

## **Nghiên cứu thiết kế, chế thử modem vô tuyến có trải phổ nhảy tần**

Tạ Chí Hiếu\*, Nguyễn Ngọc Hải

Khoa Vô tuyến Điện tử, Học viện Kỹ thuật Quân sự.

\*Email: hieunda@gmail.com

Nhận bài: 30/6/2023; Hoàn thiện: 13/8/2023; Chấp nhận đăng: 18/8/2023; Xuất bản: 25/10/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.90.2023.55-64>

### **TÓM TẮT**

*Bài báo trình bày một giải pháp điều khiển nhảy tần cho thiết bị thu phát vô tuyến. Giải pháp được đề xuất ở đây cho phép điều khiển nhảy tần đồng bộ giữa máy thu và máy phát, đồng thời còn cho phép máy thu khôi phục lại đồng bộ sau khi bị mất đồng bộ. Để kiểm tra hoạt động của thuật toán, nhóm nghiên cứu đã tiến hành chế tạo thử modem vô tuyến có trải phổ nhảy tần. Với sản phẩm mẫu là 2 loại modem vô tuyến dựa trên hai loại vi mạch thu phát khác nhau, kết quả thử nghiệm cho thấy phần mềm điều khiển nhảy tần của cả 2 loại modem đã làm việc đúng yêu cầu đề ra, cả 2 loại modem được thiết kế đều cho phép truyền dữ liệu một cách tin cậy trong khi vẫn đảm bảo nhảy tần đồng bộ cũng như cho phép tự khôi phục lại đồng bộ sau khi bị mất đồng bộ trong quá trình hoạt động.*

**Từ khoá:** Trải phổ nhảy tần; Đồng bộ; Modem vô tuyến.

### **1. MỞ ĐẦU**

Các hệ thống thông tin trải phổ nhảy tần (Frequency Hopping Spread Spectrum – FHSS) được ứng dụng khá phổ biến, đặc biệt là trong thông tin quân sự. Kỹ thuật trải phổ nhảy tần có một số ưu điểm nổi bật như khả năng chống nhiễu tốt do tần số công tác có thể thay đổi ngẫu nhiên trên một dải tần rộng, xác suất bị phát hiện và thu chặn thấp, có thể hỗ trợ đa truy nhập,... Nhờ những đặc điểm vừa nêu, cho đến ngày nay kỹ thuật FHSS vẫn được ứng dụng rộng rãi, đặc biệt là trong các hệ thống IoT, các hệ thống điều khiển và đo xa vô tuyến [1, 4].

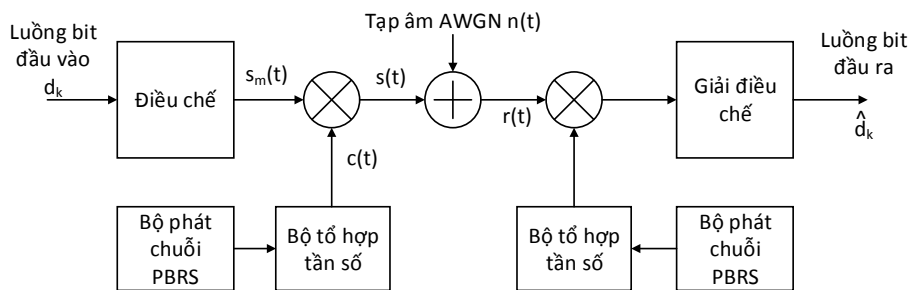
Trong những năm gần đây, các thiết bị bay không người lái (Unmanned Aerial Vehicle - UAV) ngày càng chứng tỏ có vai trò quan trọng hơn trong cả các lĩnh vực dân sự và quân sự. Để đảm bảo hoạt động cho các thiết bị này, một hệ thống không thể thiếu chính là hệ thống truyền tin vô tuyến. Đối với các hệ thống UAV dùng trong quân sự yêu cầu cự ly thông tin phải đủ xa (từ hàng chục đến hàng trăm km), đặc biệt là việc truyền tin phải đảm bảo tránh bị phát hiện, gây nhiễu [3]. Do đó, nhu cầu đặt ra là cần có các hệ thống thông tin vô tuyến đảm bảo đủ gọn nhẹ để tích hợp lên UAV đồng thời có tích hợp các biện pháp để đảm bảo tính bí mật và khả năng chống nhiễu như trải phổ, mã hóa,...

Trong số các thiết bị thông tin vô tuyến hiện đang dùng trong quân sự, có thể thấy rằng các điện đài hoạt động trong dải sóng cực ngắn hoặc các dải tần số rất cao (Very-High Frequency - VHF) hoặc siêu cao (Ultra-High Frequency - UHF) hầu hết đều có tính năng trải phổ nhảy tần, tuy nhiên, chúng khá cồng kềnh do đó không phù hợp với ứng dụng trên các UAV. Bên cạnh đó, các modem vô tuyến đã có trên thị trường hiện nay tuy gọn nhẹ hơn các điện đài quân sự nhưng lại có công suất thấp, không phù hợp với những ứng dụng mà ở đó cự ly liên lạc yêu cầu lên đến hàng chục km. Đồng thời, mặc dù đã có nhiều tài liệu trình bày về các kỹ thuật trải phổ nói chung và kỹ thuật trải phổ nhảy tần nói riêng [2, 5, 6], tuy nhiên, theo hiểu biết của nhóm nghiên cứu, cho đến nay chưa có tài liệu nào trình bày cụ thể về thuật toán điều khiển nhảy tần, đặc biệt là thuật toán tìm kiếm và khôi phục đồng bộ giữa hai phía thu và phát. Để chủ động về công nghệ trong thiết kế, chế tạo modem truyền số liệu vô tuyến nhằm ứng dụng cho các phương tiện bay không người lái và robot có khả năng hoạt động trong điều kiện bị trinh sát, gây nhiễu, trong bài báo này chúng tôi sẽ đề xuất một giải pháp thiết kế thuật toán điều khiển nhảy tần, sau đó tiến hành thiết kế, chế thử modem có trải phổ nhảy tần để kiểm chứng thuật toán được đề xuất.

Cấu trúc của bài báo như sau: Phần mở đầu được trình bày trong mục 1. Mục 2 trình bày về thiết kế cấu trúc phần cứng và cấu trúc của firmware điều khiển modem và mục 3 trình bày các kết quả thử nghiệm và thảo luận. Các kết luận được trình bày trong mục 4.

## 2. CẤU TRÚC MODEM VÔ TUYẾN CÓ TRẢI PHỔ NHẢY TẦN

Mô hình của hệ thống thông tin FHSS điển hình [2] được mô tả trên hình 1. Việc nhảy tần được thực hiện bằng cách thay đổi tần số tín hiệu sóng mang  $c(t)$ . Trên cơ sở các chuỗi giả ngẫu nhiên (Pseudo-Random Bit Sequence - PRBS) được tạo ra bởi bộ phát chuỗi PRBS, bộ tổ hợp tần số sẽ chọn các tần số tương ứng cho tín hiệu sóng mang để thực hiện trộn với luồng symbol sẽ phát đi. Như vậy, có thể thấy rằng, tín hiệu phát thực chất là một chuỗi gồm các đoạn tín hiệu với các tần số mang khác nhau, mỗi đoạn có độ dài bằng chu kỳ nhảy tần. Tùy thuộc vào quan hệ giữa tốc độ nhảy tần và tốc độ symbol mà ta có thể có chế độ nhảy tần nhanh hay chế độ nhảy tần chậm.



Hình 1. Sơ đồ khối của hệ thống thông tin vô tuyến có trải phổ nhảy tần.

Ở phía thu, tín hiệu thu  $r(t)$  được trộn với tín hiệu ngoại sai có cấu trúc giống hệt tín hiệu  $c(t)$  ở phía phát. Việc đảm bảo cho cấu trúc tín hiệu ngoại sai và tín hiệu  $c(t)$  hoàn toàn giống nhau đạt được là nhờ cơ chế đồng bộ quy luật nhảy tần ở cả phía thu và phía phát.

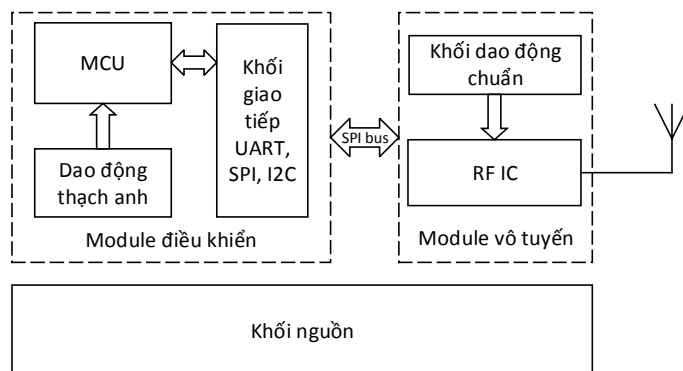
### 2.1. Cấu trúc phần cứng

Từ cấu trúc của hệ thống thông tin vô tuyến có trải phổ nhảy tần trên hình 1, chúng tôi đề xuất cấu trúc của thiết bị thu phát vô tuyến FHSS gồm 2 thành phần chính. Thứ nhất là mô đun điều khiển, có nhiệm vụ thực hiện chương trình điều khiển các giao thức truyền tin và đặc biệt là thực hiện đồng bộ nhảy tần giữa phía thu và phía phát. Thứ hai là mô đun vô tuyến, có nhiệm vụ tạo mạng tần số và thực hiện các kỹ thuật xử lý tín hiệu trong hệ thống thông tin như điều chế, giải điều chế,... Mô đun điều khiển được kết nối với mô đun vô tuyến thông qua giao tiếp ngoại vi nối tiếp (Serial Peripheral Interface - SPI). Cả hai mô đun này được cấp dao động từ hai khối dao động thạch anh để đảm bảo độ chính xác về thời gian. Sơ đồ khối cấu trúc phần cứng của modem vô tuyến được đề xuất được thể hiện trong hình 2.

#### 2.1.1. Lựa chọn linh kiện cho mô đun vô tuyến

Các mô đun vô tuyến trên thị trường hiện nay chủ yếu được các hãng sản xuất bán dẫn nghiên cứu phát triển và đóng gói dưới dạng mạch tích hợp (Integrated circuit - IC). Các IC này có đặc điểm chung là có bộ tổ hợp tần số tốc độ cao, cho phép cài đặt nhiều tần số sóng mang nhanh chóng. Đây cũng là yếu tố quyết định để có thể áp dụng thuật toán FHSS. Việc lựa chọn mạch tích hợp cho mô đun vô tuyến có một số ưu điểm cơ bản như cần thêm rất ít linh kiện ngoài, độ bền và độ ổn định cơ học cao, kích thước nhỏ gọn, tiêu tốn ít điện năng, phù hợp cho các ứng dụng với nguồn pin hoặc ắc quy. Một số IC phổ biến trên thị trường hiện nay gồm có: nRF24L01, A7105, CC1101, CC1200, Sx Sx1276, Sx1279,... Các IC này hoạt động trên các dải tần khác nhau như 2.4 GHz, 315-433 MHz, 868-915 MHz. Trong nghiên cứu này, chúng tôi lựa chọn hai loại IC khác nhau, một loại không có hỗ trợ trực tiếp cho kỹ thuật FHSS và một loại có hỗ trợ cho kỹ thuật FHSS. Với loại thứ nhất, chúng tôi lựa chọn IC

nRF24L01 của hãng Nordic Semiconductors và loại thứ hai chúng tôi lựa chọn IC Sx1278 của hãng Semtech. Các IC này có một đặc điểm chung là có thể đặt cấu hình và vận hành thông qua giao tiếp SPI, nhờ đó ta có thể thực hiện điều khiển nhảy tần và điều khiển truyền tin thông qua việc đặt các thanh ghi cấu hình của các IC này. Cấu trúc và nguyên tắc hoạt động của các IC này được mô tả chi tiết trong [8] và [9].



**Hình 2.** Sơ đồ khối của modem vô tuyến có trải phổ nhảy tần.

### 2.1.2. Lựa chọn linh kiện cho mô đun điều khiển

Để thực hiện việc giao tiếp với module và thực hiện thuật toán FHSS, chúng tôi lựa chọn vi điều khiển STM32F103C8T6 [10]. Đây là vi điều khiển (Microcontroller Unit - MCU) có tốc độ cao sử dụng kiến trúc ARM tiên tiến, hỗ trợ rất nhiều ngoại vi, khả năng chống nhiễu tốt, hỗ trợ nhiều công cụ phát triển, giá thành thấp và rất phổ biến.

## 2.2. Cấu trúc phần mềm điều khiển

Như trình bày ở trên, mô đun điều khiển sẽ có nhiệm vụ điều khiển toàn bộ quá trình hoạt động của modem vô tuyến, bao gồm đồng bộ, truyền tin, nhảy tần,... Các tham số của mô đun thu phát sẽ được chương trình firmware trên mô đun điều khiển cấu hình qua các thanh ghi của IC thu phát.

Tham số quan trọng nhất cần phải cấu hình khi thực hiện trải phổ nhảy tần chính là tần số sóng mang, ở đây, để ngắn gọn ta gọi là kênh. Cả nRF24L01 và SX1278 đều sử dụng các bộ tổ hợp tần số được cấu hình qua thanh ghi. Do vậy, việc điều khiển nhảy tần số theo chuỗi PRBS thực chất là việc ghi các giá trị thích hợp vào các thanh ghi điều khiển bộ tổ hợp tần số để đạt được tần số sóng mang mong muốn. Việc tạo chuỗi PRBS có thể được thực hiện bằng cách sử dụng thanh ghi dịch. Tuy nhiên, để đảm bảo cho quá trình đồng bộ giữa phía thu và phía phát trong quá trình nhảy tần được nhanh và dễ dàng hơn, đa số các thiết bị thu phát có trải phổ nhảy tần đều sử dụng một bảng tần số được tạo trước theo một quy luật ngẫu nhiên và được nạp sẵn vào bộ nhớ của cả máy phát và máy thu. Khi thực hiện nhảy tần, dựa trên chỉ số kênh hiện thời MCU sẽ tìm trong bảng này giá trị tần số tương ứng với chỉ số kênh tiếp theo và gửi đến bộ tổ hợp tần số để thực hiện nhảy tần. Để đảm bảo tính bảo mật, sau một thời gian quy định nào đó, bảng tần số này sẽ được nạp lại. Thời gian nhảy tần được định thời bởi bộ định thời (timer) của MCU. Bài toán đồng bộ kênh ở đây trở thành việc đồng bộ một giá trị  $n$  là thứ tự kênh truyền trong bảng tra kênh.

Về cấu trúc, phần mềm firmware điều khiển hoạt động của modem vô tuyến có trải phổ nhảy tần gồm các mô đun chính như sau:

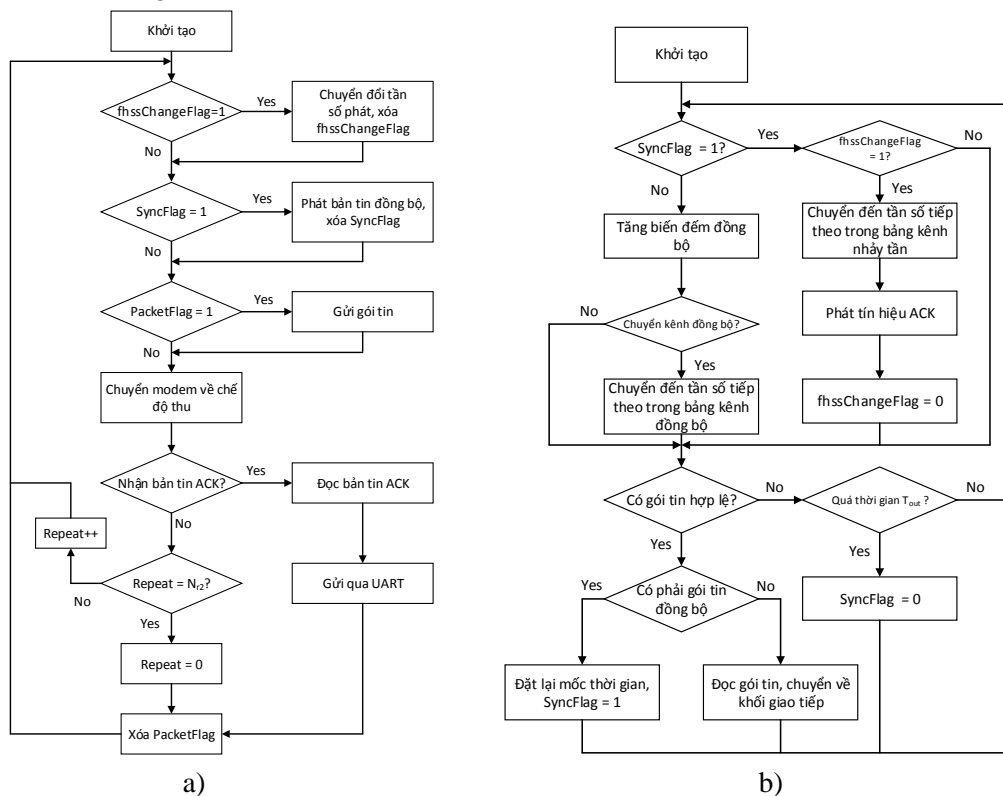
- Mô đun giao tiếp: Có nhiệm vụ đóng gói dữ liệu và điều khiển để đảm bảo tương thích với các giao tiếp truyền thông như USB, UART,...
- Mô đun khởi tạo phần cứng: Là mô đun chứa đoạn mã khởi tạo MCU, khởi tạo IC thu phát. Khi mới bật nguồn, chương trình sẽ gọi các hàm điều khiển và khởi tạo các tham số phần cứng của STM32 gồm timer, khởi tạo các mạch giao tiếp cần sử dụng như UART, SPI hoặc các giao

tiếp phần cứng khác, đồng thời qua giao tiếp SPI khởi tạo tham số cho IC thu phát. Tín hiệu đồng hồ sử dụng bộ dao động thạch anh và vòng khóa pha để nhân tần số và tạo ra tần số nhịp hệ thống (72MHz) cũng như tín hiệu xung nhịp cho các thành phần khác của MCU.

- Mô đun điều khiển nhảy tần và điều khiển thu/phát: Module này điều khiển IC thu phát thông qua giao tiếp SPI. Nó cung cấp các hàm điều khiển cơ bản và khởi tạo tất cả các thanh ghi của IC thu phát. Việc điều khiển nhảy tần bao gồm xác định thời gian nhảy tần, xác định tần số nhảy tiếp theo và điều khiển đồng bộ nhảy tần giữa phía thu và phía phát. Hoạt động của mô đun này được mô tả cụ thể hơn ở mục dưới đây.

### 2.3. Thuật toán điều khiển nhảy tần máy phát và máy thu

Trước hết cần lưu ý rằng, mỗi modem đều có tuyến phát và tuyến thu, và việc điều khiển nhảy tần trong quá trình liên lạc giữa hai modem bất kỳ sẽ liên quan đến cả tuyến thu và tuyến phát của mỗi modem. Lưu đồ thuật toán điều khiển hoạt động của máy phát và máy thu nhảy tần được thể hiện trong hình 3.



**Hình 3.** Lưu đồ thuật toán điều khiển máy phát và máy thu nhảy tần:  
 a) Thuật toán điều khiển máy phát; b) Thuật toán điều khiển máy thu.

Lưu đồ thuật toán điều khiển máy phát trên hình 3.a sử dụng 3 cờ nhớ là fhssChangeFlag, SyncFlag và PacketFlag. Cờ fhssChangeFlag được điều khiển bởi ngắt timer1. Cờ này được bật định kỳ sau mỗi khoảng thời gian  $T_h$ , chính là chu kỳ nhảy tần. Cờ fhssChangeFlag được sử dụng để báo hiệu thời điểm chuyển đổi tần số sóng mang theo bảng tra kênh. Cờ SyncFlag cũng được điều khiển bởi ngắt timer1, được bật định kỳ sau khoảng thời gian  $T_s$  ( $T_s = N_s T_h$ ), là thời gian định kỳ phát bản tin đồng bộ. Cờ này được sử dụng để báo hiệu thời điểm phát gói tin đồng bộ định kỳ nhằm duy trì đồng bộ thời gian giữa hai modem. Ở đây, mặc dù  $T_s$  là bội nguyên của  $T_h$  nhưng thời điểm bật 2 cờ fhssChangeFlag và SyncFlag được điều khiển để lệch nhau ít nhất một chu kỳ tín hiệu đồng hồ nhằm tránh xảy ra xung đột giữa hai quá trình đồng bộ và nhảy tần.

Cờ PacketFlag được bật để báo cho chương trình biết có gói tin cần gửi tới máy thu. Khi có dữ liệu cần gửi đi, ví dụ khi nhận được dữ liệu từ mô đun giao tiếp, cờ sẽ được bật và chương trình sẽ gọi thủ tục để đóng gói dữ liệu và gửi gói tin tới IC thu phát để truyền đi.

Khi mới bật nguồn hoặc nhấn nút reset, chương trình sẽ thực hiện khởi tạo giá trị ban đầu cho IC thu phát, bao gồm địa chỉ máy phát và máy thu, đặt giá trị các cờ nhớ, bảng tra nhảy tần, biến đếm tần số, các bộ timer cũng như các mạch giao tiếp ngoại vi khác như UART, SPI,...

Sau khi khởi tạo, chương trình sẽ liên tục kiểm tra cờ fhssChangeFlag. Khi cờ được bật, biến đếm tần số (trong nghiên cứu này được chọn giá trị trong khoảng 0 – 127) sẽ được tăng 1 đơn vị, biến này sẽ được ánh xạ vào bảng tra và lấy ra giá trị của độ dịch tần so với tần số sóng mang trung tâm. Dựa vào giá trị này chương trình sẽ tính ra giá trị tần số sóng mang cần chuyển tới ở bước nhảy tần tiếp theo. Sau đó, MCU gửi thông tin để thiết lập tần số kênh cho IC thu phát và xóa cờ fhssChangeFlag. Khi ngắt timer1 được kích hoạt, chương trình cũng sẽ kiểm tra thời gian đã đạt đến  $T_s$  chưa và bật cờ SyncFlag khi đến  $T_s$ . Khi SyncFlag được bật, MCU sẽ điều khiển IC thu phát phát gói tin đồng bộ. Như vậy, có thể thấy rằng lần đồng bộ đầu tiên sau khi khởi tạo sẽ được thực hiện sau khoảng thời gian  $T_s$ . Gói tin đồng bộ chứa từ mã đồng bộ sẽ được truyền cho máy thu nhằm đồng bộ tần số. Kênh phát bản tin đồng bộ có thể là bất kỳ kênh nào trong bảng 125 kênh. Tuy nhiên, để rút ngắn quá trình đồng bộ chúng tôi thực hiện phát gói tin đồng bộ trên kênh hiện tại và 4 kênh bất kỳ có khoảng cách tần số xa nhau được gọi là nhóm kênh đồng bộ (trong nghiên cứu này sử dụng các kênh số 10, 41, 72, 87). Như đã nói ở trên, việc phát bản tin đồng bộ được kích hoạt bởi timer1 sau mỗi khoảng thời gian  $T_s$ . Khi đó, MCU sẽ gửi gói tin đồng bộ qua IC thu phát lần lượt trên 5 kênh nói trên tới máy thu trong thời gian  $\Delta T_h \ll T_{hs}$ . Điều này có nghĩa là sau mỗi  $N_s$  chu kỳ nhảy tần, máy phát và máy thu sẽ sử dụng một khoảng thời gian  $\Delta T_h$  cho việc đồng bộ. Chu kỳ đồng bộ cũng như số kênh đồng bộ có thể được điều chỉnh để tăng số lần đồng bộ nhằm tăng khả năng chống nhiễu. Tuy nhiên, việc này sẽ làm tiêu tốn tài nguyên của hệ thống.

Ở bước tiếp theo, chương trình sẽ kiểm tra PacketFlag để xác định xem có gói tin cần chuyển đi hay không. Nếu cờ này được bật, chương trình sẽ đọc dữ liệu cần gửi từ khối giao tiếp và chuyển sang IC thu phát để gửi đi với khoảng giữ chậm 50  $\mu s$ . Khoảng giữ chậm này là để tần số kênh mới được thiết lập ổn định ở cả bên phát và thu trước khi dữ liệu được gửi đi.

Để nâng cao độ tin cậy truyền dữ liệu, chúng tôi chọn sử dụng phương án phát lặp kết hợp với kiểm tra tín hiệu xác nhận (Acknowledgment code - ACK). Theo đó, sau khi phát gói tin, nếu modem phía phát nhận được tín hiệu ACK được gửi từ modem phía thu thì việc truyền gói tin được coi là thành công. Nếu không thu được tín hiệu ACK, chương trình sẽ điều khiển máy thu đợi tới lượt nhảy tần tiếp theo để gửi lại gói tin trên tần số khác và sử dụng 1 biến đếm Repeat để tính số lần gửi lại. Nếu sau  $N_r$  lần gửi lại không thành công, MCU sẽ xóa cờ PacketFlag và coi như việc gửi tin thất bại. MCU sẽ sẵn sàng gửi gói tin mới. Nếu nhận được gói tin ACK từ máy thu, MCU sẽ gửi dữ liệu nhận được qua mô đun giao tiếp đến thiết bị đầu cuối.

Lưu đồ thuật toán điều khiển tuyến thu của modem được thể hiện trên hình 3.b. Lưu đồ sử dụng 2 cờ nhớ là fhssChangeFlag và SyncFlag. Tương tự như với máy phát, máy thu cũng có hai bảng tra tần số. Một bảng tần số nhảy tần và một bảng tần số đồng bộ. Nội dung và kích thước các bảng tần số này giống với nội dung của các bảng tần số phía phát.

Khác với máy phát, cờ SyncFlag được sử dụng để báo hiệu tình trạng đồng bộ tần số ở máy thu. Nếu SyncFlag = 1 (được bật) thì máy thu ở trạng thái đồng bộ, tần số được nhảy theo chu kỳ  $T_h$ . Nếu SyncFlag = 0 thì máy thu ở trạng thái mất đồng bộ. Khi đó, máy thu sẽ chuyển sang quá trình tìm kiếm gói tin đồng bộ từ máy phát. Trạng thái mất đồng bộ ở máy thu được coi là xảy ra khi sau khoảng thời gian  $T_{out}$  ( $T_{out} \gg T_s$ ) máy thu không nhận được gói tin hợp lệ nào từ phía

phát. Cờ SyncFlag được bật khi máy thu nhận được gói tin đồng bộ từ máy phát.

Cờ fhssChangeFlag được điều khiển bởi ngắt timer1, khi ở trạng thái đồng bộ với máy phát sẽ được bật định kỳ sau khoảng thời gian  $T_h$ . Sử dụng để báo hiệu thời điểm chuyển đổi tần số trong theo bảng tra nhảy tần.

Theo lưu đồ trên hình 3.b, sau khi khởi tạo, chương trình sẽ kiểm tra cờ SyncFlag, nếu cờ không được bật, nghĩa là máy thu đang ở tình trạng không đồng bộ với máy phát thì chương trình sẽ tăng biến đếm đồng bộ và kiểm tra xem đã đến thời điểm chuyển tần số hay chưa, nếu đã đến thời điểm chuyển tần số (tương đương với khoảng thời gian đạt đến giá trị  $T_{hs}$ ) thì máy thu sẽ thực hiện chuyển sang tần số tiếp theo trong bảng tra tần số đồng bộ. Như vậy, trong chế độ tìm kiếm đồng bộ, máy thu sẽ lần lượt quét các tần số trong bảng tần số đồng bộ và dừng ở mỗi tần số này trong khoảng thời gian  $T_{hs}$  với  $T_{hs} > T_h$  để "đợi" tín hiệu đồng bộ từ phía phát. Lưu ý rằng cứ sau thời gian  $T_s$  thì phía phát sẽ phát bản tin đồng bộ trên tần số hiện tại và các tần số trong bảng tần số đồng bộ. Khi nhận được bản tin đồng bộ, chương trình sẽ bật cờ SyncFlag và đặt lại mốc thời gian. Khi đó, máy thu sẽ chuyển sang chế độ đồng bộ và thực hiện nhảy tần theo chu kỳ  $T_h$ .

Trong trường hợp một kênh đồng bộ nào đó bị nhiễu dẫn đến không nhận được bản tin, việc đồng bộ sẽ phải đợi đến chu kỳ đồng bộ tiếp theo khi máy thu chuyển sang kênh khác. Do tần số của các kênh đồng bộ được chọn có khoảng cách xa nhau nên xác suất bị nhiễu trên tất cả các kênh đồng bộ là rất thấp.

Đối với IC Sx 1278, do IC này có chứa 2 modem khác nhau là modem điều chế khóa dịch tần và khóa bật/tắt (FSK/OOK) và modem LoRa nên nếu ta sử dụng modem FSK/OOK thì việc điều khiển thu phát giống như đã trình bày ở trên. Nếu sử dụng modem LoRa thì ta có thể tận dụng chế độ FHSS được tích hợp sẵn trong modem này. Khi đó, việc điều khiển định thời trong chế độ nhảy tần được thực hiện nhờ ngắt ngoài được tạo bởi chính IC thu phát.

### 3. KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM, THẢO LUẬN

#### 3.1. Đối với mạch sử dụng IC nRF24L01

Các tham số thử nghiệm đối với mạch dùng IC nRF24L01 được cho trong bảng sau:

**Bảng 1.** Thông số thử nghiệm cho modem nhảy tần sử dụng IC nRF24L01.

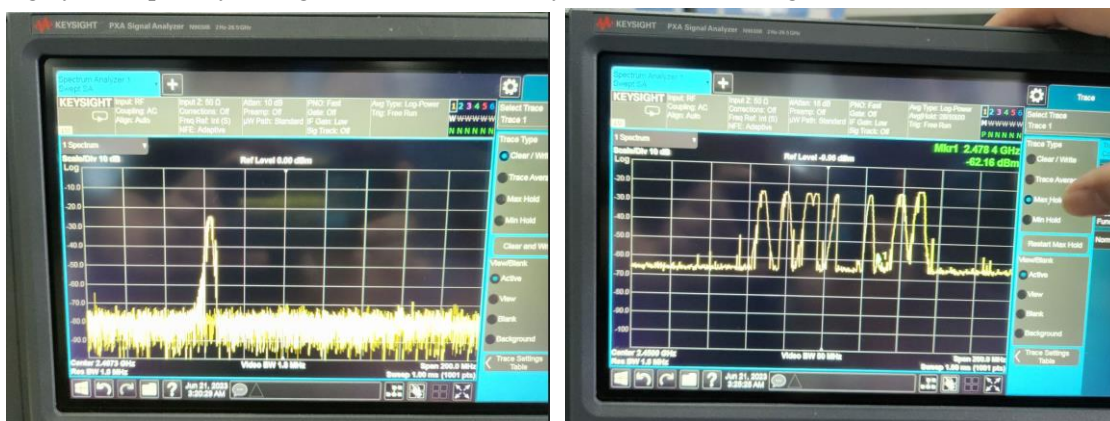
Tham số	Giá trị	Đơn vị
Dải tần làm việc	2,4 – 2,5	GHz
Độ rộng băng tần	1	MHz
Tốc độ dữ liệu	0,25-01	Mbps
Công suất phát	0	dBm
Dạng điều chế	GFSK	
Số kênh nhảy tần	128	kênh
Chu kỳ nhảy tần $T_h$	10	ms
Chu kỳ đồng bộ $T_s$	1	s
Chu kỳ chuyển tần số đồng bộ của máy thu $T_{hs}$	100	ms
MCU Clock	72	MHz

Để có được phổ tín hiệu, ta cho modem phát liên tục một bản tin và quan sát trên máy phân tích phổ. Ở đây, chúng tôi dùng máy phân tích tín hiệu N9030B của hãng Keysight. Hình 4 là hình ảnh thu được từ máy phân tích phổ tại tần số trung tâm 2450 MHz, băng thông 200 MHz. Hình 4a hiển thị phổ tín hiệu nhảy tần tại một thời điểm bất kỳ còn hình 4b hiển thị phổ của tín hiệu nhảy tần trong chế độ quan sát Max Hold. Từ hình 4 có thể thấy rõ ràng rằng phổ của tín

**Nghiên cứu khoa học công nghệ**

hiệu phát thể hiện đúng tính chất của tín hiệu nhảy tần, đó là tại một thời điểm chỉ có một búp phổ. Ở các thời điểm khác nhau, các búp phổ có tần số trung tâm thay đổi một cách ngẫu nhiên.

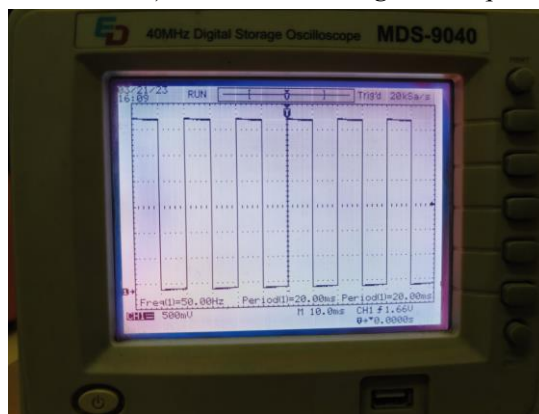
Để kiểm tra tốc độ nhảy tần, trên máy phát chúng tôi sử dụng chân vào/ra PA11 của MCU. Với mỗi lần chuyển tần số sẽ tiến hành đảo mức logic của chân PA11. Sau đó tiến hành đo độ rộng xung vuông trên chân PA11, ta sẽ tính được chu kỳ nhảy tần thực tế bằng 1/2 chu kỳ xung trên chân PA11. Nói cách khác tần số nhảy tần thực tế gấp hai lần tần số của xung trên chân PA11. Hình 5 hiển thị kết quả đo chuỗi xung trên chân PA11 của MCU, ta có thể thấy rõ rằng chu kỳ xung đo được là 20 ms, suy ra chu kỳ nhảy tần là 10 ms và tốc độ nhảy tần là 100 lần/giây. Kết quả này khẳng định modem đã nhảy tần với tốc độ đúng như thiết kế.



a) b)

**Hình 4.** Phổ tín hiệu nhảy tần đối với mạch sử dụng IC nRF24L01:

a) Phổ tức thời của tín hiệu; b) Phổ tín hiệu trong chế độ quan sát Max Hold.



**Hình 5.** Kết quả đo chuỗi xung tại chân PA11 của MCU.

Để kiểm tra chất lượng truyền tin, ta tiến hành truyền 1000 gói tin trong 5 lần với các cự ly khác nhau và đếm số lượng các gói tin thu thành công, qua đó tính xác suất lỗi trung bình. Kết quả thử nghiệm được cho trong bảng 2.

**Bảng 2.** Kết quả thử nghiệm chất lượng truyền tin với IC nRF24L01.

Cự ly	Số gói tin phát đi	Số gói tin thu thành công					Trung bình	%
		Lần 1	Lần 2	Lần 3	Lần 4	Lần 5		
10m	1000	1000	995	954	990	1000	987.8	98.78
50m	1000	945	945	945	945	945	945	94.5
100m	1000	823	823	823	823	823	823	82.3

Từ số liệu trong bảng 2, có thể thấy rằng với mức công suất phát là 0 dBm (1 mW), cự ly liên lạc trong khoảng dưới 100 m thì modem FHSS sử dụng IC nRF24L01 cho tỷ lệ lỗi trung bình trên 82.3%, nghĩa là ở mức khá tốt. Cũng do mức công suất phát rất thấp nên ngay cả với cự ly 10 m thì số lượng gói tin được thu thành công cũng bị thủng giáng, tuy nhiên sự thủng giáng này là không lớn và có thể được khắc phục bằng cách tăng công suất phát.

### 3.2. Đối với mạch sử dụng IC Sx 1278

Các tham số thử nghiệm đối với modem FHSS sử dụng IC Sx 1278 được cho trong bảng 3. Trong thử nghiệm này, chúng tôi chọn sử dụng modem LoRa của IC Sx 1278 với hệ số trải phổ bằng 512 chip/symbol, số kênh nhảy tần 128 kênh. Chu kỳ nhảy tần được chọn bằng chu kỳ của 2 symbol, tương đương với tốc độ nhảy tần khoảng 122 lần/giây. Việc đồng bộ giữa máy thu và máy phát được thực hiện bởi IC Sx 1278 thông qua việc gửi và xử lý phần mở đầu (preamble) của các gói tin. Cụ thể là máy thu sẽ hoạt động trên tần số tương ứng với kênh số 0 cho đến khi thu được phần mở đầu hợp lệ, sau đó, máy thu sẽ tự động đặt lại mốc tín hiệu đồng hồ và đồng bộ theo phía phát. Kết quả đo phổ tín hiệu nhảy tần của modem sử dụng IC Sx 1278 được cho trong hình 6. Tương tự như đối với hình 4, ta có thể thấy rằng tại một thời điểm bất kỳ, phổ tín hiệu nhảy tần có một búp với một tần số trung tâm nằm trong dải từ 410 - 470 MHz và tại các thời điểm khác nhau thì tần số tín hiệu sẽ nhảy ngẫu nhiên trong dải này.

**Bảng 3.** Thông số thử nghiệm cho modem nhảy tần sử dụng IC Sx 1278.

Tham số	Giá trị	Đơn vị
Dải tần công tác	410 - 470	MHz
Băng thông	125	KHz
Code rate	4/7	
Hệ số trải phổ SF	512	Chip/symbol
Công suất phát	17	dBm
Mode	Lora™	
FHSS	Enable	
Số kênh băng tra	128	kênh
Chu kỳ nhảy tần	2	Symbol
MCU Clock	72	MHz



a)

b)

**Hình 6.** Phổ tín hiệu nhảy tần đối với mạch sử dụng IC Sx 1278:

a) Phổ tức thời của tín hiệu; b) Phổ tín hiệu trong chế độ quan sát Max Hold.

Để kiểm tra tốc độ nhảy tần, chúng tôi thực hiện đo khoảng thời gian giữa các thời điểm ngắt nhảy tần được tạo bởi IC Sx 1278, kết quả cho thấy chu kỳ nhảy tần trung bình là 8.192 ms, tương đương với tốc độ nhảy tần xấp xỉ 122 lần/giây.

Để kiểm tra chất lượng truyền tin, chúng tôi cũng thực hiện truyền 1000 gói tin trong 5 lần với các cự ly khác nhau và đếm số lượng các gói tin thu thành công. Kết quả kiểm tra chất lượng truyền tin được cho trong bảng 4.

**Bảng 4.** Kết quả thử nghiệm chất lượng truyền tin với IC Sx 1278.

Cự ly	Số gói tin phát đi	Số gói tin thu thành công					Trung bình	%
		Lần 1	Lần 2	Lần 3	Lần 4	Lần 5		
1000m	1000	1000	992	1000	1000	1000	998.4	99.84
2000m	1000	998	977	992	989	903	991.2	99.12
4000m	1000	883	950	920	790	857	908.6	90.86

Từ kết quả trong bảng 4 có thể thấy rằng, so với modem dựa trên IC nRF24L01 thì modem nhảy tần dựa trên IC Sx 1278 có cự ly truyền tin lớn hơn nhiều. Điều này là do một số nguyên nhân sau: công suất ra của IC Sx 1278 (17 dBm) lớn hơn công suất ra của IC nRF24L01 (0 dBm), tốc độ truyền của IC Sx 1278 (100 kbps) thấp hơn nhiều so với tốc độ truyền của IC nRF24L01 (1 Mbps) và bên cạnh đó IC Sx 1278 khi hoạt động trong chế độ LoRa còn sử dụng kỹ thuật trải phổ dựa trên tín hiệu chirp, kỹ thuật mã hóa chống nhiễu giúp cải thiện đáng kể cự ly truyền tin.

Trong quá trình đo, chúng tôi cũng đã kiểm tra khả năng duy trì liên lạc trong điều kiện máy thu và máy phát chuyển động tương đối với nhau bằng cách cho máy thu đặt cố định tại độ cao 75 m và đặt máy phát trên xe ô tô để di chuyển. Kết quả thử nghiệm cho thấy rằng ngay cả trong điều kiện máy thu và máy phát có chuyển động tương đối với nhau thì liên lạc vẫn được duy trì tốt. Nguyên nhân ở đây là tốc độ di chuyển giữa máy thu và máy phát vào khoảng 40 – 60 km/h (11.11 - 16.67 m/s) là rất nhỏ so với vận tốc lan truyền sóng điện từ, do vậy lượng dịch tần số do hiệu ứng Doppler gây ra là không đáng kể. Điều này cũng đúng với cả trường hợp ứng dụng trên các UAV bởi vận tốc chuyển động của UAV trung bình là 413 km/h (114.72 m/s) [11], so với vận tốc truyền sóng điện từ thì vẫn quá nhỏ để có thể gây ra thay đổi tần số tín hiệu ở máy thu.

Các kết quả trên cho thấy, phương án điều khiển nhảy tần cho máy phát và máy thu của nhóm nghiên cứu đã hoạt động đúng như dự kiến. Máy thu và máy phát đã đồng bộ được với nhau và thực hiện truyền tin thành công trong khi cùng thay đổi tần số một cách ngẫu nhiên. Phương án nhảy tần ở đây đã được cải tiến so với các phương án trong [5-7] để đảm bảo khi mất đồng bộ, máy thu sẽ có cơ chế để hồi phục lại đồng bộ, đảm bảo giảm thiểu xác suất mất liên lạc. Đây cũng là điểm khác biệt chính so với các công trình đã công bố. Thông qua kết quả thiết kế, thử nghiệm, có thể thấy rằng phương án thiết kế modem trải phổ nhảy tần ở đây có thể hoàn thiện để ứng dụng trong các hệ thống điều khiển, đo xa cho các hệ thống robot hoặc máy bay không người lái. Đặc biệt là với dải tần số đã được lựa chọn (2.4 - 2.5 GHz và 410 - 470 MHz), phương án thử nghiệm với 2 loại IC trong nghiên cứu này nếu nâng lên công suất phù hợp (1-10 W) sẽ có thể cho phép truyền dữ liệu tin cậy trên cự ly từ 5 km đến 70 km. Nhờ vậy sẽ phù hợp cho các ứng dụng cho các đường truyền dữ liệu cho UAV, tương tự như các sản phẩm ở [12, 13].

#### 4. KẾT LUẬN

Như vậy, nghiên cứu đã hoàn thành các mục tiêu đề ra, đó là đề xuất cấu trúc phần cứng, đề xuất phương án điều khiển nhảy tần đồng bộ, xây dựng phần mềm firmware điều khiển nhảy tần đồng bộ và truyền tin giữa máy phát và máy thu, chế thử và kiểm nghiệm trên thực tế hoạt động của modem vô tuyến. Kết quả thử nghiệm cho thấy, các modem đã hoạt động đúng theo yêu cầu đề ra, cụ thể là cả hai loại modem đều có thể nhảy tần đồng bộ với tốc độ nhảy tần là 100 và 122 lần/giây, trong quá trình nhảy tần đồng bộ như vậy, cả hai loại modem vẫn đảm bảo truyền nhận tin với chất lượng tốt. Modem sử dụng IC nRF24L01 cho phép truyền với tốc độ cao hơn, tuy nhiên cự ly truyền hạn chế hơn, modem này thích hợp với các ứng dụng truyền tốc độ cao như

truyền tín hiệu ảnh hoặc tín hiệu điều khiển. Modem sử dụng IC Sx 1278 cho phép truyền với tốc độ chậm hơn nhưng cự ly đạt được rất xa, modem này thích hợp cho các ứng dụng yêu cầu tốc độ truyền không cao như các ứng dụng đo xa vô tuyến.

Với cấu trúc phần cứng đã đề xuất, ta có thể dùng MCU và phần mềm firmware đã xây dựng để điều khiển các IC thu phát khác nhau mà không cần điều chỉnh nhiều đối với firmware, điều này cho phép tạo ra các modem ở các dải tần khác nhau phù hợp với ứng dụng mong muốn.

Hướng nghiên cứu tiếp theo sẽ tập trung vào việc hoàn thiện thiết kế của các modem đã đề xuất, bao gồm: Hoàn thiện phần mềm firmware để cải thiện độ tin cậy truyền tin và tốc độ truyền tin; hoàn thiện modem theo hướng nâng công suất, lựa chọn dải tần phù hợp với ứng dụng và nâng cao chất lượng truyền tin trong điều kiện có tác chiến điện tử.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. V.B. Ristic, B. M. Torodovic, N. M. Stojanovic, “*Frequency Hopping Spread Spectrum: History, principles and applications*,” Military Technical Courier (Serbia), **Vol. 70**, No. 4, pp. 856-876, (2022).
- [2]. M. K. Simson, J. K. Omura, R. A. Scholtz, B. K. Levitt “*Spread Spectrum Communications Handbook*,” McGraw-Hill (2002).
- [3]. R. K. Nichols *et al*, “*Unmanned Aircraft Systems in The Cyber Domain*,” 2nd Edition, New Prairie Press, pp. 277-310, (2019).
- [4]. G. Boquet, P. Tuset-Peiró, F. Adelantado, T. Watteyne and X. Vilajosana, “*LR-FHSS: Overview and Performance Analysis*,” IEEE Communications Magazine, **Vol. 59**, No. 3, pp. 30-36, (2021), doi: 10.1109/MCOM.001.2000627.
- [5]. Aj. Chen, Yj. Hoang, “*Research on Medical Wireless Frequency Hopping Communication by nRF24L01*,” Mechanical Engineering and Technology. Advances in Intelligent and Soft Computing, **Vol 125**, pp. 735-740, (2012), doi: 10.1007/978-3-642-27329-2\_101.
- [6]. J. Samir, S. Hamza, “*Design and Implement of a Real Time Health Monitoring FHSS Using NRF24L01 Transceiver*,” 13th International Conference "Standardization, Prototypes and Quality", Romania, (2016).
- [7]. <https://github.com/Max-62/nRF24L01-Frequency-Hopping-FHSS>.
- [8]. <https://www.nordicsemi.com/products/nrf24-series>
- [9]. <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1278>
- [10]. <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103c8.html>
- [11]. <https://www.thecoronawire.com/how-fast-military-unmanned-aerial-vehicles-uavs-fly>
- [12]. <https://www.microhardcorp.com/nL400.php>
- [13]. <https://www.uavnavigation.com/products/peripherals/datalinks>

### ABSTRACT

#### Research on design and implementation of FHSS wireless modems

*This paper presents a frequency hopping control solution for radio transceivers. The proposed solution allows not only synchronous frequency hopping control between the receiver and the transmitter, but also the receiver to restore synchronization after losing it. In order to verify the operation of the algorithm, a pair of wireless modems with frequency hopping spread spectrum was designed and implemented. With the 2 types of radio modems based on two different types of transceiver ICs, the test results showed that the frequency hopping control software of both modems worked properly, both modems can allow reliable data transmission while ensuring synchronous frequency hopping as well as allow for recovery of synchronization after its loss during operation.*

**Keywords:** Frequency Hopping spread spectrum; Synchronization; Wireless modem.