NGHIÊN CỨU, THIẾT KẾ, CHẾ TẠO BỘ PHÁT TÍN HIỆU RĂNG LƯỢC DẢI TẦN SIÊU RỘNG

Trần Minh Nghĩa*, Vũ Minh Thành

Tóm tắt: *Bài báo trình bày một nghiên cứu thực nghiệm thiết kế, chế tạo bộ phát tín hiệu siêu cao tần hỗn hợp có phổ biên độ-tần số dạng răng lược (Comb generator) dải làm việc siêu rộng bao trùm từ băng tần VHF đến băng tần X. Nguyên lý tạo sóng hài sử dụng điốt khôi phục bước (Step Recovery Diode-SRD) và các kết quả tính toán thiết kế, chế tạo bộ phát tín hiệu răng lược có khoảng cách tần số hài chọn trước là 100 MHz được trình bày. Bộ phát gồm 4 đầu ra có thể điều khiển tùy chọn: Kênh A: 0,1-2GHz; Kênh B: 2-4 GHz; Kênh C: 4-8 GHz và Kênh D: 8-12 GHz ứng dụng cho thiết bị tự động kiểm tra hoạt động của các máy thu đa kênh dải rộng của hệ thống ra đa thụ động trinh sát, định vị vô tuyến. Các đánh giá thực nghiệm và khả năng mở rộng thiết kế với các ứng dụng trong thực tế cũng được giới thiệu.*

Từ khóa: Sóng hài dải siêu rộng; Bộ tạo tín hiệu răng lược; Điốt khôi phục bước -SRD.

1. MỞ ĐẦU

Bộ phát tín hiệu răng lược (Comb Generator) là một thiết bị có thể tạo ra tín hiệu hỗn hợp gồm nhiều sóng hài liên tục (Continuous Wave-CW) từ một tín hiệu đầu vào, khoảng cách tần số giữa các sóng hài bằng tần số của tín hiệu đầu vào, biên độ các sóng hài khá ổn định [1-5, 7], do đó, chúng có rất nhiều ứng dụng khác nhau. Một ứng dụng điển hình là dùng phát tín hiệu chuẩn tần số và biên độ cho kiểm tra đánh giá hoạt động của các thiết bị vô tuyến, đây là công việc cần thiết và quan trọng để đảm bảo chắc chắn một hệ thống đang làm việc bình thường, tuy nhiên, các thiết kế đã biết mới chỉ ứng dụng ở một tần số hoặc một dải tần số không lớn. Việc xác minh chính xác các bộ phận quan trọng của một hệ thống vô tuyến đang hoạt động bằng khả năng kiểm tra tích hợp (Built In Test- BIT) càng trở nên hữu ích khi độ phức tạp và giá thành của hệ thống càng cao. Lấy ví dụ việc kiểm tra đánh giá hoạt động của máy thu của các đài ra đa nói riêng và của các hệ thống trinh sát, định vị vô tuyến nói chung là công việc phải làm thường xuyên nhưng khó thực hiện nhất là khi hệ thống có cấu trúc phức tạp, kích thước quá lớn, ngay cả khi sử dụng các thiết bị đo lường chuyên dụng. Giải pháp phù hợp nhất là tích hợp một máy phát tín hiệu có dải tần đủ rộng ở đầu vào của hệ thống thu và sử dụng các bộ ghép hoặc bộ chuyển mạch siêu cao tần cùng với thiết bị điều khiển chế độ để có thể kiểm tra thường xuyên trong khi hệ thống đang hoạt động. Bộ phát tín hiệu răng lược là lựa chọn tối ưu cho giải pháp này nhờ có nhiều ưu điểm so với sử dụng các bộ phát tạp thường được sử dụng trước đây như có thể đặt trước được tần số và công suất tín hiệu, đặc biệt là ưu điểm về điện áp cung cấp thấp và kích thước nhỏ gọn.

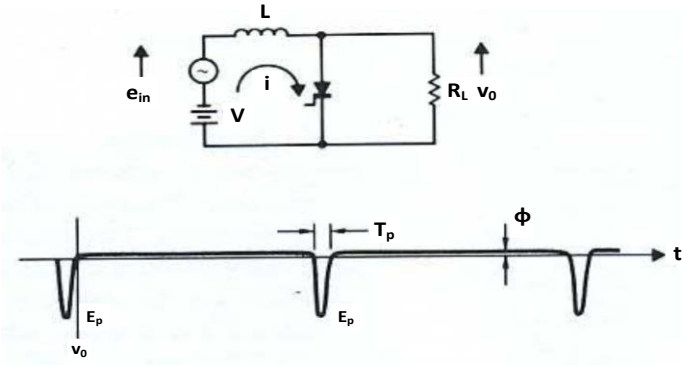
Bài báo trình bày một nghiên cứu thiết kế và chế tạo bộ tạo tín hiệu răng lược dải tần siêu rộng được chia thành các kênh tần số có thể lựa chọn, dùng cho tích hợp tự động kiểm tra hoạt động của hệ thống ra đa thụ động trinh sát điện tử đa kênh. Thiết kế này cũng có thể mở rộng cho các ứng dụng khác cần sử dụng tín hiệu chuẩn biên độ, tần số sóng siêu cao tần.

2. NGUYÊN LÝ TẠO TÍN HIỆU SÓNG HÀI RĂNG LƯỢC SỬ DỤNG ĐIỐT KHÔI PHỤC BƯỚC

Tín hiệu sóng hài có thể được chủ động tạo ra bằng kỹ thuật nhân tần số sử dụng các phần tử phi tuyến như [8]: điốt SRD; các đường mạch dải không tuyến tính; các phần tử thụ động và điốt biến dung (Varactor); các bộ trộn tần,… Trong đó, để tạo ra tín hiệu hài ở dải rộng (dạng răng lược) hay có hệ số nhân lớn thì điốt SRD là thích hợp nhất [1].

Điốt SRD có đặc tính hoạt động khác thường đó là lưu trữ một lượng điện tích lớn khi được

phân cực thuận và tiếp tục dẫn điện khi chuyển sang phân cực ngược cho đến khi tất cả điện tích đã lưu trữ được giải phóng nhờ dòng điện ngược, sau đó một sự tắt dòng rất đột ngột xảy ra dưới một nano giây (<1ns) kết thúc quá trình chuyển đổi [1, 7]. Đặc tính này được sử dụng để tạo ra bộ phát xung hẹp trong sơ đồ mạch hình 1. Mạch được cung cấp bằng một nguồn tín hiệu dạng sóng sin hoặc sóng vuông có tần số f_i, điốt SRD trong mạch giúp hình thành một xung hẹp trong mỗi chu kỳ tín hiệu đầu vào nhờ năng lượng lưu trữ trong điện cảm L ở thời điểm điện dung điốt phân cực thuận C_{fwd} chuyển đổi sang điện dung phân cực ngược C_{vr}. Năng lượng được lưu trữ trong cuộn cảm này ($1/2.L.I_p^2$) xuất hiện trên C_{vr} sau khi chuyển đổi, dưới dạng xung nửa sin hẹp với biên độ E_p và độ rộng T_p. Độ rộng xung T_p do thời gian khôi phục bước của điốt SRD quyết định. Để quá trình này xảy ra hiệu quả, độ rộng T_p của xung tạo thành qua điốt phải chọn nhỏ hơn chu kỳ của tần số đầu ra cần tạo ($T_p<1/f_o$) [1].



Hình 1. *Mạch tạo xung hẹp dùng điốt SRD điển hình.*

Các thông số quan trọng của SRD là thời gian khôi phục bước T_t, tuổi thọ sóng mang thiểu số τ, tụ điện tiếp giáp ngược C_{rv} và giá trị điện áp ngược đánh thủng V_{br}. Giá trị lựa chọn của các thông số để thiết lập điều kiện ban đầu trong tính toán thiết kế như sau [7]:

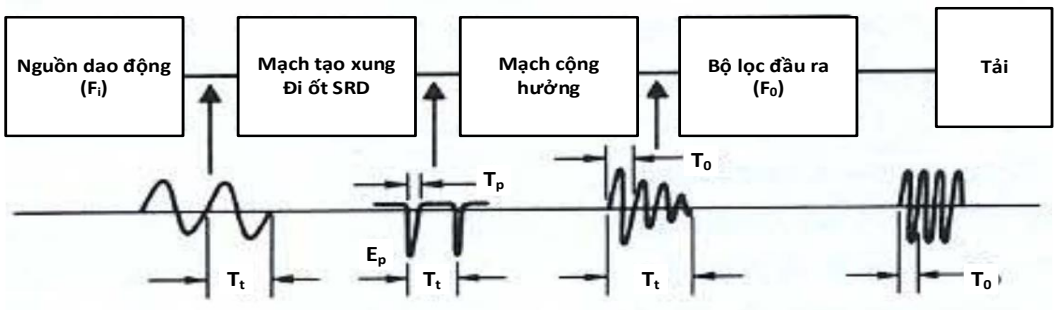
a) Thời gian khôi phục bước $T_t \leq 1/f_o$, trong đó f_o là tần số tín hiệu đầu ra;

b) Thời gian sống của sóng mang thiểu số $\tau >> 1/2\pi f_i$ với ($2\pi f_i = \omega_i)\tau > 10$ là đủ cho hầu hết các mục đích. Trong đó, f_i và ω_i là tần số và tần số góc của tín hiệu vào.

c) Tụ điện tiếp giáp ngược $C_{rv} \leq 1/2.f_oX$, với $10<X<20$. Trong đó, X là mức trở kháng gần đúng của hệ thống (giả sử 50 Ω).

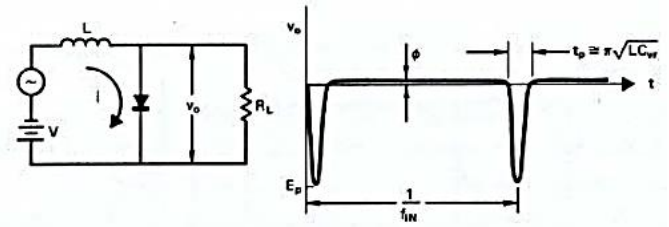
d) Điện áp ngược V_{br} của SRD chọn lớn hơn biên độ xung E_p.

Sơ đồ khối của một bộ tạo sóng hài dùng SRD điển hình và dạng sóng được tạo ra ở mỗi giai đoạn được trình bày trong hình 2 [1].



Hình 2. *Sơ đồ bộ tạo sóng hài răng lược điển hình.*

Nguồn tín hiệu dao động ở đầu vào tần số f_i cung cấp năng lượng cho mạch tạo xung sử dụng điốt SRD. Đầu ra của mạch tạo xung có điện áp xung biểu diễn trên hình 3 [1].



Hình 3. *Điện áp đầu ra của bộ tạo xung trong miền thời gian.*

Xung đầu ra của mạch tạo xung được biểu diễn trong miền thời gian dưới dạng [1]:

$$\begin{aligned} v_o &= E_p \sin N\omega t \qquad \text{với } t=0 \text{ đến } t=T_p \\ &= \Phi \qquad\qquad\quad \text{với } t= T_p \text{ đến } t=1/f_i \end{aligned} \tag{1}$$

Trong đó: v_o là điện áp xung đầu ra;

Φ là mức điện áp phân cực thuận của SRD;

$N = T/2T_p$ với $T = 1/f_i$.

Trong miền tần số điện áp xung dạng nửa sin (1) có thể được tính gần đúng theo:

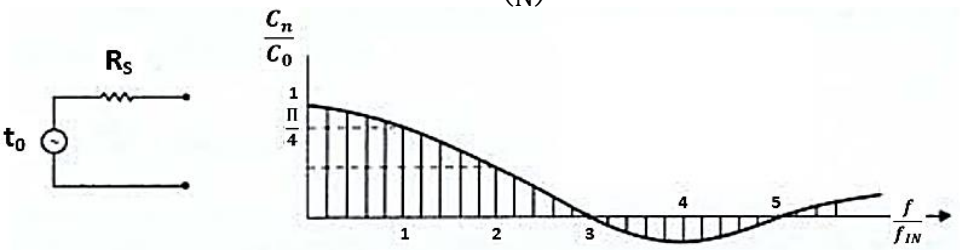
$$v_0 = \sum_{n\to\infty}^{\infty} \frac{C_0}{2} e^{jn\omega t} \tag{2}$$

Trong đó: $C_0 = 2E_p/\pi N$;

n là bậc hài của tín hiệu vào f_i.

Dạng điện áp xung trên hình 3 có thể được biểu diễn bằng một tập hợp các sóng sin tương ứng với các hài của tín hiệu vào dựa trên biến đổi Fourier của dạng sóng xung tuần hoàn (hình 4). Trong đó, các mức biên độ hài được tính theo công thức sau [1]:

$$C_n = C_0 \frac{\cos\frac{\Pi}{2}\left(\frac{n}{N}\right)}{1-\left(\frac{n}{N}\right)^2} \tag{3}$$

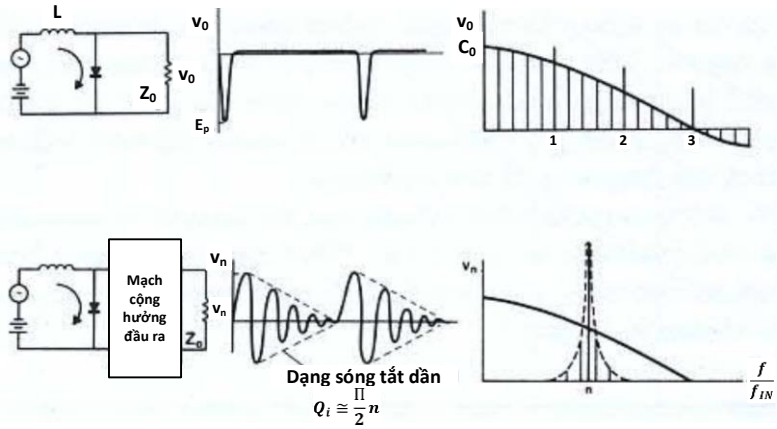


Hình 4. *Dạng sóng xung và phổ Fourier của nó.*

Khi bộ tạo xung SRD có đầu cuối ở băng thông rộng, tải điện trở thuần, đầu ra sẽ là dạng sóng xung năng lượng và phổ răng lược tương ứng của nó. Nếu không sử dụng bộ lọc đầu ra hoặc sử dụng bộ lọc dải thông rộng ta có các sóng hài dạng răng lược với các tần số ra là bội số tần số nguồn tín hiệu vào ($f_n = nf_i$). Trong đó, f_n là tần số của sóng hài thứ n.

Khi sử dụng mạch cộng hưởng đầu cuối cho bộ tạo xung SRD, xung năng lượng có phổ răng lược được sử dụng để kích thích cho tải là mạch cộng hưởng có phẩm chất Q được điều chỉnh xấp xỉ bằng $n\pi/2$ (n bậc của sóng hài). Mạch cộng hưởng này chuyển đổi xung thành dạng sóng chuông giảm dần có tần số đầu ra $f_o = nf_i$. Năng lượng này sau đó được lọc đầu ra là sóng liên tục (CW) ở tần số f_o và đưa đến tải như biểu diễn trong hình 5.

Các SRD thực tế của các nhà sản xuất có khả năng tạo ra các xung như vậy cho các tần số hài đầu ra lên đến khoảng 18 GHz hoặc lớn hơn [6].

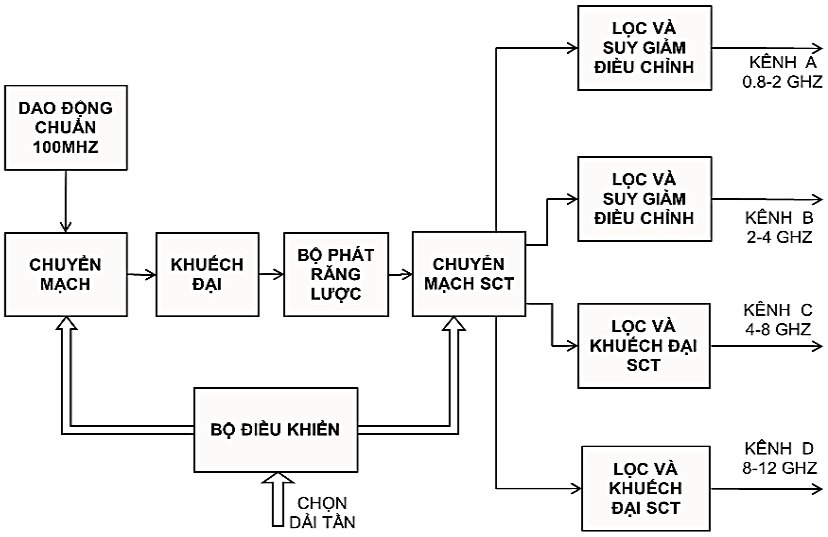


Hình 5. *Dạng sóng đầu ra của bộ tạo sóng hài và phổ trong miền tần số.*

3. THIẾT KẾ BỘ PHÁT TÍN HIỆU RĂNG LƯỢC DẢI TẦN SIÊU RỘNG

Trong bài báo này, các yêu cầu thiết kế được dựa trên tham số kỹ thuật hệ thống thu của trạm ra đa thụ động trinh sát tầm xa có dải tần làm việc từ 0,8 GHz đến 12 GHz được chia thành 4 dải gồm kênh A từ 0,8 -2 GHz, kênh B từ 2 – 4 GHz, kênh C từ 4 – 8 GHz và kênh D từ 8-12 GHz. Dải thông tức thời lớn nhất của máy thu ở tất cả các kênh là 100 MHz do đó, tần số nguồn tín hiệu chuẩn cần chọn $f_i \geq 100$ MHz. Để có thể kiểm tra đánh giá được sự hoạt động của máy thu tại nhiều điểm tần số nhất ở đây tần số chuẩn được chọn là 100 MHz.

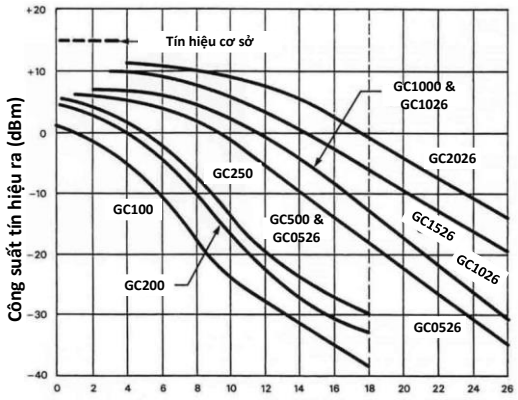
Sơ đồ chức năng của bộ tạo tín hiệu được trình bày trong hình 6. Sơ đồ này được tính toán thiết kế đảm bảo các yêu cầu để tạo ra tín hiệu có phổ tần số răng lược dải rộng có thể điều khiển chọn lọc được tần số và công suất tín hiệu ở các kênh đầu ra. Trong đó, bộ tạo dao động chuẩn 100 MHz có thể chọn loại tạo ra tần số cố định hoặc loại có thể điều chỉnh tần số xung quanh giá trị này, dạng sóng của bộ dao động cũng có thể chọn là sóng vuông hoặc sóng sin. Ở đây, bộ dao động được chọn là loại **CVSS-945** tạo sóng sin có tần số cố định, độ ổn định tần số rất cao, tạp pha rất nhỏ, điều này cho phép tạo ra các sóng hài có tần số rất ổn định.



Hình 6. *Sơ đồ chức năng bộ tạo tín hiệu.*

Bộ phát răng lược được lựa chọn theo các yêu cầu và điều kiện đã nêu trong mục 2, theo đó loại được chọn là GC100 của Herotek Step Recovery Diode Comb Harmonic Generator. Tham số chính và đặc tuyến biên độ-tần số của GC100 được tìm thấy trong hình 7 [6].

Tham số kỹ thuật chính:
- Tần số tín hiệu vào: 100 MHz
- Hệ số sóng đứng: 2:1
- Công suất lớn nhất đầu vào: 1W
- Trở kháng: 50 ôm
- Không yêu cầu cấp nguồn

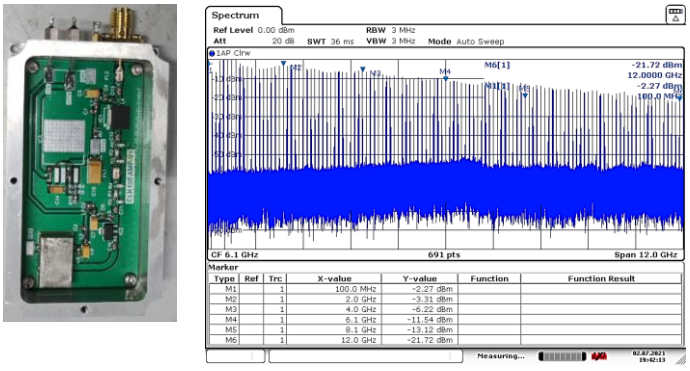


Hình 7. *Tham số chính và đường bao phổ công suất ra của GC100.*

Bộ chuyển mạch thứ nhất có tác dụng điều khiển tín hiệu dao động chuẩn cấp đến cho bộ tạo tín hiệu răng lược là tín hiệu liên tục hoặc tín hiệu điều chế xung tùy thuộc vào lệnh điều khiển chế độ làm việc. Với việc điều khiển dạng tín hiệu chuẩn cấp đến sẽ thu được ở đầu ra bộ tạo tín hiệu răng lược các dạng tín hiệu liên tục hoặc điều chế xung tùy theo chế độ làm việc được lựa chọn. Bộ khuếch đại tín hiệu dao động chuẩn đảm bảo mức công suất tín hiệu đưa đến bộ phát răng lược không nhỏ hơn 20 dBm (mức công suất nhỏ nhất đảm bảo cho bộ phát tín hiệu răng lược làm việc). Bộ chuyển mạch siêu cao tần (SCT) cho phép lựa chọn đầu ra trong số các kênh A,B,C và D như yêu cầu thiết kế. Tín hiệu trên các kênh ra khi chọn được lọc phối hợp để đảm bảo dải tần mong muốn, đồng thời được điều chỉnh suy giảm hoặc khuếch đại tùy vào từng kênh để điều chỉnh công suất tín hiệu ra theo yêu cầu.

4. MỘT SỐ KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ KHẢ NĂNG ỨNG DỤNG

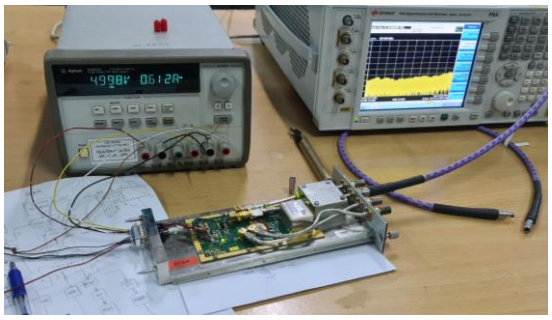
Theo sơ đồ chức năng đã xây dựng của bộ tạo tín hiệu (hình 6), các khối thành phần của chúng được thiết kế, chế tạo và thử nghiệm đánh giá thực tế. Bộ tạo dao động chuẩn **CVSS-945** có mức tín hiệu ra ở +7 dBm được khếch đại công suất lên mức ≥ 20 dBm đảm bảo cho hoạt động của bộ phát răng lược sử dụng điốt SRD là GC100, đầu ra nhận được tín hiệu có phổ trải dài từ 100 MHz đến 12 GHz, với bước nhảy tần số 100 MHz. Hình ảnh bộ tạo dao động được biểu diễn trong hình 8a, tín hiệu ra đo trên máy phân tích phổ được trình bày trong hình 8b.



a) *b)*

Hình 8. *Bộ dao động chuẩn (a) và tín hiệu đầu ra của bộ phát răng lược GC100 (b).*

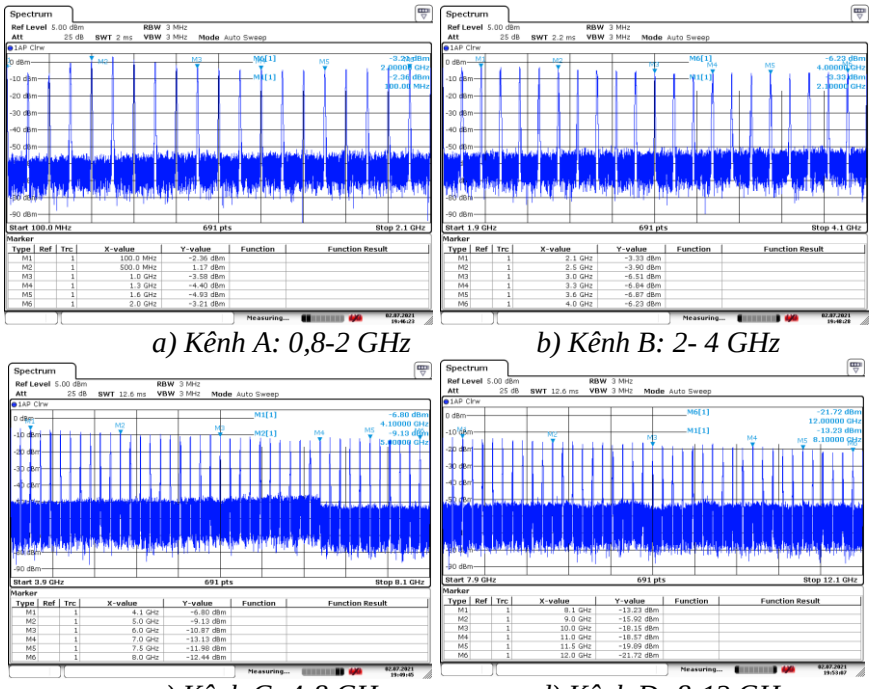
Các khối còn lại của sơ đồ gồm chuyển mạch cao tần, các bộ lọc và suy giảm, các bộ lọc và khuếch đại được thiết kế, mô phỏng trên phần mềm CST, ADS và được chế tạo đáp ứng yêu cầu về dải tần làm việc, mức công suất tín hiệu ra theo yêu cầu ứng với từng kênh đã thiết kế. Bộ điều khiển được tích hợp với hệ thống điều khiển của trạm ra đa trinh sát điện tử đảm bảo cho hoạt động đồng bộ của toàn hệ thống.



Hình 9. *Bộ tạo tín hiệu răng lược dải rộng đa kênh.*

Hình ảnh bộ tạo tín hiệu răng lược đã hoàn thành được trình bày trên hình 9 và hình ảnh phổ tín hiệu đầu ra ứng với từng kênh được biểu diễn trên hình 10.

Tín hiệu ở đầu ra của mỗi kênh là tập hợp các sóng hài có tần số là bội số của tần số dao động chuẩn đầu vào đã chọn ($f_n = nf_i$), biên độ phổ có thể điều chỉnh theo các mức mong muốn nhờ sử dụng các bộ suy giảm hoặc các bộ khuếch đại thích hợp, tín hiệu này dùng để kiểm tra sự làm việc bình thường của máy thu tại các tần số tương ứng với các phổ do bộ phát tạo ra.



a) Kênh A: 0,8-2 GHz *b) Kênh B: 2- 4 GHz*

c) Kênh C: 4-8 GHz *d) Kênh D: 8-12 GHz*

Hình 10. *Phổ tín hiệu đầu ra ở từng kênh của bộ tạo tín hiệu răng lược.*

Bằng việc lựa chọn tần số khối dao động chuẩn và lựa chọn các điốt SRD thích hợp cho khối bộ phát răng lược cùng với việc thiết kế các bộ khuếch đại và bộ lọc thích hợp nhờ các phần mềm hỗ trợ đã biết, hoàn toàn có thể tạo ra các bộ phát tín hiệu có tần số và mức công suất theo yêu cầu cho các ứng dụng cần dùng. Dải tần số cung cấp có thể thay đổi rất rộng, độ ổn định tần số được đảm bảo bằng việc lựa chọn bộ tạo dao động chuẩn và việc thực hiện thuận tiện hơn nhiều so với các phương pháp tạo tín hiệu khác.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày các nội dung chính về nguyên lý và phương pháp cùng các tính toán thiết kế bộ phát sóng hài răng lược dựa trên các điốt khôi phục bước SRD, đồng thời trình bày một

thiết kế cụ thể tạo ra bộ phát tín hiệu răng lược 4 kênh, dải tần siêu rộng (0,8-12 GHz) biên độ các hài điều chỉnh được theo yêu cầu, đây là những tính năng cao so với các công bố đã biết. Kết quả này ứng dụng cho thiết bị tích hợp kiểm tra, đánh giá máy thu đa kênh dải rộng của hệ thống ra đa trinh sát điện tử thụ động trong thực tế.

Các kết quả thu được có thể mở rộng cho nhiều ứng dụng đa dạng và hữu ích khác của các bộ tạo tín hiệu dựa trên cơ sở của các điốt SRD trong các thiết bị vô tuyến điện tử.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Application note 920, Hewlett packard, *"Harmonic comb generator using step recovery diode and SRD modules"*.

[2]. Kenneth Wyatt, Senior EMC EngineerWyatt Technical Services, *"Harmonic Comb Generators Are Useful Tools"*.

[3]. Kimberly Renee Alvarez, *"Designing a Step-Recovery-Diode-Based Comb Generator"*.

[4]. Kenneth E. Kolodziej MIT Lincoln Laboratory, Lexington, Massachusetts, USA, *"Simple Comb Generator Design for SWaP-ConstrainedApplications"*.

[5]. Agilent EEsof EDA, *"Nonlinear Modeling of Step recovery diodes using Verilog-A"*.

[6]. Herotek, *"Step recovery diode comb (Harmonic) generator 0,1-2.6 GHz"*.

[7]. Bikash Ghosal, R K Bahl, S Mandal, G M Saxena, A Banik. Space Applications Centre, Indian Space Research Organization Ahmedabad, Gujarat, INDIA, *"Design and Simulation of 360MHzX19 SRD Multiplier"*.

[8]. Ramon M. Cerda, VP of Engineering, Crystek Corporation, *"Frequency Multiplication Techniques"*.

ABSTRACT

STUDY, DESIGN, AND MANUFACTURE AN ULTRA - WIDEBAND FREQUENCY COMB GENERATOR

This paper presents an experimental study on the design and manufacture of a mixed ultra-high frequency signal generator with a comb shape frequency-amplitude spectrum (Comb generator) with an ultra-wide working band covering from VHF band to the X band. The principled of creating harmonics using step recovery diodes (SRD) and the results of design and fabrication of comb tooth signal generators with a preselected harmonic frequency interval of 100MHz are presented. The transmitter includes 4 optional controllable outputs: A channel: 0.1-2GHz; B channel: 2-4GHz; C Channel: 4-8GHz and D Channel: 8-12GHz are used to automatically check the operation of wideband multichannel receivers of passive radar reconnaissance and radio navigation systems. Some empirical evaluations and extensibility of the design with reality applications are also introduced.

Keywords: Ultra-wideband harmonics; Comb generator; Step recovery diode.

Nhận bài ngày 30 tháng 6 năm 2021
Hoàn thiện ngày 30 tháng 7 năm 2021
Chấp nhận đăng ngày 02 tháng 8 năm 2021

Địa chỉ: Viện Ra đa - Viện Khoa học và Công nghệ quân sự.
*Email: ngrad68@gmail.com.