

RESEARCH AND DESIGN OF CIRCUIT FOR GENERATION OF TRANSMITTING SIGNAL FOR GROUND PENETRATING RADAR

Pham Viet Anh^{1*}, Pham Cao Dai¹, Dao Ngoc Long², Nguyen Hoang Nguyen¹, Nguyen Van Nhan¹

¹Le Quy Don University of Technology, ²Vietnam Institute of Surveying and Mapping

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	30/8/2024	In Ground Penetrating Radars, ultra-short pulse modulated signals in the form of Gaussian pulses are often used as the transmission signal, and the pulse generator is one of the core components that determine the resolution of the surveyed object and the performance of the radar. In this paper, we analyze typical ultra-short pulse generation methods such as: step recovery diodes; tunnel diodes; avalanche transistors; photoconductor semiconductor switches and direct digital synthesizers DDS. From there, we propose a solution to design a pulse signal generation circuit for Ground Penetrating Radars, with the criteria of simplifying the circuit structure, ensuring the parameters and quality of the transmission signal. The test results on the prototype circuit obtained the output pulse signal with the following parameters: pulse width of 7.8 ns; pulse repetition frequency of 71.45 kHz; pulse amplitude over 40V with 10V power supply voltage. The generated pulse signal ensures target detection at depths up to 20 m with 0.5 m resolution. This solution demonstrates the possibility of adjusting the output pulse signal parameters with simple design and low cost.
Revised:	13/11/2024	
Published:	13/11/2024	
KEYWORDS		
Ground Penetrating Radar		
Ultra-short pulse		
Gaussian pulse		
Transistor		
Transformer		

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ MẠCH TẠO TÍN HIỆU PHÁT CHO RA ĐA XUYÊN ĐẤT

Phạm Việt Anh^{1*}, Phạm Cao Đại¹, Đào Ngọc Long², Nguyễn Hoàng Nguyễn¹, Nguyễn Văn Nhân¹

¹Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn, ²Viện Khoa học Đo đạc và Bản đồ

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	30/8/2024
Ngày hoàn thiện:	13/11/2024
Ngày đăng:	13/11/2024
TỪ KHÓA	
Ra đa xuyên đất	Trong các ra đa xuyên đất (Ground Penetrating Radar), tín hiệu điều chế xung cực hẹp (ultra-short pulse) có dạng xung Gauss (Gaussian pulse) thường được sử dụng làm tín hiệu phát, và bộ tạo tín hiệu xung phát là một trong những thành phần cốt lõi quyết định tới độ phân giải đối tượng khảo sát và khả năng làm việc của ra đa. Trong bài báo này, chúng tôi thực hiện phân tích các phương pháp tạo xung hẹp điển hình như: đi-ốt phục hồi bước; đi-ốt đường hầm; tranzito tuyết lở; công tắc bán dẫn quang dẫn và bộ tổng hợp kỹ thuật số trực tiếp DDS. Từ đó, đề xuất giải pháp thiết kế mạch tạo tín hiệu xung phát dùng cho ra đa xuyên đất, với tiêu chí đơn giản hóa cấu trúc mạch điện, đảm bảo thông số và chất lượng tín hiệu phát. Kết quả thử nghiệm trên mạch mẫu chế thử thu được tín hiệu xung phát đầu ra với các tham số: độ rộng xung đạt 7,8 ns; tần số lặp xung 71,45 kHz; biên độ xung hơn 40V với điện áp nguồn nuôi 10 V. Tín hiệu xung phát tạo ra đảm bảo khả năng phát hiện mục tiêu ở độ sâu đến 20 m với độ phân giải 0,5 m. Giải pháp này cho thấy khả năng điều chỉnh được tham số xung tín hiệu đầu ra với thiết kế đơn giản và chi phí thấp.
Xung cực hẹp	
Xung Gauss	
Trazito	
Máy biến áp	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.11043>

* Corresponding author. Email: anhpv.isi@lqdtu.edu.vn

1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, công nghệ ra đa xuyên đất (GPR) phát triển rất nhanh chóng và được sử dụng khá rộng rãi trong các ứng dụng như khảo sát địa chất, kỹ thuật dân dụng (định vị đường ống và cáp ngầm...), khảo cổ học và dò mìn quân sự. Hoạt động của hệ thống GPR cơ bản dựa trên việc bức xạ các sóng điện từ vào trong lòng đất và thu nhận các sóng phản xạ ngược trở về. Các sóng trả về này về bản chất đã bị ảnh hưởng bởi các thông số như hằng số điện môi, độ từ thẩm, độ dẫn điện... của các vật liệu bên dưới lòng đất. Bộ phận xử lý số ở máy thu GPR sẽ lấy mẫu các tín hiệu trả về, thực hiện các thuật toán xử lý số tín hiệu, xử lý ảnh... từ đó, có thể hình ảnh hóa các đặc tính về điện của các cấu trúc vật thể nằm trong lòng đất.

Hiện nay, các hệ thống GPR dạng xung băng thông siêu rộng (UWB) được sử dụng khá phổ biến, nhờ có độ phân giải cao, giá thành rẻ và cấu trúc đơn giản [1]. Trong đó, việc thiết kế bộ tạo tín hiệu phát dạng xung (sau đây gọi tắt là xung phát) đóng vai trò quan trọng, ảnh hưởng đến hiệu năng của hệ thống. Nó quyết định đáng kể đến chất lượng dữ liệu thô thu được từ GPR. Yêu cầu đối với một bộ tạo xung tốt là đảm bảo biên độ xung lớn, độ rộng xung hẹp có dạng xung Gauss, tần số lặp xung cao và độ méo thấp [2]. Các giải pháp phổ biến được sử dụng để tạo xung phát như: sử dụng đi-ốt phục hồi bước (Step Recovery Diode - SRD); đi-ốt đường hầm (Resonant Tunnel Diode - RTD); công tắc bán dẫn quang dẫn (Photoconductive Semiconductor Switch - PCSS) và bộ tổng hợp kỹ thuật số trực tiếp (Direct Digital Synthesizer - DDS); tranzito tuyết lở (Avalanche Transistor - AT).

Các bộ tạo xung hẹp sử dụng đi-ốt phục hồi [3], [4] hoặc đi-ốt đường hầm [5], [6] được sử dụng nhờ cấu trúc đơn giản, thời gian chuyển mạch nhanh, tạo được xung hẹp cỡ hàng pico-giây. Tuy nhiên, giá trị điện áp đỉnh của xung thấp khoảng vài Volt, hạn chế trong các ứng dụng của hệ thống GPR, chỉ phù hợp trong các ứng dụng như chụp ảnh y tế, thử nghiệm không phá hủy, đo khoảng cách, kiểm soát giao thông. Một giải pháp khác của bộ tạo xung phát là sử dụng đặc tính chuyển mạch của các công tắc bán dẫn quang dẫn (PCSS) [7]. Khi PCSS được kích hoạt bởi xung laser cực hẹp, chúng được thông ngay tức thì và tạo ra một dòng xung cực hẹp trong mạch, có công suất cao. Một số vật liệu bán dẫn như Si, GaAs, Cr: GaAs, InP: Fe và GaP có thể được sử dụng để chế tạo PCSS. Khác với các giải pháp nêu trên, việc sử dụng các PCSS có thể điều chỉnh được độ rộng xung khi cần thiết. Mặc dù vậy, để thực hiện giải pháp này cần đảm bảo nguồn nuôi lớn (hàng kilo-Volt), cấu trúc phức tạp và chi phí cao. Có một giải pháp có thể đáp ứng được tính linh hoạt, mềm dẻo trong điều chỉnh tham số xung đầu ra, yêu cầu nguồn nuôi không cao, đó là sử dụng bộ tổng hợp kỹ thuật số trực tiếp (DDS) [8]. Chất lượng xung đầu ra phụ thuộc vào bộ DAC, tuy nhiên, đối với DAC có tốc độ cao, việc thiết kế mạch sẽ phức tạp hơn và chi phí cao hơn các giải pháp khác.

Việc sử dụng các tranzito tuyết lở [9], [10] (dựa trên hiệu ứng “tuyết lở” trong các linh kiện bán dẫn) và các tranzito MOSFET để thực hiện các bộ tạo xung cực hẹp là khá phổ biến đối với các hệ thống GPR. Các tranzito BJT và MOSFET có thể làm công tắc tốc độ cao, để tạo ra xung cực hẹp cỡ hàng pico-giây. Trong trường hợp cần tăng biên độ đầu ra, có thể sử dụng mạch nối tiếp nhiều tầng tranzito (Marx circuit) [11] – [13] hoặc mắc kiểu đẩy-kéo (Push-pull) [14], khi đó yêu cầu điện áp nguồn nuôi rất cao, cỡ hàng kilo-Volt. Khi đó, việc điều khiển và đồng bộ các tranzito cũng là một khó khăn, có thể làm tăng độ phức tạp của thiết bị.

Qua phân tích các giải pháp đã được công bố cho bộ tạo xung phát của GPR nêu trên, thiết nghĩ cần có một giải pháp mới với tiêu chí đơn giản hóa cấu trúc mạch điện (linh kiện đơn giản và sử dụng một điện áp nguồn nuôi thấp), mà vẫn đảm bảo được các thông số và chất lượng tín hiệu xung phát theo yêu cầu bài toán đặt ra.

Mục tiêu của bài báo này là trình bày một giải pháp thiết kế mạch tạo xung phát dùng cho GPR, ứng dụng để dò tìm, đo đạc đối tượng dưới mặt đất và khảo sát đặc điểm của các lớp đất đá phục vụ cho hoạt động nghiên cứu, khảo sát tài nguyên và môi trường. Yêu cầu hệ thống GPR có khả năng đo mục tiêu ở độ sâu lớn nhất (R_{max}) đến 20 m, độ phân giải theo cự ly (ΔR) không quá

0,5 m. Theo lý thuyết về nguyên lý ra đa xung, khi tính đến yếu tố truyền sóng trong môi trường địa chất, độ rộng xung kích phát (τ) và chu kỳ lặp (T_L) hoặc tần số lặp xung (f_L) lần lượt phải thỏa mãn các điều kiện sau [15]:

$$\tau \leq \frac{2\Delta R}{c / \sqrt{\epsilon_r}} \tag{1}$$

$$T_L = \frac{1}{f_L} \geq \frac{2R_{\max}}{c / \sqrt{\epsilon_r}} \tag{2}$$

trong đó, ϵ_r – là hằng số điện môi của môi trường truyền sóng. Trong [16] có đưa ra các giá trị của ϵ_r ứng với một số dạng vật liệu thường gặp trong khảo sát địa chất. Theo đó, đối với các môi trường (ngoại trừ là nước) giá trị ϵ_r có thể lên đến 40 (ứng với trường hợp là đất sét).

Để đưa ra các giá trị tham số (độ rộng xung, chu kỳ lặp, biên độ điện áp xung) tín hiệu xung phát, cần kết hợp giá trị tính toán, trong khi xem xét các yếu tố về điều kiện làm việc đặc thù trong môi trường địa chất, các yếu tố tổng thể của hệ thống, giải pháp thu và xử lý tín hiệu (nhiều do hiệu ứng bức xạ thứ cấp gây nên; thời gian chuyển mạch thu/phát; thời gian dùng cho tích lũy và xử lý của máy thu...) và nền tảng linh kiện hiện có. Giá trị lựa chọn các tham số của xung phát cần đạt được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. So sánh các tham số của các giải pháp khác

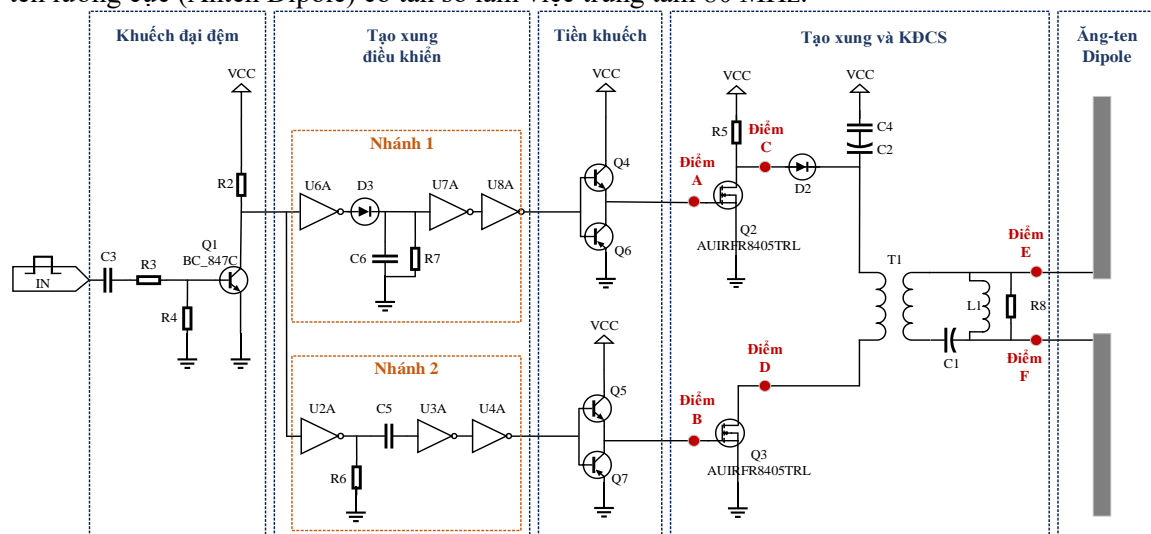
Tham số	Độ rộng xung (ns)	Chu kỳ lặp xung (μ s)	Biên độ xung (V)
Giá trị	≤ 10	≥ 10	$\triangleright 40$

2. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu dựa trên lý cơ bản về hệ thống ra đa xuyên đất dạng xung dài thông siêu rộng, kết hợp phân tích tài liệu, công bố về bộ tạo xung phát hẹp những năm gần đây. Từ đó, đưa ra giải pháp thiết kế mạch tạo xung phát đáp ứng yêu cầu bài toán đặt ra. Thực hiện đo kiểm, đánh giá giải pháp thiết kế đề xuất trên mẫu chế thử.

2.1. Thiết kế mạch tạo xung phát

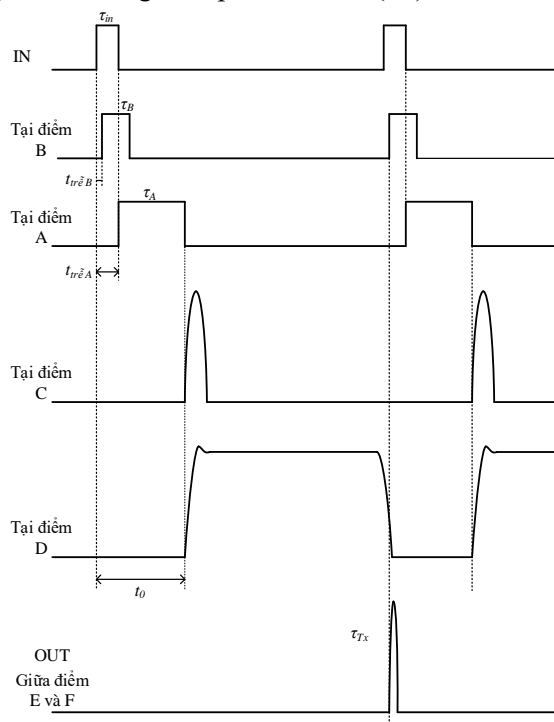
Sơ đồ nguyên lý mạch đề xuất được mô tả trên Hình 1. Các thành phần chính của mạch tạo xung phát bao gồm: mạch khuếch đại đệm; mạch tạo xung điều khiển; mạch tiền khuếch; mạch tạo xung và khuếch đại công suất (KĐCS). Đầu ra của mạch tạo xung phát được kết nối với ăng-ten lưỡng cực (Anten Dipole) có tần số làm việc trung tâm 80 MHz.



Hình 1. Sơ đồ khối mạch tạo xung phát

Mạch khuếch đại đệm có nhiệm vụ đảm bảo tín hiệu đầu vào (là xung kích phát) có dòng đủ lớn cho các tầng sau hoạt động. Tần số của xung kích phát f_{in} được chọn khoảng 71,45 kHz (tương ứng chu kỳ lặp là 14 μ s), độ rộng xung τ_{in} là 500 ns. Đầu ra của mạch khuếch đại đệm được đưa vào hai nhánh của mạch tạo xung điều khiển dựa trên việc sử dụng các cổng logic NOT đảo (IC 7404), bộ lọc RC. Độ rộng xung (τ_A, τ_B) và độ trễ ($t_{tr\tilde{A}}, t_{tr\tilde{B}}$) của các xung điều khiển trên mỗi nhánh đạt được dựa trên nguyên lý của quá trình tích lũy (nạp) và xả năng lượng trên tụ điện. Tuy theo cách mắc và giá trị RC độ rộng và độ trễ của các xung sẽ đạt được các giá trị khác nhau. Đi-ốt D3 trên nhánh 1 có tác dụng cách ly chống xả ngược năng lượng về tuyến trước. Hai xung điều khiển này sẽ đi qua mạch tiền khuếch có dạng mạch đẩy kéo, để đảm bảo về dòng trước khi đi vào mạch tạo xung và KĐCS tại các điểm A và B.

Mạch tạo xung và khuếch đại công suất gồm hai kênh khuếch đại sử dụng MOSFET AUIRFR8405 (Q2 và Q3) và biến áp T1. Tín hiệu đầu ra mỗi kênh (tại điểm C và D) là các xung có biên độ lớn (khoảng 80V) để đảm bảo đủ công suất của tín hiệu xung phát. Việc tạo xung phát được thực hiện dựa trên nguyên lý nạp, xả năng lượng trên tụ qua transistor và biến áp xung. Để minh họa cho nguyên lý làm việc của mạch đề xuất, giản đồ tín hiệu (tại các điểm A, B, C, D và giữa điểm E và F (OUT)) so với xung kích phát đầu vào (IN) được biểu diễn như trên Hình 2.



Hình 2. Giản đồ tín hiệu tại các điểm A, B, C và D

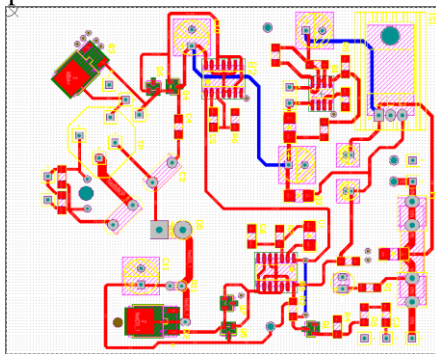
Theo đó, nguyên lý làm việc của mạch tạo xung và khuếch đại công suất dựa trên quá trình nạp và xả năng lượng trên các tụ C2 và C4. Quá trình nạp bắt đầu khi Q2 chuyển từ trạng thái ‘đóng’ sang trạng thái ‘ngắt’ (hở), trong khi Q3 đang ‘ngắt’. Khi đó, do quá trình chuyển trạng thái của Q2, sẽ hình thành một xung điện áp cao hẹp tại điểm C, xung này đi qua đi-ốt D2 và nạp vào các tụ C2 và C4 với mức điện áp cao tương ứng. Do Q3 đang ‘ngắt’, điện áp này cũng xuất hiện tại điểm D qua cuộn sơ cấp của biến áp xung T1. Điện áp này tại điểm D được duy trì đến khi Q3 được ‘đóng’. Quá trình xả bắt đầu khi Q3 chuyển trạng thái từ ‘ngắt’ sang ‘đóng’, trong khi Q2 đang ‘ngắt’. Khi đó, dòng xả nhanh từ tụ C2 chạy qua cuộn dây sơ cấp của biến áp T1, qua Q3 về đất và tạo ra dòng cảm ứng tương ứng trên cuộn thứ cấp của biến áp T1. Kết quả là ở đầu ra (giữa điểm E và F) của mạch ghép biến áp thu được một xung rất hẹp có biên độ cao ứng

với mức tín hiệu của cuộn sơ cấp và hệ số ghép biến áp (hơn 40V), đây chính là tín hiệu xung phát mong muốn.

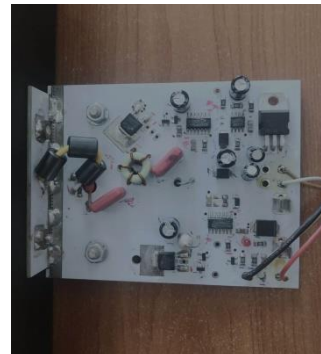
Độ rộng xung τ_{Tx} là thời gian xuất hiện dòng xả chạy từ tụ C2, qua biến áp T1 và Q3. Xung tạo ra sẽ trễ hơn so với xung đầu vào Q3 do độ trễ thời gian quá độ từ ‘ngắt’ sang ‘đóng’ của Q3.

2.2. Mô tả mạch mẫu chế thử

Phần mềm Altium Designer được sử dụng để thiết kế mạch in. Mạch mẫu chế thử có kích thước (50x70)mm, độ dày 1,6 mm, được chế tạo bằng công nghệ mạch in PCB 2 lớp trên chất nền điện môi FR4. Linh kiện hầu hết là kiểu chân dán, có thể hàn trên dây truyền tự động SMT (Surface Mount Technology). Điểm kết nối tín hiệu đầu ra của mạch được bố trí tại vị trí thích hợp, nhằm thuận tiện cho việc gá lắp với bộ ăng-ten phát. Hình 3 mô tả mạch chế thử của bộ tạo xung phát cho GPR.



(a)



(b)

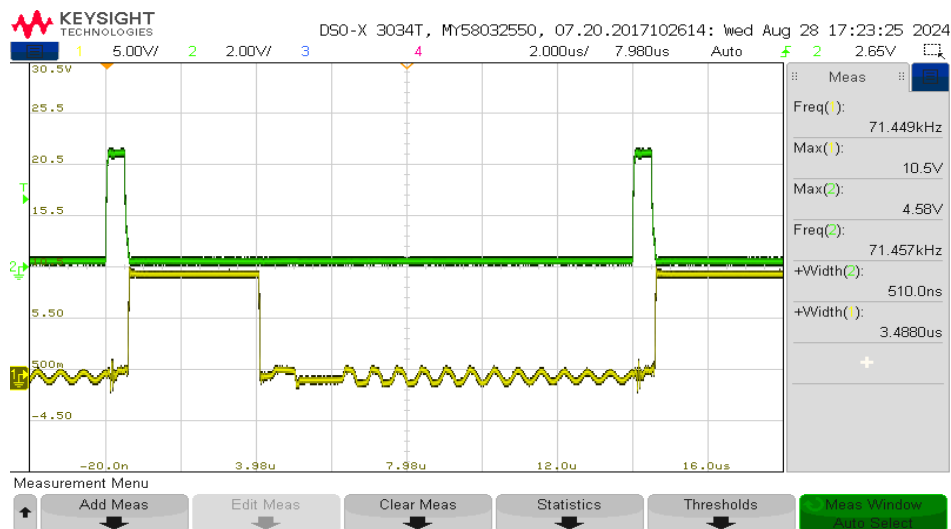
Hình 3. Mạch chế thử của bộ tạo xung phát cho GPR:
(a) bản thiết kế PCB và (b) mạch chế thử sau khi hàn linh kiện

3. Kết quả thử nghiệm và đánh giá

3.1. Kết quả thử nghiệm

Việc thử nghiệm được thực hiện trên mạch chế thử, sử dụng oscilloscope KEYSIGHT DSOX3034T băng thông 350MHz. Tiến hành đo tín hiệu xung kích phát đầu và tại các điểm A, B, C, D (thể hiện trên Hình 1) thu được các kết quả đo như sau:

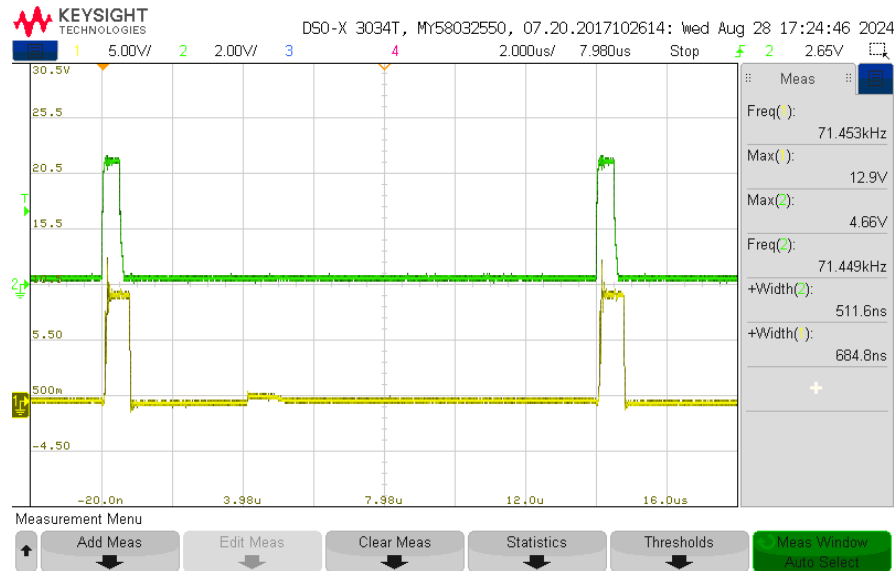
3.1.1. Xung điều khiển tại điểm A



Hình 4. Giản đồ xung điều khiển tại điểm A

Giản đồ xung điều khiển tại điểm A được thể hiện trên Hình 4. Đường bên trên là xung kích phát, có tần số là 71,45 kHz, độ rộng xung là 510 ns, biên độ 4,58V. Đường bên dưới là xung điều khiển tại điểm A, có tần số lặp là 71,45 kHz, độ rộng xung khoảng 3,5 μ s, biên độ đạt xấp xỉ 10V.

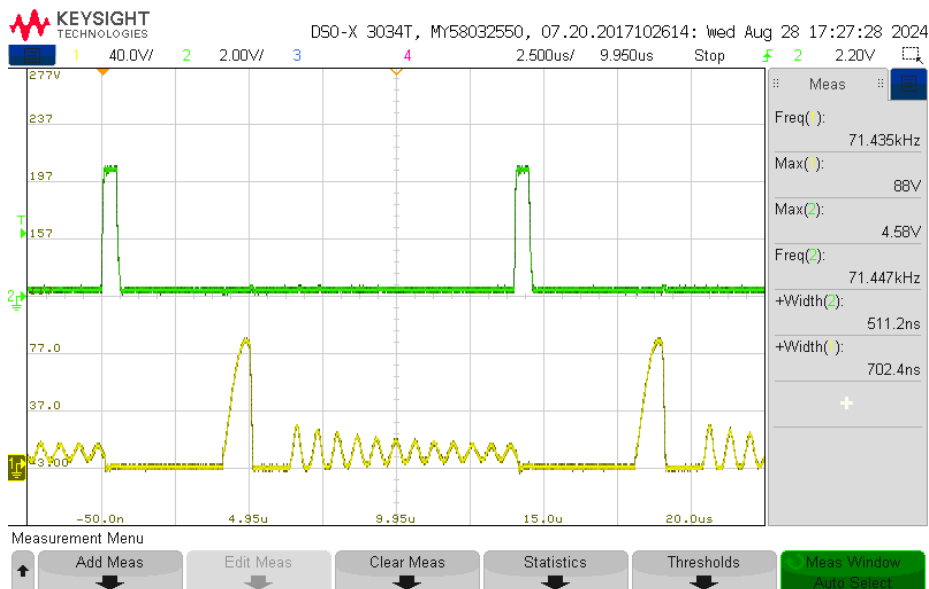
3.1.2. Xung điều khiển tại điểm B



Hình 5. Giản đồ xung điều khiển tại điểm B

Giản đồ xung điều khiển tại điểm B được thể hiện trên Hình 5. Đường bên trên là xung kích phát. Đường bên dưới là xung điều khiển tại điểm B, có tần số lặp là 71,45 kHz, độ rộng xung khoảng 685 ns, biên độ đạt xấp xỉ 10V, bị trễ so với sườn lên của xung kích phát khoảng 100 ns.

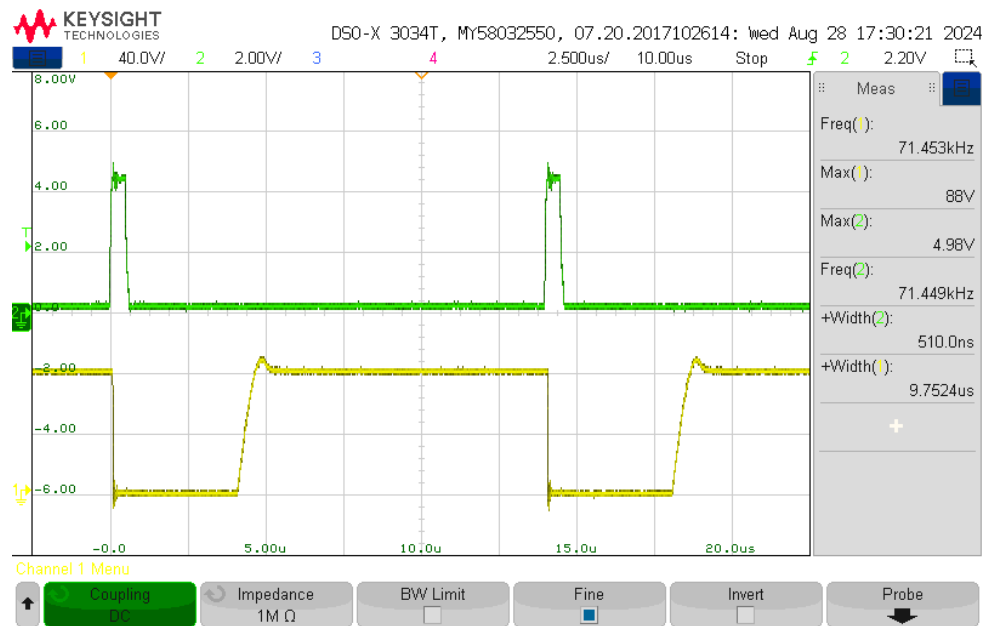
3.1.3. Xung đo tại điểm C



Hình 6. Giản đồ xung đo tại điểm C

Giản đồ xung đo tại điểm C được thể hiện trên Hình 6. Đường bên trên là xung kích phát. Đường bên dưới là xung đo tại điểm C, có tần số lặp là 71,45 kHz, độ rộng xung khoảng 700 ns, biên độ đạt 88V.

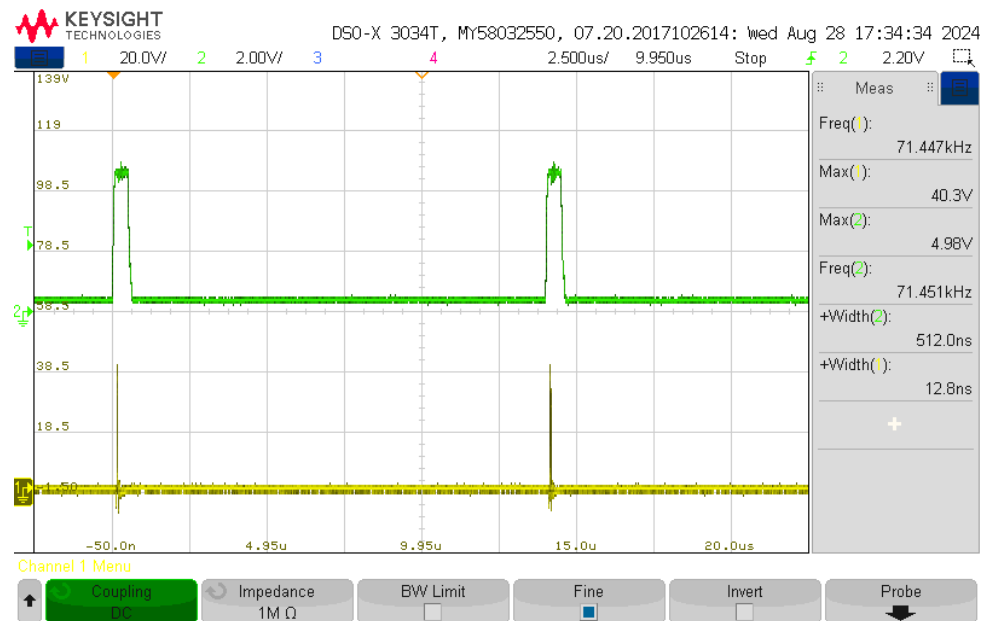
3.1.4. Xung đo tại điểm D



Hình 7. Giản đồ xung đo tại điểm D

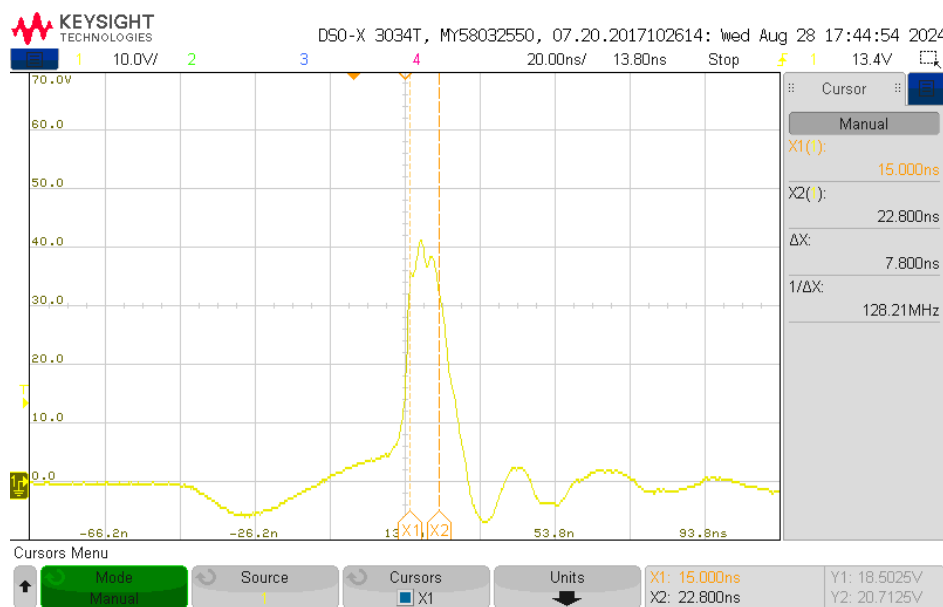
Giản đồ xung đo tại điểm D được thể hiện trên Hình 7. Đường bên trên là xung kích phát. Đường bên dưới là xung đo tại điểm D, có tần số lặp là 71,45 kHz, độ rộng xung khoảng 9,75 μ s, biên độ đạt 88V.

3.1.5. Xung phát đầu ra đo giữa điểm E và F



Hình 8. Giản đồ xung phát đo giữa điểm E và F

Hình 8 thể hiện giản đồ xung phát đầu ra đo giữa điểm E và F (đường bên dưới) so với xung kích phát (đường bên trên). Hình 9 thể hiện giản đồ xung phát phóng to. Xung phát đầu ra có tần số lặp là 71,45 kHz, độ rộng xung khoảng 7,8 ns, biên độ đạt khoảng 41V.



Hình 9. Giản đồ xung phát đo giữa điểm E và F phóng to

3.2. Đánh giá kết quả

Các kết quả thể hiện trên các Hình 4-9, đều phù hợp với những phân tích và tính toán lý thuyết như đã trình bày trong phần 2.2. Các tham số của xung phát đầu ra (độ rộng xung, tần số lặp và biên độ xung) đều thỏa mãn yêu cầu bài toán đặt ra và có dạng gần đúng xung Gauss. Sự so sánh giải pháp đã được đề xuất trong bài báo này với các giải pháp khác đã được công bố gần đây được đưa ra trong Bảng 2.

Bảng 2. So sánh các tham số của các giải pháp khác

Công bố	Giải pháp sử dụng	Độ rộng xung (ns)	Tần số lặp (kHz)	Biên độ (V)	Điện áp nguồn (V)	Khả năng điều chỉnh	Năm công bố
[4]	SRD	0,21	4000	13,4	5	Không	2023
[5]	RTD	0,01	-	0,18	-	Không	2013
[9]	1 BJT	2,52	200	22,8	80	Có	2023
[10]	4 BJT	1,5	-	150	370	Có	2016
[11]	16 BJT	8,45	60	$4 \cdot 10^3$	40	Có	2022
[12]	3x3 BJT	3,3	-	$11 \cdot 10^3$	1200	Có	2021
[13]	2x144 MOSFET	200	0,5	$15 \cdot 10^3$	300	Có	2023
[14]	6 MOSFET	12	100	$+30 \div -200$	$+30; -200$	Có	2023
Đề xuất	2 MOSFET	7,8	71,45	41	10	Có	2024

Qua đó có thể thấy, giải pháp thiết kế mạch tạo xung phát mới được đề xuất trong bài báo này đảm bảo tính mới và duy nhất:

Thứ nhất - về cấu trúc mạch tạo xung phát: Các giải pháp khác, đặc biệt là [9] – [14] có sử dụng các tranzito BJT, MOSFET, dựa trên hiệu ứng tuyết lở kết hợp kiểu mạch nối tiếp nhiều tầng tranzito (Marx circuit) [10] – [13] hoặc mắc kiểu đẩy-kéo (Push-pull) [14] để tăng biên độ điện áp xung. Vì có số lượng rất lớn các tranzito, nên việc điều khiển và thiết lập chế độ làm việc của chúng trong mạch là khá phức tạp. Giải pháp đề xuất trong bài báo này dựa trên thời gian đóng ngắt nhanh của chỉ 02 MOSFET, khả năng nạp xả năng lượng của tụ điện để tạo xung phát có tham số mong muốn, làm đơn giản hóa và giảm chi phí trong quá trình thiết kế chế tạo mạch;

Thứ hai - về điện áp nguồn nuôi: Ngoại trừ [4], [5] sử dụng các đi-ốt SRD và RTD, các giải pháp khác [9] – [14] cần cung cấp điện áp nguồn nuôi khá lớn, việc điều khiển và đồng bộ các

tăng tranzito sẽ phức tạp hơn. Ngoài ra, việc đảm bảo chế độ nhiệt (tản nhiệt) sẽ làm tăng đáng kể khối lượng, kích thước của hệ thống. Trong khi đó, giải pháp đề xuất trong bài báo này chỉ sử dụng cùng một nguồn nuôi là 10V cho các tuyến;

Thứ ba - về tính linh hoạt: Giải pháp cho phép khả năng điều chỉnh linh hoạt và dễ dàng cả 3 tham số chu kỳ lặp, biên độ và độ rộng của xung phát qua chu kỳ tín hiệu xung kích phát, mạch bội áp và giá trị tụ điện C1;

Ngoài ra, việc sử dụng biến áp giúp giải pháp đề xuất tăng khả năng cách ly xung phát, bảo vệ mạch bên trong, tránh hồng học.

4. Kết luận

Trong khuôn khổ bài báo, các nội dung đã được thực hiện gồm: Nghiên cứu, phân tích tài liệu về các mạch tạo xung phát cực hẹp, điện áp cao dùng cho các ứng dụng của GPR; Đề xuất giải pháp thiết kế mạch tạo xung phát cho hệ thống GPR, dựa trên các nguyên lý mạch điện tử cơ bản, trong đó có nguyên lý mạch khuếch đại điện áp cao và ghép biên áp; Tiến hành đo đạc thực nghiệm trên mạch chế thử, thu được xung phát đầu ra với các tham số (tần số lặp là 71,45 kHz hoặc chu kỳ lặp là 14 μ s, độ rộng xung khoảng 7,8 ns, biên độ đạt khoảng 41V) thỏa mãn yêu cầu bài toán đặt ra, đảm bảo khả năng dò tìm, đo đạc và khảo sát đặc điểm của các lớp đất đá phục vụ cho hoạt động nghiên cứu, khảo sát tài nguyên và môi trường ở độ sâu hơn 20 m trong lòng đất, độ phân giải 0,5 m.

Lời cảm ơn

Bài báo này là sản phẩm của Đề tài nghiên cứu khoa học độc lập cấp Bộ Tài nguyên và Môi trường “Nghiên cứu thiết kế lắp đặt bộ máy đo radar xuyên đất gắn trên thiết bị bay không người lái (UAV) phục vụ hoạt động nghiên cứu, điều tra, khảo sát tài nguyên và môi trường”, mã số TNMT.2022.03.05.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] L. Wang, A. Zhang, and Z. Shi, “A High Voltage Pulse Generator used in Ground Penetrating Radar,” in *2020 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*, Shanghai, 2020, pp. 1-3.
- [2] W. Jian-bin and T. Mao, “A New Short Pulse Generator for Ground Penetrating Radar,” in *2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Shanghai, 2007, pp. 1127-1130.
- [3] L. Zou, S. Gupta, and C. Caloz, “A Simple Picosecond Pulse Generator Based on a Pair of Step Recovery Diodes,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 27, no. 5, pp. 467-469, 2017.
- [4] L. Wang, X. Bao, Y. Liu, S. Li, D. Schreurs, and L. Si, “Development of a Compact Subnanosecond Pulse Transmitter With a Single Low-Power Supply,” *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*, vol. 33, no. 8, pp. 1235-1238, 2023.
- [5] D. Wu, J. Pan, K. Mizumaki, M. Mori, and K. Maezawa, “Ultrashort pulse generators using resonant tunneling diodes with improved power performance,” in *2013 International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM)*, Kobe, 2013, pp. 8-16.
- [6] N. Kamegai, S. Kishimoto, K. Maezawa, T. Mtzutani, H. Andoh, K. Akamatsu, and H. Nakata, “Ultrashort pulse generators using resonant tunneling diodes and their integration with antennas on ceramic substrates,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 47, pp. 2833-2837, 2008.
- [7] W. Shi, S. Wang, C. Ma, and M. Xu, “Generation of an ultra-short electrical pulse with width shorter than the excitation laser,” *Scientific Reports*, June 08, 2016. [Online]. Available: <https://www.nature.com/>. [Accessed Aug. 01, 2024].
- [8] Q. Wang, C. Wang, T. Xie, J. Huang, and N. Yuan, “DDS-Based Flexible UWB Pulse Generator Using AntiNyquist Sampling Theorem,” *Japanese Journal of Applied Physics IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, vol. 677, pp. 1-7, 2019.
- [9] E. Telli and S. Yildirim, “A novel avalanche pulse generator circuit with controllable pulse properties,” in *2023 7th International Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Turkiye)*, Istanbul, September 2023. [Online]. Available: <http://www.emcturkiye.org/>. [Accessed Aug. 01, 2024].

-
- [10] A. Omurzakov, A. K. Keskin, and A. S. Turk, "Avalanche Transistor Short Pulse Generator Trials for GPR," in *2016 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS)*, Odessa, 2016, pp. 201-204.
- [11] Z. Li, Y. Chai, S. Jiang, and J. Rao, "Research on a Novel Nanosecond Marx Generator and Its Efficiency Analysis," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 19, 2022. [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/>. [Accessed Aug. 01, 2024].
- [12] Z. Deng, Q. Yuan, S. Shen, J. Yan, Y. Wang, and W. Ding, "High voltage nanosecond pulse generator based on avalanche transistor Marx bank circuit and linear transformer driver," *The Review of Scientific Instruments*, vol. 92, no. 3, 2021. [Online]. Available: <https://scitation.org/journal/rsi/>. [Accessed Aug. 01, 2024].
- [13] S. M. Dehghan and R. Seviour, "High-speed high-voltage solid-state Marx generator based on SiC MOSFETs," *IET Power Electronics*, vol. 16, no. 6, pp. 917-927, 2023.
- [14] J. Chen, J. Wang, Q. Luo, K. Lin, D. Wang, H. Cai, and J. Liu, "Ultrafast High Voltage Pulse Generator Based on Power MOSFETs Delay Push-pull Structure," *Journal of Physics Conference Series*, vol. 2521, no. 1, 2023. [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/>. [Accessed Aug. 01, 2024].
- [15] M. A. Richards and W. L. Melvin, *Principles of Modern Radar. Basic Principles*, SciTech Publishing, Raleigh, 2023.
- [16] A. Martinez and A. P. Byrnes, "Modeling Dielectric-Constant Values of Geologic Materials: An Aid to Ground-Penetrating Radar Data Collection and Interpretation," *Current Research in Earth Sciences*, vol. 247, no. 1, 2002. [Online]. Available: <https://www.kgs.ku.edu/>. [Accessed Aug. 01, 2024].