

DESIGN OF A DIPOLE ANTENNA INTEGRATED WITH A SPLIT-COAXIAL BALUN FOR HIGH-POWER L-BAND APPLICATIONS

Tran Xuan Luong^{1*}, Nguyen Tien Tai², Nguyen Van Kiem³

¹Air Defense – Air Force Academy, ²Military Technical Academy, ³Factory Z119

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 19/01/2026	This paper presents the design and simulation of a dipole antenna integrated with a split-coaxial balun for high-power L-band applications. The proposed balun performs unbalanced-to-balanced conversion to suppress parasitic currents on the coaxial outer conductor, while simultaneously providing impedance transformation based on the quarter-wavelength ($\lambda/4$) principle, matching the 73Ω half-wave dipole to a 50Ω feed line. The balun operation is analyzed using even-odd mode coupled transmission line theory, ensuring current balance and stable phase and amplitude under high-power operation. The antenna is directly integrated with a standard N-type connector using a monolithic metallic structure, without dielectric materials or ferrite cores, resulting in high mechanical robustness and excellent power-handling capability. Ansys HFSS simulation results show a reflection coefficient of $S_{11} = -33.01\text{dB}$ at 1.497GHz , a -10dB bandwidth of 14.1% , and a maximum realized gain of 3.51dBi . The radiation characteristics confirm stable and well-balanced performance, demonstrating suitability for L-band antenna arrays in secondary radar, interrogator, and high-power transmitters for communication and electronic warfare applications.
Revised: 28/02/2026	
Published: 28/02/2026	
KEYWORDS	
Dipole antenna	
Split-coaxial balun	
High-power antenna	
L-band	
Return loss	

THIẾT KẾ ANTEN CHẤN TỬ TÍCH HỢP BALUN ĐỒNG TRỤC XẺ KHE CHO ỨNG DỤNG PHÁT CÔNG SUẤT CAO BĂNG L

Trần Xuân Lượng^{1*}, Nguyễn Tiến Tài², Nguyễn Văn Kiêm³

¹Học viện Phòng không-Không quân, ²Học viện Kỹ thuật Quân sự, ³Nhà máy Z119

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 19/01/2026	Bài báo trình bày thiết kế, phân tích và mô phỏng một anten chấn tử đối xứng tích hợp balun đồng trục xẻ khe, hướng tới các ứng dụng phát công suất cao băng L. Balun đề xuất thực hiện đồng thời hai chức năng quan trọng: (i) chuyển đổi tín hiệu bất đối xứng–đối xứng nhằm triệt tiêu dòng ký sinh trên vỏ cáp đồng trục, và (ii) biến đổi trở kháng theo nguyên lý biến áp $\lambda/4$, đưa trở kháng chấn tử nửa sóng xấp xỉ 73Ω về gần giá trị 50Ω của đường truyền tiếp điện. Cấu trúc balun được mô hình hóa dựa trên lý thuyết đường truyền ghép chế độ chấn/lẻ. Anten đề xuất được tích hợp trực tiếp trên đầu nối chuẩn N với thân kim loại nguyên khối, không sử dụng vật liệu điện môi hay lõi ferrite, đảm bảo độ bền cơ khí và khả năng chịu công suất cao. Kết quả mô phỏng bằng Ansys HFSS cho thấy anten đạt hệ số phản xạ $S_{11} = -33,01\text{ dB}$ tại $1,497\text{ GHz}$, băng thông $S_{11} \leq -10\text{ dB}$ đạt khoảng $14,1\%$ và độ lợi cực đại $3,51\text{ dBi}$. Phân bố dòng điện và đồ thị bức xạ cho thấy dạng bức xạ ổn định, cân bằng, phù hợp để sử dụng như phần tử cơ bản trong các mảng anten băng tần L cho radar thứ cấp, máy hỏi và các hệ thống phát công suất cao trong thông tin và tác chiến điện tử.
Ngày hoàn thiện: 28/02/2026	
Ngày đăng: 28/02/2026	
TỪ KHÓA	
Anten chấn tử đối xứng	
Balun đồng trục xẻ khe	
Anten công suất cao	
Băng tần L	
Hệ số phản xạ	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.14573>

* Corresponding author. Email: xuanluong.tran90@gmail.com

1. Giới thiệu

Băng tần L (xấp xỉ 1–2 GHz) có vai trò then chốt trong nhiều hệ thống vô tuyến hiện đại, bao gồm radar thứ cấp, hệ thống máy hỏi–trả lời, thông tin vệ tinh băng tần L và các hệ thống tác chiến điện tử. Trong các ứng dụng này, anten không chỉ thực hiện chức năng thu phát tín hiệu mà còn quyết định trực tiếp đến khả năng phát công suất, hiệu suất bức xạ, độ ổn định pha cũng như độ tin cậy của toàn hệ thống khi làm việc trong các điều kiện môi trường khắc nghiệt. Đối với các hệ thống phát công suất trung bình và cao, yêu cầu đối với anten ngày càng khắt khe, thể hiện ở khả năng chịu dòng lớn, hạn chế phát xạ ký sinh và duy trì đặc tính bức xạ ổn định khi triển khai trong cấu hình mảng anten nhiều phần tử [1], [2].

Anten chấn tử đối xứng là một trong những cấu trúc cơ bản và được sử dụng rộng rãi trong radar và thông tin vô tuyến nhờ đặc tính bức xạ ổn định, hiệu suất cao và khả năng làm việc với công suất lớn. Bên cạnh vai trò là anten độc lập, chấn tử đối xứng còn là phần tử bức xạ nền tảng trong nhiều cấu trúc anten phức tạp hơn như anten Yagi–Uda, anten phản xạ và các anten mạng pha [3]. Tuy nhiên, đặc trưng kỹ thuật cốt lõi của loại anten này là yêu cầu tiếp điện cân bằng, trong khi phần lớn các hệ thống vô tuyến hiện đại lại sử dụng cấp đồng trục – một dạng đường truyền bất cân bằng. Việc kết nối trực tiếp cấp đồng trục với anten chấn tử đối xứng gây ra sự mất cân bằng dòng điện giữa hai nhánh, dẫn đến xuất hiện dòng ký sinh trên vỏ cáp, làm méo dạng giản đồ bức xạ, suy giảm hiệu suất và đặc biệt bất lợi trong các ứng dụng phát công suất cao [4].

Để khắc phục vấn đề tiếp điện cho anten chấn tử đối xứng, bộ biến đổi cân bằng–bất cân bằng (balun) là thành phần không thể thiếu. Trên thực tế, nhiều cấu trúc balun đã được nghiên cứu và ứng dụng nhằm thực hiện hai nhiệm vụ: chuyển đổi bất cân bằng–cân bằng để hạn chế dòng ký sinh trên vỏ cáp và thực hiện biến đổi trở kháng để phối hợp với đường truyền. Có thể phân nhóm các balun phổ biến như sau: (a) balun đường truyền (split-coaxial, bazooka, folded balun) tạo mặt phẳng dòng đối xứng và chặn dòng vỏ theo cơ chế $\lambda/4$; (b) balun kiểu “choke” dùng lõi ferrite tạo trở kháng ở chế độ chung và triệt dòng trên vỏ cáp; (c) balun vi dải (tapered, hybrid coupler) dựa trên lý thuyết đường truyền ghép. Mỗi nhóm balun được lựa chọn cho từng mục đích khác nhau liên quan đến dải tần số làm việc, băng thông, kích thước, tổn hao và đặc biệt là khả năng chịu công suất [5] – [9]. Tuy nhiên, các kết quả nghiên cứu gần đây cho thấy rằng trong các ứng dụng phát công suất cao ở tần số cao, balun ferrite dễ xảy ra hiện tượng bão hòa từ, trong khi balun vi dải và các cấu trúc dựa trên nền điện môi thường bị giới hạn bởi khả năng chịu công suất, tổn hao tăng và độ bền cơ học không cao [10]. Những hạn chế này trở nên đặc biệt nghiêm trọng khi anten được sử dụng như phần tử của anten mạng nhiều kênh, yêu cầu về tính đối xứng và ổn định pha, biên độ giữa các phần tử là rất chặt chẽ.

Trong bối cảnh đó, balun đồng trục xẻ khe được xem là một giải pháp phù hợp cho các ứng dụng phát công suất trung bình và cao nhờ cấu trúc hoàn toàn bằng kim loại, không sử dụng vật liệu điện môi hoặc lõi ferrite. Bằng cách tạo các khe dọc trên ống dẫn ngoài của cáp đồng trục, cấu trúc này hình thành hai nhánh dẫn điện đối xứng, cho phép chuyển đổi tín hiệu bất cân bằng từ cáp đồng trục sang tín hiệu cân bằng cấp cho anten chấn tử. Các nghiên cứu lý thuyết và mô phỏng đã chỉ ra rằng balun đồng trục xẻ khe không chỉ triệt tiêu hiệu quả dòng ký sinh trên vỏ cáp mà còn có khả năng thực hiện chức năng biến đổi trở kháng tương tự một biến áp $\lambda/4$ khi được thiết kế với chiều dài thích hợp [5], [11]. Nhờ các đặc tính này, balun đồng trục xẻ khe đặc biệt phù hợp cho các hệ thống phát công suất cao và các cấu hình anten mạng đòi hỏi mức độ ổn định điện từ cao.

Mặc dù balun đồng trục xẻ khe đã được đề cập trong một số công trình trước đây, phần lớn các nghiên cứu mới chỉ dừng lại ở phân tích lý thuyết và chưa thực hiện cho băng tần L. Các công trình gần đây về anten phục vụ radar, máy hỏi–trả lời và tác chiến điện tử băng L cho thấy xu hướng ưu tiên các cấu trúc cấp nguồn có độ bền cơ–điện cao, đặc biệt là các giải pháp kim loại nguyên khối tích hợp trực tiếp với đầu nối đồng trục hoặc balun đồng trục. Xu hướng này xuất phát từ các yêu cầu thực tế nhằm giảm tối đa vật liệu điện môi trong vùng điện trường mạnh để

hạn chế đánh thủng và suy hao điện môi. Ngoài ra còn hỗ trợ tản nhiệt tốt hơn nhờ tiết diện kim loại lớn và đơn giản hóa lắp ráp, tăng độ tin cậy cơ khí khi làm việc ngoài trời. Do đó, các cấu trúc balun đồng trục xẻ khe được quan tâm như một hướng tiếp cận phù hợp cho các hệ thống phát công suất cao ở băng L [11] – [15].

Xuất phát từ các yêu cầu thực tiễn và khoảng trống nghiên cứu nêu trên, bài báo này đề xuất một cấu trúc anten chấn tử đối xứng tích hợp balun đồng trục xẻ khe, được thiết kế và tối ưu cho băng tần L. Thiết kế hướng tới vai trò anten phát công suất cao cũng như phần tử bức xạ cơ bản cho anten mạng, với trọng tâm là đảm bảo cân bằng dòng điện, ổn định pha và hiệu suất bức xạ. Phần 2 trình bày mô hình và phân tích cấu trúc anten chấn tử đối xứng tích hợp balun đồng trục xẻ khe. Các kết quả mô phỏng và đánh giá đặc tính điện từ của anten bằng phần mềm Ansys HFSS được trình bày trong Phần 3, qua đó làm rõ tiềm năng ứng dụng của cấu trúc đề xuất trong các hệ thống radar thứ cấp, máy hỏi và các hệ thống phát công suất cao băng tần L. Cuối cùng, kết luận của bài báo được đưa ra trong Phần 4.

2. Mô hình anten chấn tử đối xứng tích hợp balun đồng trục xẻ khe

Phần này trình bày cơ sở lý thuyết, mô hình hóa và phương pháp phân tích cấu trúc balun đồng trục xẻ khe tích hợp trên anten chấn tử đối xứng làm việc băng tần L. Các phân tích được thực hiện dựa trên lý thuyết đường truyền, lý thuyết chế độ và mô hình ghép điện từ của hai nửa ống dẫn khi xuất hiện khe xẻ dọc. Mục tiêu của phần này là chứng minh được: cơ chế tạo ra tín hiệu cân bằng từ nguồn bất cân bằng, khả năng triệt dòng ký sinh trên vỏ cáp đồng trục, cơ chế biến đổi trở kháng $\lambda/4$, và các tham số hình học quyết định tính năng của anten.

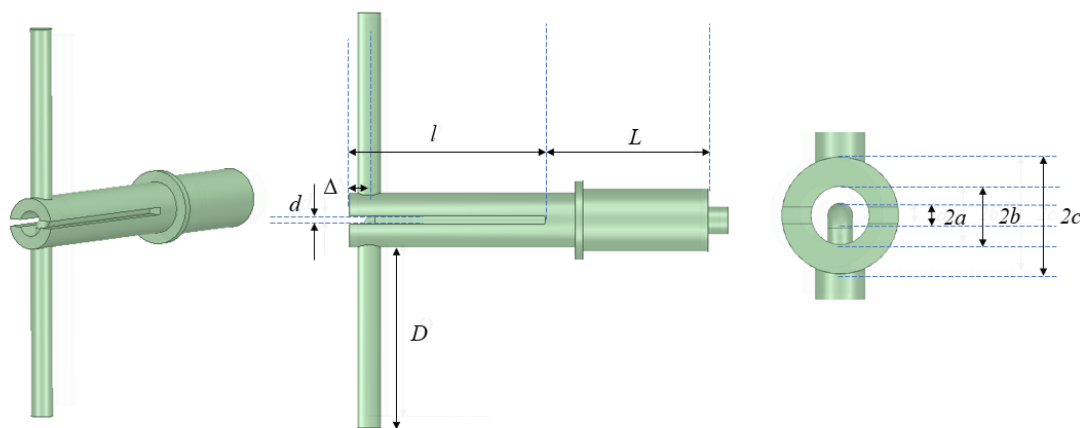
2.1. Cấu trúc balun đồng trục xẻ khe và nguyên lý tạo cân bằng

Balun đồng trục xẻ khe được hình thành bằng cách xẻ một khe hẹp chạy dọc theo thân ống dẫn của đầu nối đồng trục. Khe xẻ chia vỏ dẫn bên ngoài thành hai bán ống kim loại, đóng vai trò như hai dây dẫn song hành có tương tác điện từ mạnh. Khi tín hiệu truyền từ đầu nối đồng trục vào đoạn balun, trường điện từ trong cấu trúc được phân tách thành hai thành phần: mode chẵn và mode lẻ.

Mode chẵn: Hai bán ống mang điện áp cùng pha, từ đó điện trường giữa hai nửa ống hầu như không đáng kể. Mode này lan truyền ổn định và là mode cung cấp tín hiệu đến hai nhánh của anten.

Mode lẻ: Hai bán ống có điện áp ngược pha, tạo ra điện trường mạnh trong khe xẻ dọc. Do khe có chiều rộng nhỏ, mode lẻ bị suy giảm nhanh chóng theo phương truyền năng lượng. Kết quả là chỉ có mode chẵn tồn tại tại đầu ra balun, tạo ra tín hiệu cân bằng cấp cho hai nhánh của anten.

Cơ chế triệt mode lẻ của balun đồng trục xẻ khe đảm bảo dòng điện cấp cho hai nhánh chấn tử có biên độ bằng nhau và ngược pha, là điều kiện cần để duy trì ổn định pha khi anten được sử dụng như phần tử trong anten mạng phát công suất cao.



Hình 1. Cấu trúc và tham số của anten chấn tử đối xứng tích hợp balun đồng trục xẻ khe

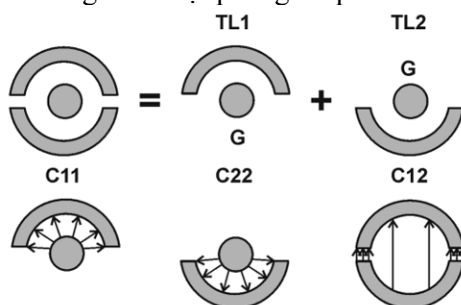
2.2. Mô hình đường truyền ghép và các tham số điện dung tương hỗ

Balun đồng trục xẻ khe có thể được mô hình hoá như hai đường truyền đối xứng ghép (TL1 và TL2) sau khi ống ngoài bị xẻ thành hai nửa, trong đó lõi trung tâm đóng vai trò mốc điện áp tham chiếu để duy trì tính đối xứng hình học (Hình 1). Khi khe xẻ hẹp và cấu trúc được thiết kế đối xứng, mô hình hai đường truyền ghép cho phép tách bài toán thành hai mode độc lập: mode chẵn và mode lẻ [5].

$$\begin{aligned} C_{11} &\approx \pi \frac{\epsilon_0}{\ln(b/a)}, C_{22} \approx \pi \frac{\epsilon_0}{\ln(b/a)} \\ C_{12} &\approx 2 \frac{\epsilon_0(c-b)}{d} + \frac{\epsilon_0 2b}{b_{eff}} \end{aligned} \quad (1)$$

trong đó ϵ_0 là hằng số điện môi của chân không, a là bán kính lõi trong, b là bán kính trong của ống ngoài, c là bán kính ngoài của ống ngoài. Thực tế thường chọn kích thước bán kính trong của ống ngoài hiệu dụng là $b_{eff} = 0,5b$.

Giả thiết để mô hình chẵn-lẻ đơn giản hoá như sau: Coi khe xẻ có bề rộng rất nhỏ so với bán kính ống ngoài và cấu trúc đối xứng theo mặt phẳng đi qua khe.



Hình 2. Phía trên: tách đường đồng trục xẻ thành hai đường truyền đối xứng ghép song song; phía dưới: các điện dung tĩnh nhánh 1 (C11) và nhánh 2 (C22), cùng điện dung tương hỗ C12

Hình 2 trình bày quá trình phân tách cấu trúc đồng trục có khe xẻ thành hai đường truyền tương đương TL1 và TL2. Phân điện dung phân bố trên thành ống được quy đổi thành các điện dung tương đương C11, C22 và C12, trong đó C11 và C22 biểu diễn điện dung tĩnh của từng nhánh còn C12 biểu diễn điện tương hỗ giữa hai nửa qua khe xẻ. Mô hình này là cơ sở để thiết lập các tham số trở kháng đặc trưng riêng cho mode chẵn và mode lẻ trong phần phân tích tiếp theo. Dựa trên lý thuyết đường truyền ghép đối xứng, hai mode lan truyền độc lập mode chẵn và mode lẻ được xác định bởi các trở kháng đặc trưng riêng biệt:

$$Z_{even} = \sqrt{\frac{L+M}{C+C_{12}}}, Z_{odd} = \sqrt{\frac{L-M}{C-C_{12}}} \quad (2)$$

với C là điện dung tĩnh mỗi nhánh, L, M lần lượt là cảm kháng tĩnh và cảm kháng tương hỗ. Để mô tả mức ghép giữa hai nhánh, có thể dùng hệ số:

$$K = -j \frac{Z_A}{Z_{odd}} \cot(kl) \quad (3)$$

Mạch tương đương hai cổng của balun được mô tả bằng ma trận cho mỗi mode truyền. Khi anten có trở kháng vào Z_A , balun xẻ khe có chiều dài l và được nối với đoạn cáp đồng trục bổ sung dài L , tổng trở nhìn từ đầu vào được xác định bởi [5]:

$$Z_{in} = \frac{(2+K)jZ_{even} \sin kl + Z_A \cos kl}{(2+K)2 \cos kl + 2Z_A j / Z_{even} \sin kl} \quad (4)$$

ở đây Z_{in} là trở kháng đầu vào tại đầu cấp nguồn, Z_{even} và Z_{odd} lần lượt trở kháng đặc trưng của mode chẵn/mode lẻ của đoạn balun xẻ khe, k là hằng số sóng.

Trong trường hợp đặc biệt khi chiều dài balun xấp xỉ bằng một phần tư bước sóng ($l \approx \lambda/4$), mô hình trở thành biến áp $\lambda/4$ (Quarter-Wave Transformer) với $kl \approx \frac{\pi}{2}$, $\sin kl \approx 1$, $\cos kl \approx 0$, $K = 0$ với công thức biến đổi trở kháng, ta có:

$$Z_{in} = \frac{Z_{even}^2}{Z_A} \quad (5)$$

ở đây, với anten chẵn từ nửa sóng có $Z_A \approx 73 \Omega$. Để phối hợp với đường truyền tiêu chuẩn $Z_{in} \approx 50\Omega$, điều kiện thiết kế được xác định bởi:

$$Z_{even} \approx \sqrt{Z_{in} Z_A} \quad (6)$$

Như vậy, bằng cách lựa chọn chiều dài balun bằng một phần tư bước sóng và trở kháng đặc trưng chế độ chẵn Z_{even} phù hợp, balun đồng trục xẻ khe đồng thời thực hiện ba chức năng chính: triệt dòng trên vỏ đồng trục; đảm bảo dòng cấp cân bằng cho chẵn từ đối xứng và phối hợp trở kháng hiệu quả với đường cấp 50Ω .

Để đảm bảo tính đối xứng điện từ, khe xẻ cần có bề rộng nhỏ ($\leq 2 \text{ mm}$) và được gia công chính xác theo chiều dài l xấp xỉ $\lambda/4$ tại tần số trung tâm. Khi $l \approx \lambda/4$, đoạn balun ở chế độ chẵn đóng vai trò như một biến áp $\lambda/4$ với trở kháng đặc trưng Z_{even} , thực hiện biến đổi trở kháng theo (5), đồng thời cơ chế triệt chế độ chung làm giảm mạnh dòng ký sinh trên vỏ cáp. Nhờ đó, cấu trúc vừa cải thiện phối hợp trở kháng với đường cấp 50Ω , vừa duy trì dòng cấp cân bằng cho hai nhánh chẵn từ, giúp nâng hiệu suất bức xạ và tăng độ ổn định đặc trưng hướng trong dải tần làm việc.

3. Mô phỏng, đánh giá

Phần này trình bày quy trình thiết kế, xây dựng mô hình 3D, tối ưu hóa tham số và mô phỏng anten chẵn từ đối xứng tích hợp balun đồng trục xẻ khe làm việc trong băng tần L. Các mô phỏng được thực hiện bằng phần mềm Ansys HFSS 2020 R2, trong đó anten được đặt trong một miền không gian mở mô phỏng môi trường bức xạ tự do, thông qua việc bao quanh anten bởi hộp không khí và áp dụng điều kiện biên (Radiation) nhằm triệt tiêu sóng phản xạ từ biên. Các đại lượng được phân tích bao gồm hệ số phản xạ, băng thông làm việc, phân bố dòng điện bề mặt, phân bố trường điện, cùng các giản đồ bức xạ 2D và 3D trên các mặt phẳng chính.

3.1. Mô hình hình học và tham số thiết kế

Thân balun sử dụng ống kim loại có kích thước phù hợp với đường kính ngoài của đầu nối N. Một khe dọc được xẻ theo chiều dài ống đồng trục ngoài với chiều rộng nhỏ (khoảng 2 mm trong thiết kế tham chiếu). Các tham số này được lựa chọn dựa trên phân tích lý thuyết ở phần trước nhằm đảm bảo trở kháng cân bằng đầu ra, cho phép phối hợp tốt với trở kháng anten 73Ω . Mỗi nhánh anten có chiều dài xấp xỉ $\lambda/4$ tại băng tần L. Nhánh anten được gắn trực tiếp vào hai mép của khe ở cuối balun, đảm bảo tính đối xứng và kết nối điện tốt. Mô hình 3D đầy đủ được minh họa trong Hình 1. Anten chẵn từ đối xứng tích hợp balun đồng trục xẻ khe được mô phỏng bằng phần mềm Ansys HFSS trong dải tần từ $1,2 \text{ GHz}$ đến $1,8 \text{ GHz}$, bao phủ toàn bộ vùng tần số quan tâm của băng tần L. Toàn bộ anten được giả thiết làm việc trong môi trường không gian tự do.

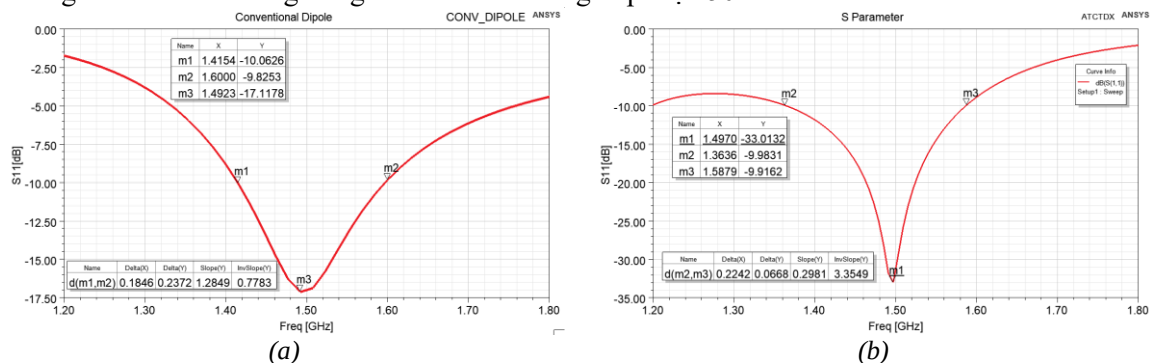
Vật liệu kim loại của anten được mô hình hóa bằng đồng dẫn hữu hạn (Copper, $\sigma \approx 5,8 \times 10^7 \text{ S/m}$) để phản ánh đúng với điều kiện vật liệu thực tế khi chế tạo anten. Cổng kích thích được khai báo dưới dạng wave port 50Ω tại đầu nối đồng trục, đảm bảo mô phỏng chính xác điều kiện tiếp điện trong các hệ thống phát thực tế. Quá trình chia lưới thích nghi được thực hiện tự động cho đến khi hội tụ tham số tán xạ với sai số nhỏ hơn $\Delta S \leq 0,02$, số lần lặp tối thiểu 6 pass đảm bảo độ tin cậy của kết quả mô phỏng.

3.2. Kết quả mô phỏng

Bảng 1. Tham số thiết kế của anten chấn tử đối xứng tích hợp balun đồng trục xẻ khe

Thông số	Ký hiệu	Giá trị
Tần số trung tâm	f_0	1,5 GHz
Chiều dài khe balun	l	53,5 mm
Chiều dài thanh chấn tử	D	47 mm
Bán kính lõi trong	a	1,5 mm
Bán kính trong của ống ngoài	b	3,0 mm
Bán kính ngoài của ống ngoài	c	7,0 mm
Chiều rộng khe xẻ	d	2 mm
Khoảng cách từ đầu khe tới thanh chấn tử	Δ	2 mm
Chiều dài đoạn đồng trục đến khe xẻ	L	32 mm

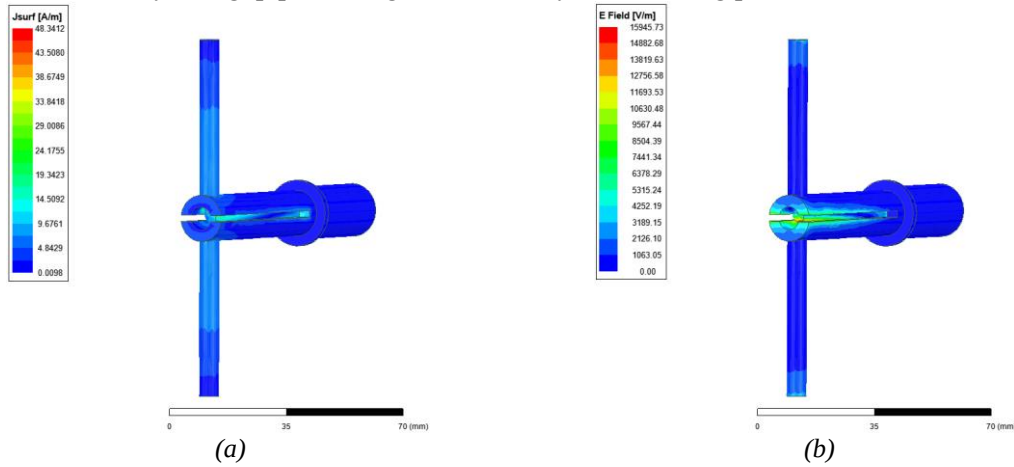
Sau khi tiến hành tối ưu các tham số hình học chủ yếu của anten, bao gồm chiều dài khe balun, chiều rộng khe xẻ balun và kích thước chấn tử, thông qua quá trình mô phỏng tham số trong Ansys HFSS, tập hợp các giá trị tối ưu thu được đã được lựa chọn và tổng hợp nhằm đạt được phối hợp trở kháng tốt nhất tại tần số làm việc băng tần L, đồng thời đảm bảo cân bằng dòng điện hai nhánh chấn tử và triệt tiêu dòng điện ký sinh trên vỏ cáp. Các tham số kích thước tối ưu của anten chấn tử đối xứng tích hợp balun đồng trục xẻ khe được trình bày chi tiết trong Bảng 1. Để đánh giá hiệu quả của cấu trúc balun đồng trục xẻ khe tích hợp, anten đề xuất được so sánh trực tiếp với anten chấn tử đối xứng thông thường (conventional dipole) có cùng kích thước hình học và được mô phỏng trong cùng điều kiện. Việc so sánh này nhằm làm rõ vai trò của balun không chỉ trong việc cân bằng dòng mà còn trong cải thiện đặc tính băng thông và độ sâu điểm cộng hưởng. Hình 3 trình bày kết quả mô phỏng S11 của hai cấu hình anten trong dải tần 1,2–1,8 GHz. Kết quả mô phỏng cho thấy anten chấn tử thông thường đạt cộng hưởng tốt nhất tại 1,492 GHz với giá trị hệ số phản xạ cực tiểu xấp xỉ -17 dB. Mặc dù anten vẫn làm việc tại tần số cộng hưởng, mức phối hợp trở kháng chỉ đạt mức trung bình và băng thông tại ngưỡng $S_{11} \leq -10$ dB tương đối hẹp. Nguyên nhân chủ yếu xuất phát từ việc tiếp điện trực tiếp bằng cáp đồng trục không cân bằng, dẫn đến xuất hiện dòng ký sinh trên vỏ cáp và làm suy giảm hiệu quả truyền năng lượng từ nguồn đến anten. Ngược lại, anten chấn tử đối xứng tích hợp balun đồng trục xẻ khe đề xuất thể hiện sự cải thiện rõ rệt về đặc tính phản xạ. Anten đạt hệ số phản xạ sâu -33,01 dB tại 1,497 GHz, tốt hơn khoảng 17 dB so với anten chấn tử thông thường, đồng thời băng thông $S_{11} \leq -10$ dB được mở rộng đáng kể. Kết quả này chứng tỏ balun đồng trục xẻ khe không chỉ triệt tiêu hiệu quả dòng ký sinh và đảm bảo cân bằng dòng điện, mà còn thực hiện tốt chức năng biến đổi trở kháng $\lambda/4$ giữa anten và đường tiếp điện 50 Ω .



Hình 3. Đồ thị hệ số phản xạ S_{11} : (a) anten chấn tử đối xứng thông thường và (b) anten chấn tử đối xứng khi tích hợp balun đồng trục xẻ khe

Băng thông làm việc của anten, được xác định tại mức $S_{11} \leq -10$ dB, đạt khoảng 224 MHz, tương ứng với 14,1% so với tần số trung tâm. Băng thông rộng này không chỉ đáp ứng yêu cầu hoạt động của các hệ thống băng tần L mà còn đặc biệt có ý nghĩa đối với các ứng dụng phát

công suất cao. Nhờ băng thông rộng, anten vẫn duy trì phối hợp trở kháng tốt ngay cả khi điều kiện làm việc thay đổi, góp phần nâng cao độ tin cậy của hệ thống phát.



Hình 4. (a) Phân bố mật độ dòng trên anten và (b) Phân bố trường điện tại tần số 1,5 GHz

Phân bố trường điện và mật độ dòng bề mặt của anten tích hợp balun đồng trục xẻ khe được đánh giá thông qua mô phỏng điện từ trong điều kiện công suất chuẩn hóa 1 W. Kết quả cho thấy giá trị trường điện cực đại $|E|_{\max}$ tập trung chủ yếu tại vùng khe xẻ và khu vực tiếp giáp giữa balun và chân tử, với giá trị cực đại xấp xỉ $1,6 \times 10^4$ V/m, trong khi phần lớn cấu trúc kim loại còn lại duy trì mức trường điện thấp và phân bố đồng đều. Đồng thời, mật độ dòng bề mặt $|J|_{\text{surf}}$ đạt giá trị lớn nhất dọc theo thành trong của balun và vùng khe, phản ánh cơ chế dẫn dòng liên tục và không xuất hiện hiện tượng tập trung dòng cục bộ tại các mép hoặc vật liệu điện môi.

Khả năng chịu công suất của anten được ước lượng dựa trên quy luật tỷ lệ của cường độ trường điện theo công suất kích thích, được biểu diễn bởi công thức (7):

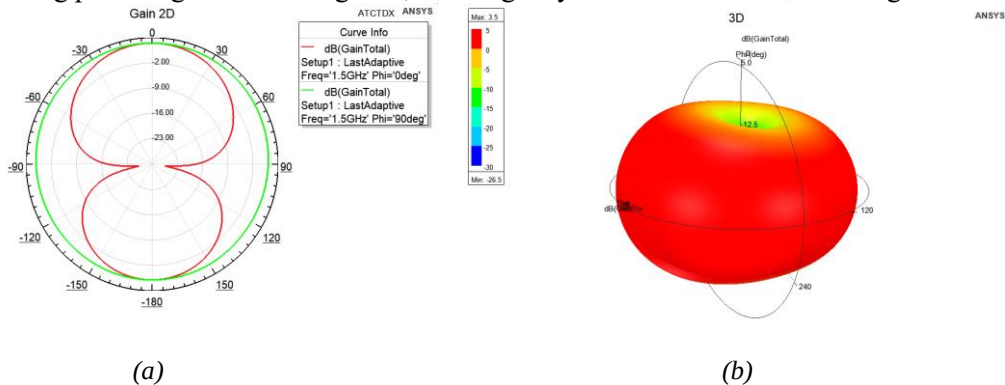
$$P_{\max} = \left(\frac{E_{bd}}{E_0} \right)^2 P_0 \quad (7)$$

trong đó $P_{\max}$ là công suất cực đại mà một phần tử anten có thể chịu được, E_{bd} là cường độ điện trường đánh thủng của môi trường xung quanh (không khí, chân không hoặc khí), E_0 là giá trị điện trường cực đại thu được từ mô phỏng điện từ của anten khi được kích thích với công suất vào P_0 (được chuẩn hóa), tại đây $P_0 = 1$ W. Dựa trên kết quả trong Hình 4b của anten đề xuất, giá trị trường điện cực đại đạt được là $E_0 = 1,6 \times 10^4$ V/m với công suất kích thích $P_0 = 1$ W, tập trung chủ yếu tại vùng khe xẻ và khu vực tiếp giáp giữa balun đồng trục và chân tử. Với giả thiết trong điều kiện tiêu chuẩn của không khí cường độ điện trường đánh thủng $E_{bd} \approx 3$ MV/m, do đó theo biểu thức (7) thì công suất cực đại của một phần tử anten được ước lượng là xấp xỉ 35 kW. Kết quả này cung cấp cơ sở định lượng ban đầu cho thấy anten tích hợp balun đồng trục xẻ khe có tiềm năng ứng dụng trong các hệ thống phát công suất cao. Việc xác định chính xác giới hạn công suất cực đại vẫn cần được tiếp tục nghiên cứu thông qua mô phỏng tổn hao nhiệt và các thử nghiệm thực nghiệm trong điều kiện làm việc thực tế.

Các kết quả này cung cấp cơ sở định lượng ban đầu để ước lượng giới hạn công suất cực đại theo các tiêu chí điện trường và tổn hao dẫn, hướng tới ứng dụng trong các hệ thống anten băng tần L yêu cầu công suất phát lớn và độ tin cậy cao. Đồng thời, dòng điện đối xứng trên hai nhánh chân tử đảm bảo pha và biên độ của tín hiệu bức xạ được duy trì ổn định, là điều kiện cần để anten có thể hoạt động hiệu quả như phần tử bức xạ trong anten mảng nhiều phần tử.

Ngoài ra, do cấu trúc anten và balun hoàn toàn bằng kim loại, không sử dụng vật liệu điện môi hay lõi ferrite, anten đề xuất không chịu các giới hạn về bão hòa từ hoặc tổn hao điện môi thường gặp ở

các cấu trúc balun khác. Điều này cho phép Anten làm việc ổn định ở mức công suất cao hơn, phù hợp với các hệ thống phát công suất cao trong radar, hệ thống máy hỏi và tác chiến điện tử băng tần L.



Hình 5. Đồ thị bức xạ của Anten chấn từ đối xứng tích hợp balun đồng trục xẻ khe: (a) 2D và (b) 3D

Đồ thị bức xạ của Anten tại tần số cộng hưởng được trình bày trong Hình 5a dưới dạng các mặt cắt 2D theo các mặt phẳng chính. Anten thể hiện dạng bức xạ điển hình của chấn từ đối xứng, với búp sóng chính rộng và gần đẳng hướng trong mặt phẳng ngang. Độ lợi cực đại đạt khoảng 3,51 dBi, phù hợp với vai trò phần tử bức xạ cơ bản trong Anten mạng.

Dạng bức xạ đối xứng và ổn định của Anten là một ưu điểm quan trọng khi triển khai trong các Anten mạng. Các kết quả mô phỏng cho thấy Anten chấn từ đối xứng tích hợp balun đồng trục xẻ khe đáp ứng đồng thời các yêu cầu quan trọng của một Anten phát công suất cao và phần tử Anten mạng băng tần L, bao gồm: phối hợp trở kháng tốt, băng thông rộng, phân bố dòng điện cân bằng, triệt tiêu dòng ký sinh và dạng bức xạ ổn định. Những đặc tính này là cơ sở để khẳng định Anten đề xuất không chỉ phù hợp cho sử dụng đơn lẻ mà còn có tiềm năng cao khi được triển khai trong các Anten mạng nhiều phần tử phục vụ các hệ thống radar, máy hỏi và tác chiến điện tử.

Các kết quả trình bày trong bài báo hiện tại được thu được từ mô phỏng trong điều kiện lý tưởng. Mặc dù mô phỏng đã làm rõ các cơ chế vật lý và ưu điểm của cấu trúc Anten đề xuất, việc chế tạo nguyên mẫu và đo kiểm thực nghiệm là cần thiết để đánh giá đầy đủ hiệu năng trong điều kiện làm việc thực tế, đặc biệt ở chế độ phát công suất cao. Trong các nghiên cứu tiếp theo, Anten sẽ được chế tạo và đo các tham số S11, đồ thị bức xạ, cũng như đánh giá khả năng phát công suất cao. Đồng thời, cấu trúc Anten sẽ được mở rộng theo hướng ghép nhiều phần tử nhằm khảo sát đặc tính ghép mạng, ổn định pha biên độ và khả năng điều khiển búp sóng.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày một thiết kế Anten chấn từ đối xứng băng rộng tích hợp balun đồng trục xẻ khe, hướng tới các ứng dụng phát công suất cao và làm phần tử bức xạ cho Anten mạng băng tần L. Dựa trên mô hình lý thuyết chế độ chấn/lẻ và mô hình đường truyền ghép, cấu trúc balun đã được phân tích chi tiết, làm rõ cơ chế chuyển đổi tín hiệu bất cân bằng thành tín hiệu cân bằng, đồng thời triệt tiêu hiệu quả dòng ký sinh trên vỏ cáp đồng trục. Đoạn balun có chiều dài xấp xỉ $\lambda/4$ còn thực hiện chức năng biến đổi trở kháng, đưa trở kháng chấn từ nửa sóng xấp xỉ 73Ω về gần 50Ω của cổng tiếp điện, giúp cải thiện đáng kể phối hợp trở kháng và mở rộng băng thông.

Kết quả mô phỏng toàn sóng cho thấy Anten đạt hệ số phản xạ $-33,01$ dB tại $1,497$ GHz, băng thông $14,1\%$ tại mức $S_{11} \leq -10$ dB và độ lợi cực đại $3,51$ dBi. Phân bố dòng điện đối xứng và đồ thị bức xạ ổn định chứng minh hiệu quả của balun đồng trục xẻ khe trong việc duy trì đặc tính bức xạ khi làm việc ở chế độ phát, đồng thời tạo nền tảng để Anten được sử dụng như phần tử trong các Anten mạng nhiều phần tử.

Nhờ cấu trúc kim loại nguyên khối, không sử dụng vật liệu điện môi hay lõi ferrite, Anten đề xuất có khả năng chịu công suất cao, độ bền cơ khí tốt và ít nhạy với điều kiện môi trường. Những đặc điểm này khiến Anten đặc biệt phù hợp cho các hệ thống radar thứ cấp, máy hỏi, các hệ

thống phát công suất cao và các ứng dụng tác chiến điện tử trong băng tần L. Trong các nghiên cứu tiếp theo, thiết kế sẽ được mở rộng theo hướng ghép nhiều phần tử, đánh giá phân bố pha biên độ trong mạng và tiến hành chế tạo, đo kiểm thực nghiệm để kiểm chứng đầy đủ hiệu năng trong điều kiện làm việc thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2016.
- [2] R. C. Hansen, *Phased Array Antennas*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2009.
- [3] J. D. Kraus and R. J. Marhefka, *Antennas for All Applications*, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2002.
- [4] D. T. Hoang and Q. D. Nguyen, *Antenna Theory and Design*, (in Vietnamese). Hanoi, Vietnam: People's Army Publishing House, 2014.
- [5] S. N. Makarov and R. Ludwig, "Analytical model of the split-coaxial balun and its application to a linearly polarized dipole or a CP turnstile," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 7, pp. 1909–1918, Jul. 2007.
- [6] L. Kock, "Analysis and performance of antenna baluns," MS. Thesis, University of Stellenbosch, 2005. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/37370472.pdf>. [Accessed Sept. 29, 2025].
- [7] P. R. Biggins, "Wideband Balun Design with Ferrite Cores," BC. Thesis, California Polytechnic State University, 2014.
- [8] Q. Xu, P. Chen, Y.-D. Ren, F.-L. Wu, and H.-M. Lu, "A High Power Broadband Balun Loaded with Ferrite Beads," *Journal of Microwaves*, vol. 38, no. 6, pp. 19-22, 2022.
- [9] G. Gupta and A. R. Harish, "Baluns for dipole with reflector," *2016 IEEE Annual India Conference (INDICON)*, 2016, pp. 1-4.
- [10] K. P. McParland and M. S. Mirotznik, "Design and Additive Manufacture of Multi-Tapered Coaxial Baluns," in *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 12, no. 11, pp. 1806-1815, Nov. 2022.
- [11] M. Zawad, S. Rana, T. D. Fields, A. N. Caruso, K. C. Durbhakula, and M. Z. M. Hamdalla, "High-Power Microwave Antennas: A Comprehensive Review," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 76217-76256, 2025.
- [12] M. Sierra-Castañer, "Review of Recent Advances and Future Challenges in Antenna Measurement," *ACES Journal*, vol. 33, no. 01, pp. 99–102, Jul. 2021.
- [13] S. T. Paine, "Design and implementation of a dual polarised L-band parabolic dish antenna for NeXtRAD," PhD. Thesis, University of Cape Town, 2016.
- [14] F. Vega, A. Banelli, A. R. Baba, A. Alebri, and C. Kasmi, "A Novel Coaxial Balun for High Power Electromagnetic Applications," *2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI)*, Singapore, 2021, pp. 685-686.
- [15] G. Xu, S.-T. Chen, and Y. Liao, "Optimized Design of an L-Band High Compact Power Microwave Power Divider Algorithm," *Journal of Microwaves*, vol. 30, no. s1, pp. 341-343, 2014.