng minh khả năng kiểm soát độ trễ ổn định và chính xác của hệ thống.

Trong phép thử xác nhận khả năng tạo trễ, độ trễ 5 giây không mô phỏng tham số vận hành của DRFM dùng cho ra đa, mà để bảo đảm phép đo ổn định và dễ quan sát. Thứ nhất, khi vận hành HackRF One trên GNU Radio, quá trình chuyển mạch thu-phát tạo ra độ trễ cỡ hàng trăm ms; nếu đặt trễ ở mức μ s-ms thì tín hiệu phát lại dễ chồng lấn với khoảng thời gian chuyển mạch, khó xác định mốc thời gian chính xác. Thứ hai, giới hạn RAM của máy tính ràng buộc chiều dài bộ đệm tại tốc độ lấy mẫu, do đó chọn 5 giây là mức còn an toàn khi chạy kèm giao diện/đồ thị. Thứ ba, trễ dài thuận tiện cho hiển thị zero-span trên máy phân tích phổ, giúp nhìn rõ khoảng khắc tín hiệu được phát lại sau khi phát tín hiệu chuẩn. Tóm lại, cấu hình 5 giây được dùng để kiểm nghiệm nguyên lý thu-phát lại có kiểm soát trễ của hệ thống DRFM.

3.3. Kiểm nghiệm khả năng tạo nhiễu Doppler

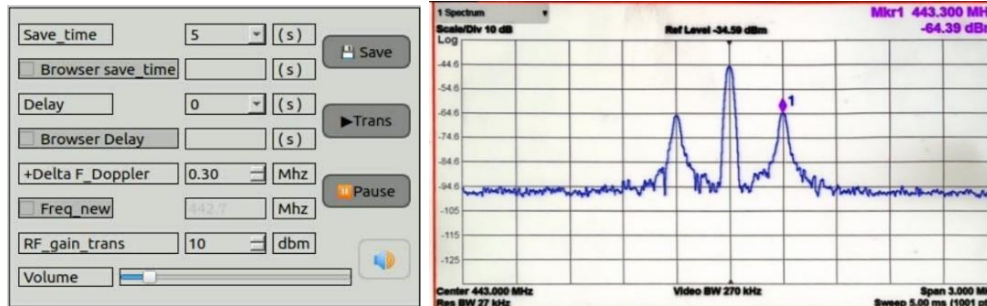
Kịch bản được thực hiện với mục đích đánh giá sự linh hoạt và chính xác của hệ thống DRFM khi giả lập hiệu ứng Doppler trong các kịch bản gây nhiễu ra đa. Tín hiệu trong dải 1–1000 MHz tại các tần số: 10; 30; 80; 150; 281; 310,5; 443; 600; 800; 950; 1000 MHz với tần số Doppler thiết lập lần là $\pm 0,3$ MHz, tần. Máy phân tích phổ ở chế độ "MAX HOLD", với dải quan sát (span) được cài đặt tỉ lệ với các mức Doppler, giúp dễ dàng quan sát các tín hiệu dịch chuyển tần số Doppler. Các tham số thiết lập, kết quả được thể hiện trên Bảng 2 và Hình 10.

Bảng 2. Kết quả kiểm nghiệm hệ thống DRFM trong phát nhiễu Doppler

Tần số tín hiệu chuẩn $f(\text{MHz})$	Độ dịch tần thiết lập Δf (MHz)	Tần số đo được (MHz) $(f + \Delta f / f - \Delta f)$
10	$\pm 0,3$	10,2978/ 9,7086
30	$\pm 0,3$	30,2988/ 29,7124
80	$\pm 0,3$	80,2978/ 79,6966
150	$\pm 0,3$	150,2946/ 149,6989
281	$\pm 0,3$	281,3/ 280,6979
310,5	$\pm 0,3$	310,8/ 310,2003
443	$\pm 0,3$	443,3/ 442,6995
600	$\pm 0,3$	600,3/ 599,6997
800	$\pm 0,3$	800,3/ 799,6981
950	$\pm 0,3$	950,2998/ 949,6993
1000	$\pm 0,3$	1000,3002/ 999,7001

Kết quả phân tích phổ thu được cho thấy rõ ràng sự xuất hiện của các tín hiệu Doppler phát lại ở các tần số đúng như thiết lập ban đầu trên toàn dải 1–1000 MHz. Dải tần từ 281 MHz trở lên, sai số giữa tần số đo và tần số kỳ vọng chỉ $\leq 2,1$ kHz ($\leq 0,7\%$ so với offset 0,3 MHz); riêng dải

443-1000 MHz đạt 0,1 - 1,9 kHz ($\approx 0,03$ -0,63% offset). Dải tần 10-150 MHz, sai số lớn hơn (1,1-8,6 kHz), cực đại 12,4 kHz tại 30 MHz ($\approx 4,13$ % offset), phù hợp với ảnh hưởng độ phân giải, đồng bộ phép đo ở tần số thấp. Thể hiện mức độ ổn định và chính xác của hệ thống.



Hình 10. Kết quả mô phỏng nhiễu doppler

4. Kết luận

Phần mềm mô phỏng hệ thống DRFM đề xuất trong nghiên cứu này đã được chứng minh. Tín hiệu phát lại đạt độ chính xác cao, sai số cực đại 1,8 kHz, từ 150 MHz-1000 MHz sai số ≤ 100 Hz đạt tiệm cận giới hạn đo. Thử nghiệm Doppler $\pm 0,3$ MHz cho thấy hệ thống tái tạo đúng dấu với sai số mức Hz-kHz. Khả năng tạo trễ được xác nhận sai số nhỏ hơn 1 giây. Các kết quả đạt được không chỉ cung cấp dữ liệu quan trọng về hiệu năng kỹ thuật mà còn mở ra hướng phát triển mới để tối ưu hóa hiệu suất xử lý tín hiệu theo thời gian thực và tăng khả năng linh hoạt của hệ thống DRFM trong tương lai. Tuy nhiên, nghiên cứu cũng chỉ ra một số hạn chế như khả năng xử lý tín hiệu theo thời gian thực còn bị giới hạn bởi tốc độ xử lý của phần cứng và các thuật toán hiện hành. Trong tương lai, việc kết hợp thêm các nền tảng phần cứng mạnh mẽ hơn như FPGA hoặc các giải pháp DSP tiên tiến sẽ góp phần cải thiện đáng kể hiệu suất tổng thể của hệ thống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] P. Li, J. Yang, and J. Lin, "Radar compound jamming recognition based on image segmentation and fused attention residual network," *Sensors*, vol. 25, Mar. 2025, Art. no. 2124, doi: 10.3390/s25072124.
- [2] E. G. Friedel, "Convolutional neural network (CNN) for digital radio frequency memory (DRFM)," M.S. thesis, Dept. Appl. & Comput. Math., Johns Hopkins, Hopkins University, Baltimore, MD, USA, 2023.
- [3] B. Han, X. Qu, X. Yang, W. Li, and Z. Zhang, "DRFM-based repeater jamming reconstruction and cancellation method with accurate edge detection," *Remote Sens.*, vol. 15, no. 7, Mar. 2023, Art. no. 1759, doi: 10.3390/rs15071759.
- [4] K. Davidson and J. Bray, "Understanding digital radio frequency memory performance in countermeasure design," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 12, Jun. 2020, Art. no. 4123, doi: 10.3390/app10124123.
- [5] C. P. Heagney, "Digital radio frequency memory synthetic instrument enhancing U.S. Navy automated test equipment mission," in *Proc. 2016 IEEE AUTOTESTCON*, Anaheim, CA, USA, Sept. 2016, pp. 1-8.
- [6] M. İspir, A. Orduyılmaz, M. Serin, A. Yıldırım, and A. C. Gürbüz, "Real-time multiple velocity false target generation in digital radio frequency memory," in *Proc. IEEE Radar Conf.*, Philadelphia, PA, USA, May 2016, pp. 1-6.
- [7] M. B. Mesarick, D. W. O'Hagan, and S. Paine, "Low-cost FPGA-based implementation of a DRFM system," in *Proc. 2019 IEEE Radar Conf.*, Boston, MA, USA, Apr. 2019, pp. 1-5.
- [8] L. Yin, M. Xie, H. Li, C. Wang, and X. Fu, "Design and implementation of the digital radio frequency memory system based on advanced extensible interface 4.0," in *Proc. 9th Int. Congr. Image Signal Process., Bio-Med. Eng. & Informatics (CISP-BMEI)*, Datong, China, Oct. 2016, pp. 1307-1311.
- [9] O. Ozdil, M. İspir, I. E. Ortatatli, and A. Yildirim, "Channelized DRFM for wideband signals," *Tech. Rep.*, Tubitak Bilgem İltaren, Ankara, Turkey, 2014.