

NGHIÊN CỨU PHÁT TRIỂN BỘ THU MỀM HỆ THỐNG THÔNG TIN TƯƠNG TỰ DỰA TRÊN CÔNG NGHỆ RTL-SDR PHỤC VỤ ĐÀO TẠO

RESEARCH ON DEPLOYING AN EDUCATIONAL ANALOGUE COMMUNICATION RECEIVERS BASED ON RTL-SDR

NGUYỄN PHƯƠNG LÂM, PHẠM VIỆT HƯNG*

Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: phamviethung@vamaru.edu.vn

Tóm tắt

Hiện nay, các bộ thu cho hệ thống thông tin tương tự và thông tin số dựa trên công nghệ vô tuyến điều khiển bằng phần mềm (SDR) được ứng dụng nhiều trong thực tế. Với các nền tảng phần cứng RTL-SDR (Realtek SDR), khả năng sử dụng và tích hợp môi trường lập trình Matlab/Simulink giúp cho việc phát triển các hệ thống SDR sẽ dễ dàng hơn. Việc phát triển các bộ thu RTL-SDR sẽ tạo ra các mô hình học tập thuận tiện, bổ ích và thiết thực cho cả giảng viên và sinh viên. Bài báo này giới thiệu phát triển một bộ thu mềm RTL-SDR cho hệ thống thông tin tương tự sử dụng điều tần (FM - Frequency Modulation). Bộ thu FM RTL-SDR có thể làm việc để thu được tín hiệu FM của các đài phát thanh FM như Hải Phòng, tại tần số 93,7MHz.

Từ khóa: Vô tuyến điều khiển bằng phần mềm, RTL-SDR, điều chế FM, giải điều chế FM.

Abstract

Nowadays, analog receivers based on Software Defined Radio (SDR) have many applications. Since the availability of hardware platform of RTL-SDR (Realtek SDR), many devices with very low cost and interact with Matlab/Simulink allow many real SDR systems be developed. Developing RTL-SDR receivers creates useful tools and actual system models for lecturers and students. In this paper, a RTL-SDR receiver for FM communications is presented. The presented receiver can receive FM signals of FM stations such as Haiphong TV at 93,7MHz.

Keywords: Software Defined Radio, RTL-SDR, FM modulation, FM demodulation.

1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, công nghệ vô tuyến điều khiển bằng phần mềm (SDR - Software Defined Radio) trở thành một hướng nghiên cứu và phát triển rộng rãi và đáng quan tâm. Ban đầu, công nghệ SDR

được sử dụng chủ yếu trong quân sự để truyền thông giữa các thiết bị đòi hỏi tính bảo mật [1]. Sau đó, các ứng dụng trong dân sự như điện thoại di động cũng sử dụng công nghệ SDR để có thể hoạt động với nhiều tiêu chuẩn khác nhau. Các hệ thống như thông tin di động, truyền hình số, phát thanh quảng bá, truyền hình quảng bá, mạng WLAN (Wireless Local Area Network) tồn tại nhiều chuẩn truyền thông khác nhau. Các chuẩn này đòi hỏi nhiều thiết bị điện tử phức tạp, làm tăng giá thành các hệ thống. Để giảm giá thành, các kiến trúc dành riêng được phát triển. Nếu các kiến trúc chuyên biệt này được sử dụng để phát triển các sản phẩm, việc nâng cấp thiết bị hoặc hệ thống nhằm tương thích với một tiêu chuẩn mới hoặc bổ sung thêm các tính năng mới sẽ gặp rất nhiều khó khăn. Giải pháp sử dụng SDR sẽ giải quyết được vấn đề này. Với các kiến trúc SDR đủ mạnh và khả trình, các hệ thống sử dụng SDR có thể đáp ứng, tương thích với nhiều chuẩn khác nhau trên cùng một nền tảng thiết bị. Các hệ thống vô tuyến khả trình như vậy có thể dễ dàng được nâng cấp để khắc phục các lỗi (bug) hoặc thêm các chức năng và hỗ trợ các chuẩn mới. Đồng thời, với SDR, các vấn đề, lỗi về phần cứng sẽ chuyển đổi thành các vấn đề, lỗi về phần mềm nên việc xử lý sẽ trở nên thuận tiện và linh hoạt hơn. Các bộ thu SDR lý tưởng có thành phần đầu cuối sử dụng phần cứng rất nhỏ, chỉ có anten và một bộ lấy mẫu tốc độ cao cỡ GHz để thực hiện thu và số hóa được cả những tín hiệu băng rộng ở các tần số vô tuyến. Hầu hết các khối xử lý chính như bộ trộn, bộ lọc, bộ điều chế và bộ giải điều chế trong các hệ thống truyền thông vô tuyến đều được thay thế bằng SDR. Với thiết bị RTL-SDR (Realtek SDR) có chi phí tương đối rẻ, công nghệ SDR càng trở thành một động lực nghiên cứu, phát triển cho các kỹ sư truyền thông cũng như cho sinh viên, học viên sau đại học [2-4]. Khi các thiết bị RTL-SDR được phát triển cùng với các trình điều khiển mã nguồn mở, thiết bị RTL-SDR càng được sử dụng một cách phổ biến hơn để xử lý với các tín hiệu vô tuyến (RF) cũng như tín hiệu I/Q (Inphase/Quadrature) số hóa có dải tần từ 25MHz đến 1,75GHz [5-7]. Dải tần làm việc rộng như vậy giúp cho thiết bị RTL-SDR có

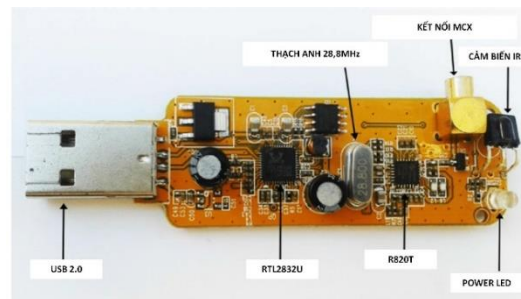
thể xử lý được với các tín hiệu như tín hiệu FM (FM - Frequency Modulation), tín hiệu GSM (Global System for Mobile Communications), tín hiệu 3G, tín hiệu GPS (Global Positioning System),... Bài báo này phát triển một bộ thu cho hệ thống thông tin tương tự sử dụng điều tần (bộ thu FM), trong đó sẽ thực hiện các cơ chế điều chế khác nhau sử dụng thiết bị RTL-SDR, đồng thời kết hợp với Matlab/Simulink [8] để thiết kế và triển khai các chức năng của bộ thu FM. Với mục đích phục vụ đào tạo, bộ thu FM sử dụng RTL-SDR có thể dễ dàng thay đổi các thông số hệ thống, điều chỉnh để thu được tín hiệu của đài FM Hải Phòng tại tần số 93,7MHz. Việc phát triển một bộ thu FM ngay trên máy tính PC hoặc laptop và dễ dàng quan sát, điều chỉnh các tham số kỹ thuật sẽ giúp cho sinh viên, học viên sau đại học lĩnh vực điện tử truyền thông hiểu sâu sắc hơn về cơ chế hoạt động, đặc điểm kỹ thuật của hệ thống thông tin tương tự FM cũng như các hệ thống thông tin tương tự khác như AM (Amplitude Modulation). Ưu điểm của bộ thu FM này là khả năng dễ dàng quan sát được phổ tần số, dạng sóng miền thời gian của các tín hiệu FM trong khu vực đặt bộ thu. Đồng thời, có thể điều chỉnh linh hoạt các tham số của bộ thu, các phương thức tách sóng khác nhau cho bộ thu, hoặc các dạng bộ thu khác nhau (1 kênh - mono hoặc 2 kênh - stereo).

Bài báo gồm có các phần sau: Phần 2 mô tả sơ đồ khối và các chức năng cơ bản của thiết bị RTL-SDR. Kiến trúc bộ thu FM sử dụng RTL-SDR kết hợp Matlab/Simulink được đưa ra ở phần 3 và kết quả thử nghiệm bộ thu FM này được trình bày ở phần 4. Cuối cùng, phần 5 đưa ra một số kết luận và hướng phát triển.

2. Cấu trúc thiết bị RTL-SDR

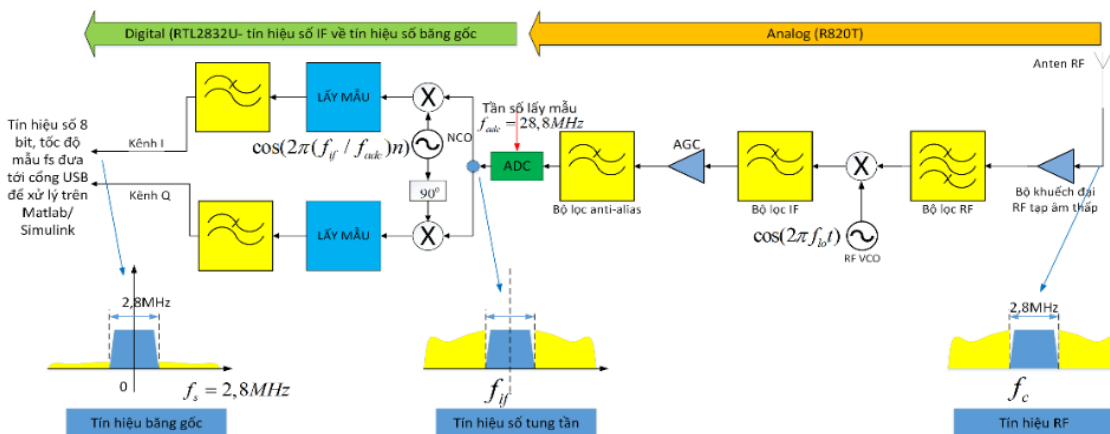
RTL-SDR là một thiết bị có giá thành rẻ, nhỏ gọn,

dễ dàng sử dụng chuẩn kết nối USB để thu nhận các tín hiệu RF (Radio Frequency) như minh họa ở Hình 1[5]. Đây là một sản phẩm được chế tạo bởi hãng NooElec. Ban đầu các thiết bị này được sử dụng cho dịch vụ truyền số mặt đất quảng bá DVB-T (Digital Video Broadcasting - Terrestrial) với thành phần chipset là Realtek RTL2832U kết hợp với IC tuner như Rafael Micro 820T. RTL-SDR có thể dễ dàng hoạt động ở các chế độ khác nhau và có khả năng thu nhận bất kỳ tín hiệu RF nào trong phạm vi điều chỉnh của IC tuner. Dải tần làm việc của RTL-SDR từ 25MHz đến 1,75GHz. RTL-SDR thu nhận các tín hiệu RF, hạ tần xuống băng gốc, thực hiện số hóa tín hiệu. Các mẫu của tín hiệu số băng gốc được đưa ra cổng USB để truyền thông với máy tính.



Hình 1. Thiết bị RTL-SDR của NooElec

Để thực hiện xử lý tín hiệu, thiết bị RTL-SDR có các thành phần chức năng chính như minh họa ở Hình 2. Tín hiệu RF đi qua RT802T được hạ tần xuống tần số trung tần IF (Intermediate Frequency) nhờ bộ dao động điều khiển bằng điện áp VCO (Voltage - Controlled Oscillator). Bộ dao động VCO này khả trình và được điều khiển bởi RTL2832U. Sau khi qua bộ AGC (Automatic Gain Control), tín hiệu IF được tiếp tục hạ tần xuống



Hình 2. Sơ đồ khối chức năng các thành phần chính trong RTL-SDR

bằng gốc thông qua phương thức cơ bản như lọc, lấy mẫu tín hiệu lỗi ra bằng bộ chuyển đổi tương tự/số (ADC - Analog Digital Converter) và sau đó giải điều chế về băng gốc bằng bộ dao động điều khiển số (NCO - Numerically - Controlled Oscillator) cầu phương. Cuối cùng, các mẫu 2 kênh I/Q 8 bit được đưa ra cổng USB để có thể xử lý dữ liệu bằng phần mềm Matlab/Simulink cài đặt trên máy tính. Để thiết lập các chế độ làm việc khác nhau của RTL-SDR, các thông số như tần số trung tâm RF f_{RF} , tần số lấy mẫu băng gốc f_s và hệ số khuếch đại của bộ khuếch đại cao tần K có thể được thiết lập trên Matlab/Simulink.

3. Phát triển bộ thu tín hiệu FM sử dụng RTL-SDR

Để có thể giao tiếp được với thiết bị RTL-SDR, Mathworks đã cung cấp gói hỗ trợ phần cứng cho RTL-SDR cho phép Matlab và Simulink có thể giao tiếp và điều khiển RTL-SDR. Khi đó, các mẫu tín hiệu băng gốc lỗi ra từ RTL-SDR được đưa đến môi trường phần mềm để cho phép người sử dụng có thể triển khai các dạng khác nhau của bộ thu ở dạng mô hình Simulink hoặc chương trình Matlab. Các dữ liệu kênh I/Q có thể được lưu trữ dưới dạng file và xử lý khi cần thiết hoặc với thiết bị máy tính PC đủ mạnh, các dữ liệu này có thể được giải điều chế, giải mã thời gian thực.

Tần số trung tâm được thiết lập ở giá trị $f_{RF} = 93,7\text{MHz}$. Tần số lấy mẫu băng gốc được thiết lập ở giá trị $f_s = 2,4\text{MHz}$; thiết lập hệ số khuếch đại $K = 50$, hệ số này có thể được điều chỉnh tùy thuộc vào chất lượng của tín hiệu FM thu được.

Tín hiệu vô tuyến FM $s_{fmRF}(t)$ thu bởi RTL-SDR [9] có dạng:

$$s_{fmRF}(t) = A_c \cos \left(\omega_c t + 2\pi K_{fm} \cdot \int_{-\infty}^t s_i(t) dt \right) \quad (1)$$

Trong đó $s_i(t)$ là tín hiệu bản tin; K_{fm} là hằng số điều chế FM.

Tín hiệu này được trộn tần với tín hiệu dao động VCO tần số f_0 để hạ tần về tín hiệu băng gốc dạng phức. Tín hiệu lỗi ra của RTL-SDR sẽ có dạng

$$s_{RTL-SDR}(t) = LPF[s_{fmRF}(t) \cdot e^{-j\omega_{lo}t}] \quad (2)$$

Trong đó: $e^{-j\omega_{lo}t}$ là tín hiệu phức của bộ VCO.

Tín hiệu hạ tần $s_{bband}(t)$ sẽ là:

$$s_{bband}(t) = s_{fmRF}(t) \cdot e^{-j\omega_{lo}t} = s_{fmRF}(t) \cdot (\cos(\omega_{lo}t) - j\sin(\omega_{lo}t)) = A_c \cos(\omega_c t + \theta_{fm}(t)) \cdot (\cos(\omega_{lo}t) - j\sin(\omega_{lo}t)) \quad (3)$$

Trong đó: $\theta_{fm}(t) = 2\pi K_{fm} \cdot \int_{-\infty}^t s_i(t) dt$

Tín hiệu $s_{bband}(t)$ đi qua bộ lọc thông thấp để loại bỏ thành phần tần số cao, chỉ còn lại thành phần tín hiệu băng gốc dạng phức:

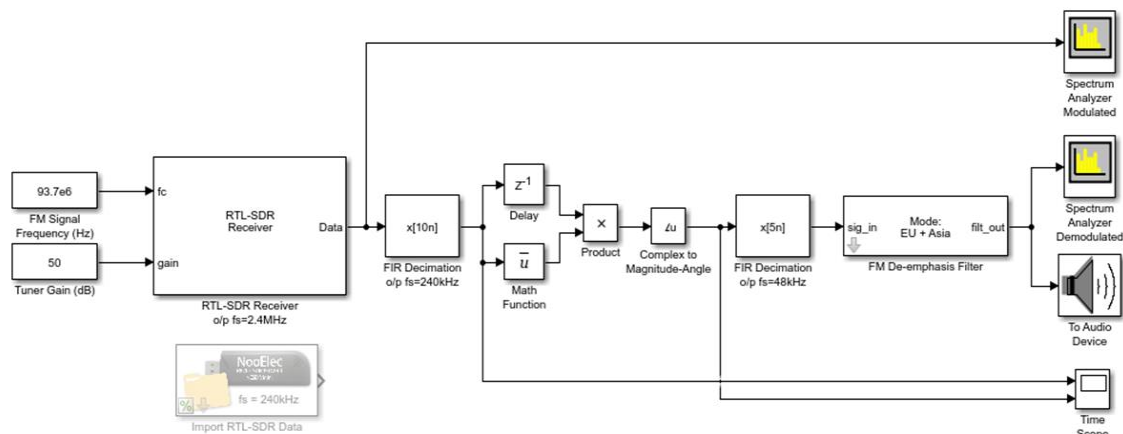
$$s_{RTL-SDR}(t) = \frac{A_c}{2} [\cos(\omega_c t + \theta_{fm}(t) - \omega_{lo}t) + j\sin(\omega_c t + \theta_{fm}(t) - \omega_{lo}t)] \quad (4)$$

Trong trường hợp lý tưởng, tần số f_0 sử dụng để giải điều chế và tần số của sóng mang tới f_c xấp xỉ nhau, có thể bằng nhau nên đặt: $f_{\Delta} = f_c - f_0$ (hoặc $\omega_{\Delta} = \omega_c - \omega_0$).

Do đó, tín hiệu RF sẽ được giải điều chế hoàn hảo về tín hiệu băng gốc phức:

$$s_{RTL-SDR}(t) = \frac{A_c}{2} e^{j(\omega_{\Delta} t + 2\pi K_{fm} \cdot \int_{-\infty}^t s_i(t) dt)} \quad (5)$$

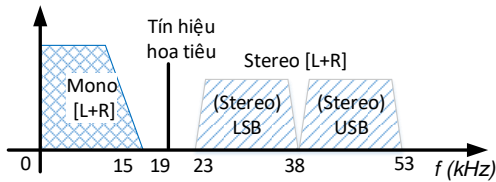
Tín hiệu FM dạng phức trên chính là các mẫu băng gốc đưa đến nền tảng Matlab/Simulink. Trong Simulink, các thành phần giao tiếp được với RTL-SDR được đặt vào trong mô hình cùng với các thành phần để thực hiện bộ giải điều chế. Đầu ra của khối điều chế là tín hiệu âm thanh được đưa đến loa của máy tính.



Hình 3. Sơ đồ bộ thu FM mono RTL-SDR

3.1. Bộ thu FM 1 kênh (mono)

Mô hình Simulink để thực hiện giải điều chế tín hiệu FM từ RTL-SDR được minh họa ở H.3.2 Bộ thu FM 2 kênh (stereo)



Hình 4. Phổ băng gốc của tín hiệu FM được ghép kênh

Trong trường hợp đài phát FM thực hiện phát 2 kênh (chế độ stereo) trong khi vẫn duy trì chế độ phát mono cho các bộ thu FM mono. Khi đó, phía phát thực hiện tách hai thành phần “Mono” và “Stereo”, trong đó, kênh “mono” được hạn băng trong khoảng 15kHz, mỗi kênh “stereo” cũng có một khoảng băng thông 15kHz, sau đó các kênh này được thực hiện ghép kênh và sử dụng một sóng mang 19kHz gọi là tín hiệu hoa tiêu (Pilot tone) như minh họa ở Hình 4.

Bộ thu FM stereo có thể được cải tiến từ bộ thu FM mono đã triển khai ở trên và có thêm một số thay đổi thông số cấu hình. Do tín hiệu FM stereo có dải tần số đến 53kHz vì vậy, tần số lấy mẫu của khối FIR decimation phải nâng lên 120kHz thay vì chỉ là 48kHz như trong bộ thu FM mono.

Ngoài ra, cần phải bổ sung thêm khối tách kênh FM stereo. Khối tách kênh thực hiện các xử lý như

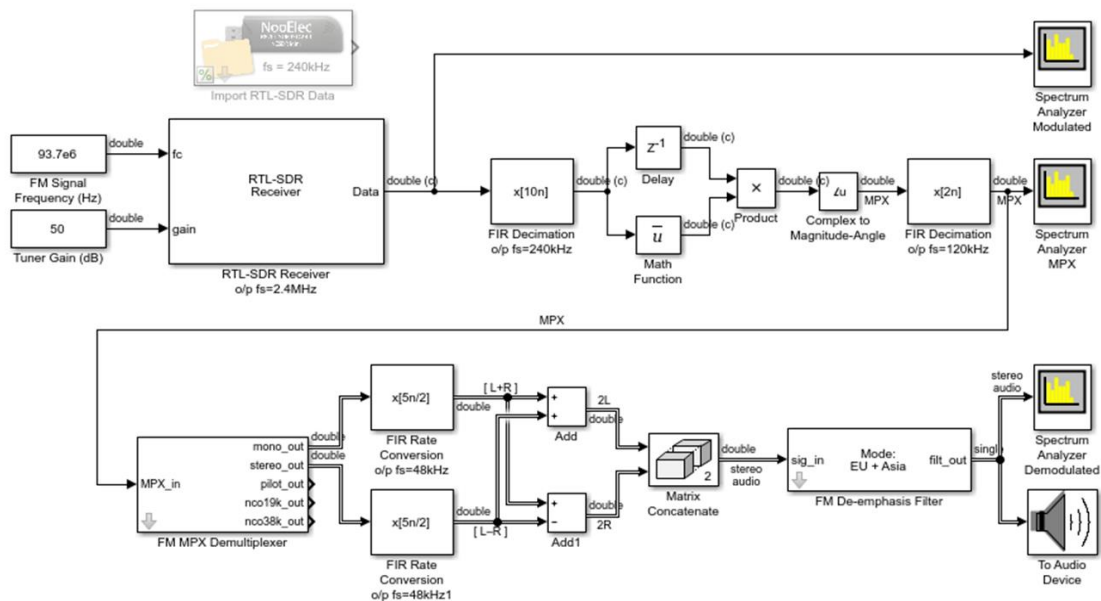
tách tín hiệu hoa tiêu 19kHz; nhân đôi tần số để được tín hiệu 38kHz và sử dụng nó để giải điều chế các thành phần stereo, giải mã stereo để lọc các kênh mono và stereo ở lối ra. Do đó, mô hình Simulink của bộ thu stereo RTL-SDR được minh họa ở Hình 5.

4. Kết quả và đánh giá

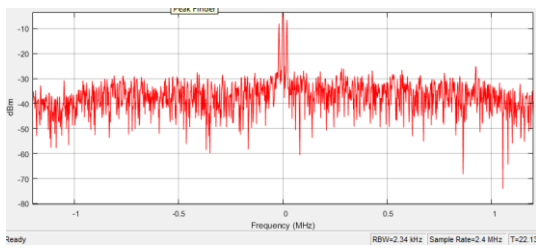
Đặc trưng của tín hiệu FM được đánh giá ở cả miền tần số và miền thời gian. Trong miền tần số, phổ của tín hiệu FM thu được từ bộ thu RTL-SDR có bề rộng phổ 240kHz hoặc 2,4MHz tùy thuộc vào cấu hình trong bộ thu. Bên cạnh đó, phổ của tín hiệu giải điều chế cũng được đánh giá. Trong miền thời gian, dạng sóng của tín hiệu trước giải điều chế được quan sát ở các dạng gồm tín hiệu dạng phức (kênh I/Q) và tín hiệu bản tin sau giải điều chế.

4.1. Bộ thu FM mono

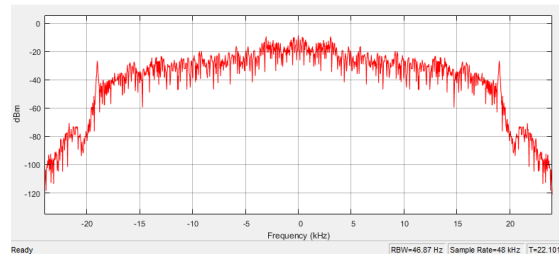
Các kết quả triển khai bộ thu FM mono được thể hiện ở Hình 6, Hình 7 và Hình 8. Hình 6 là phổ của tín hiệu FM trước giải điều chế. Đây chính là tín hiệu FM được thu bởi bộ thu RTL-SDR. Quan sát phổ này nhận thấy có vùng tần số quanh tần số sóng mang 93.7MHz có tín hiệu FM với bề rộng phổ khoảng 2,4MHz. Phổ của tín hiệu FM sau giải điều chế được minh họa ở Hình 7, phổ này có bề rộng khoảng 20kHz. Dạng sóng miền thời gian của các tín hiệu kênh I, kênh Q và dạng sóng của tín hiệu băng gốc thu được từ bộ thu RTL-SDR được minh họa ở Hình 8. Biên độ của các tín hiệu kênh I, kênh Q và tín hiệu băng gốc sẽ có sự thay đổi khác nhau tùy thuộc vào thông tin, nội dung bản tin tại thời điểm đó của đài phát.



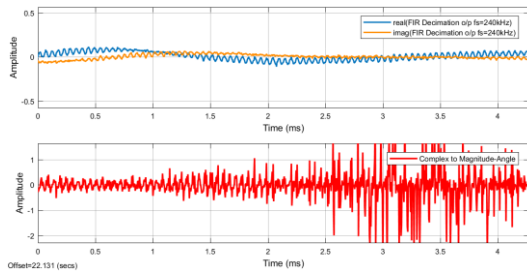
Hình 5. Sơ đồ bộ thu FM stereo RTL-SDR



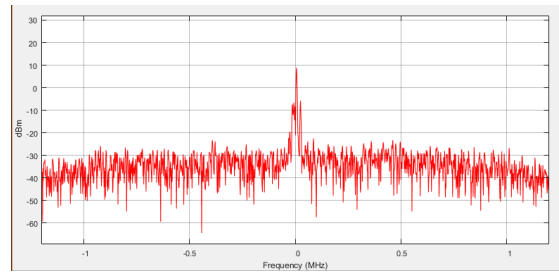
Hình 6. Phổ tín hiệu lối vào bộ giải điều chế FM



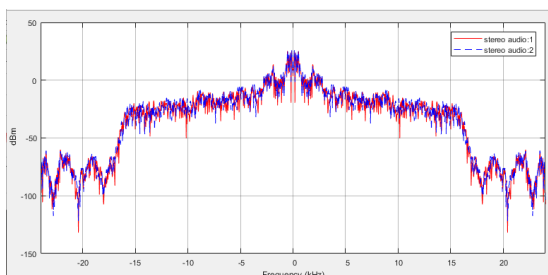
Hình 7. Phổ tín hiệu FM mono ở lối ra



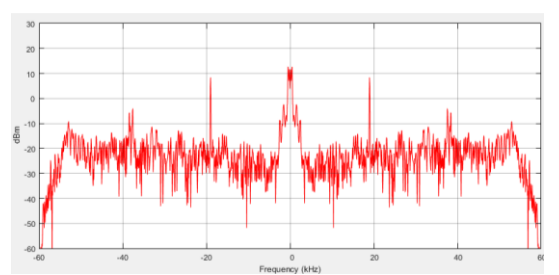
Hình 8. Dạng sóng tín hiệu FM thu được



Hình 9. Phổ tín hiệu lối vào bộ giải điều chế FM



Hình 10. Phổ tín hiệu lối ra bộ giải điều chế FM stereo



Hình 11. Phổ tín hiệu lối vào bộ tách kênh FM stereo

4.2. Bộ thu FM stereo

Đối với bộ thu FM stereo, các kết quả đánh giá hiệu năng hoạt động của bộ thu RTL-SDR được thể hiện ở Hình 9, Hình 10 và Hình 11. Hình 9 là phổ của tín hiệu FM trước giải điều chế. Hình 9 và Hình 5 là giống nhau khi đều thể hiện phổ của tín hiệu FM thu được từ bộ thu RTL-SDR và đó là tín hiệu ở lối vào bộ giải điều chế, sau khi đã qua các quá trình hạ tần từ cao tần RF về dạng số bằng góc ở trong module RTL-SDR. Phổ của tín hiệu FM stereo ở lối ra audio của bộ thu được thể hiện ở Hình 10. Do bộ thu FM stereo này được cải tiến và bổ sung từ bộ thu FM mono bằng cách thêm các khối xử lý tín hiệu FM stereo nên trên hình 10 có 2 tín hiệu, tương ứng với 1 tín hiệu mono và 1 tín hiệu kênh stereo. Hai tín hiệu audio thu được này có phổ cỡ khoảng 15kHz mỗi kênh, đúng như mô tả ở Hình 4. Cuối cùng, Hình 11 thể hiện phổ của tín hiệu FM stereo ở lối vào bộ tách kênh FM stereo. Đúng như mô tả lý thuyết ở Hình 4, quan sát Hình 11 cho thấy phổ của tín hiệu FM stereo

cỡ khoảng 53kHz. Nếu muốn quan sát được phổ của cả 3 kênh gồm 1 kênh mono và 2 kênh stereo, bộ thu FM stereo sẽ phải sử dụng cấu trúc thu khác như cấu trúc giải điều chế FM sử dụng bộ tách sóng đường bao.

So sánh Hình 7 và Hình 10 để thấy được sự khác nhau của tín hiệu lối ra của 2 bộ thu FM mono và FM stereo. Rõ ràng bộ thu FM stereo cho tín hiệu audio lối ra ở 2 kênh độc lập trong khi bộ thu FM mono chỉ có được 1 kênh tín hiệu. Điều đó sẽ mang đến chất lượng tín hiệu, chất lượng âm thanh của bộ thu FM stereo sẽ khác biệt rõ rệt so với bộ thu FM mono.

5. Kết luận

Bộ thu FM sử dụng cấu trúc RTL-SDR được thiết kế và triển khai trên nền tảng Matlab/Simulink có độ linh hoạt cao, có thể dễ dàng thay đổi sang các cấu trúc thu khác nhau. Các cấu trúc thu tín hiệu FM có thể triển khai cho bộ thu RTL-SDR như: bộ thu FM

mono sử dụng tách sóng dạng phức, bộ thu FM stereo sử dụng tách sóng dạng phức hoặc tách sóng đường bao. Đồng thời, ưu điểm của bộ thu RTL-SDR còn có thể dễ dàng quan sát được tín hiệu ở bất kỳ khâu xử lý tín hiệu nào trên bộ thu cả mở miền thời gian và miền tần số. Bộ thu RTL-SDR sẽ rất tiện dụng, hữu ích trong quá trình đào tạo, nghiên cứu và triển khai các dạng bộ thu khác nhau như bộ thu AM, bộ thu thông tin số,...

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT21-22.53**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] T. Ulversoy, *Software defined radio: Challenges and opportunities*, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol.12, No.4, 2010.
<https://doi.org/10.1109/SURV.2010.032910.00019>
- [2] A. L. Reis, A. F. Selva, K. G. Lenzi, S. E. Barbin, and L. G. Meloni, *Software defined radio on digital communications: A new teaching tool*, WAMICON 2012 IEEE Wireless & Microwave Technology Conference, IEEE, 2012.
<https://doi.org/10.1109/WAMICON.2012.6208436>
- [3] E. Grayver, *Implementing software defined radio*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [4] P. S. Narayana, M. S. Kumar, A. K. Kishan, and K. Suraj, *Design approach for wideband FM receiver using RTL-SDR and raspberry PI*, International Journal of Engineering &

Technology, Vol.7, No.2.31, pp.9-12, 2018.

- [5] R. Stewart, K. Barlee, and D. Atkinson, *Software Defined Radio using the MATLAB & Simulink and the RTL-SDR*, Strathclyde Academic Media, ISBN 978-0-9929787-2-3, 2015.
- [6] S. Meshram and N. Kolhare, *The advent software defined radio: FM receiver with RTL SDR and GNU radio*, International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT), IEEE, 2019.
<https://doi.org/10.1109/ICSSIT46314.2019.8987588>
- [7] R. Aguilar-Gonzalez, A. Prieto-Guerrero, V. Ramos, E. Santos-Luna, and M. Lopez-Benitez, *A comparative study of RTL-SDR dongles from the perspective of the final consumer*, IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), IEEE, 2020.
<https://doi.org/10.1109/ICCE46568.2020.9043161>
- [8] A. B. Sergienko, *Software-defined radio in MATLAB Simulink with RTL-SDR hardware*, International Conference on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (ICCTPEA), IEEE, 2014.
<https://doi.org/10.1109/ICCTPEA.2014.6893337>
- [9] R. W. Stewart et al., *A low-cost desktop software defined radio design environment using MATLAB, simulink, and the RTL-SDR*, IEEE Communications Magazine, Vol.53, No.9, 2015.
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7263347>

Ngày nhận bài:	16/03/2022
Ngày nhận bản sửa:	23/03/2022
Ngày duyệt đăng:	29/03/2022