Tính toán, thiết kế bộ chiếu xạ dải tần rộng anten định hướng ứng dụng trong ra đa thụ động

Trần Minh Nghĩa*, Lưu Đức Thọ, Phạm Khắc Lanh, Lương Văn Trình, Nguyễn Văn Việt

Viện Ra đa/Viện Khoa học và Công nghệ quân sự.
*Email: ngrad68@gmail.com
Nhận bài: 31/8/2022; Hoàn thiện: 18/11/2022; Chấp nhận đăng: 28/11/2022; Xuất bản: 23/12/2022.
DOI: https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2022.121-128

TÓM TẮT

Hiện nay, anten parabol được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi trong các mục đích quân sự và dân sự. Tuy nhiên, để đảm bảo hệ thống anten làm việc ở dải tần số rộng, mà vẫn đáp ứng được hệ số tăng ích và tính định hướng cao ở cả 2 mặt phẳng là vấn đề phức tạp. Trong bài báo này, nhóm tác giả trình bày các kết quả nghiên cứu, thiết kế bộ chiếu xạ sử dụng ống dẫn sóng có gờ kết hợp thấu kính điện môi làm việc ở dải tần số 4 đến 8 GHz (băng tần C). Kết quả phân tích nguyên lý hoạt động, tính toán và mô phỏng trên phần mềm CST 2019 cho thấy hệ thống anten có hệ số tăng ích và tính định hướng cao ở cả 2 mặt phẳng trên dải tần số rộng, đáp ứng các yêu cầu hoạt động trên các đài ra đa thụ động.

Từ khóa: Ra đa thụ động; Anten parabol; Thấu kính điện môi.

1. MỞ ĐẦU

Hệ thống ra đa thụ động (passive radar system) là một lớp các hệ thống ra đa phát hiện và theo dõi các mục tiêu bằng cách thu và xử lý các nguồn sóng do chính mục tiêu tự bức xạ để xác định vị trí và tọa độ mục tiêu. Ra đa thụ động sở hữu nhiều lợi thế quan trọng, mà đầu tiên là không thể bị phát hiện bằng các phương tiện trinh sát vô tuyến. Khác với các ra đa chủ động, ra đa thụ động không phát ra bất kỳ sóng vô tuyến nào của riêng nó, do đó, vô hình với các hệ thống dò tìm ra đa, chúng chỉ sử dụng các máy thu với hệ thống anten đa kênh dải rộng. Chính vì thế, anten thu của hệ thống ra đa thụ động phải làm việc trong dải tần số rộng, đảm bảo phát hiện và định vị các mục tiêu làm việc ở các tần số khác nhau. Các thiết kế anten của ra đa thụ động hiện có thường sử dụng nhiều loại anten như: anten parabol, anten mạng,... Các loại anten này sử dụng các bộ chiếu xạ như: ống dẫn sóng, loa, khe,... Ống dẫn sóng có thiết kế đơn giản, nhưng chỉ làm việc trong dải tần số hẹp [1]. Các thiết kế anten thường chỉ đáp ứng hệ số tăng ích và mức búp sóng phụ trong mặt phẳng E hoặc H [5-8]. Trong bài báo này, nhóm tác giả trình bày các kết quả nghiên cứu và thiết kế bộ chiếu xạ làm việc ở dải tần số 4-8 GHz (băng tần C), sử dụng ống dẫn sóng có gờ kết hợp thấu kính điện môi. Các kết quả tính toán và mô phỏng cho thấy, anten làm việc trên dải tần số rộng và hệ số tăng ích tương đồng tại cả 2 mặt phẳng.

2. NỘI DUNG CẦN GIẢI QUYẾT

2.1. Tính toán, thiết kế bộ chiếu xạ anten dải tần rộng

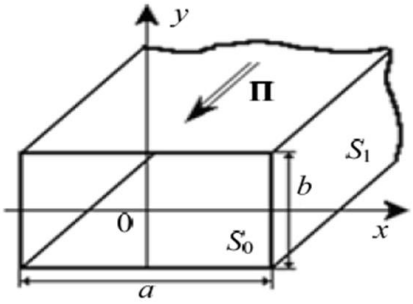
Sử dụng bộ chiếu xạ bằng các ống dẫn sóng hình chữ nhật được sử dụng rộng rãi trong hệ thống anten gương, anten thấu kính và anten mạng pha,... Điều kiện tồn tại sóng trong ống dẫn sóng là: $\lambda < \frac{2}{\sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2}}$, trong đó, λ là bước sóng; *a, b* tương ứng là chiều dài và chiều của rộng ống dẫn sóng; *m, n* tương ứng là loại sóng trong ống dẫn sóng.

Tùy thuộc vào kích thước, trong ống dẫn sóng có thể tồn tại nhiều loại sóng khác nhau, nhưng sóng chính trong ống dẫn sóng hình chữ nhật là sóng TE (H_{10}) [9]. Điều kiện chỉ tồn tại sóng H_{10} là: $\lambda < 2a$.

Giản đồ hướng của ống dẫn sóng hình chữ nhật trong mặt phẳng E và H được xác định bằng công thức:

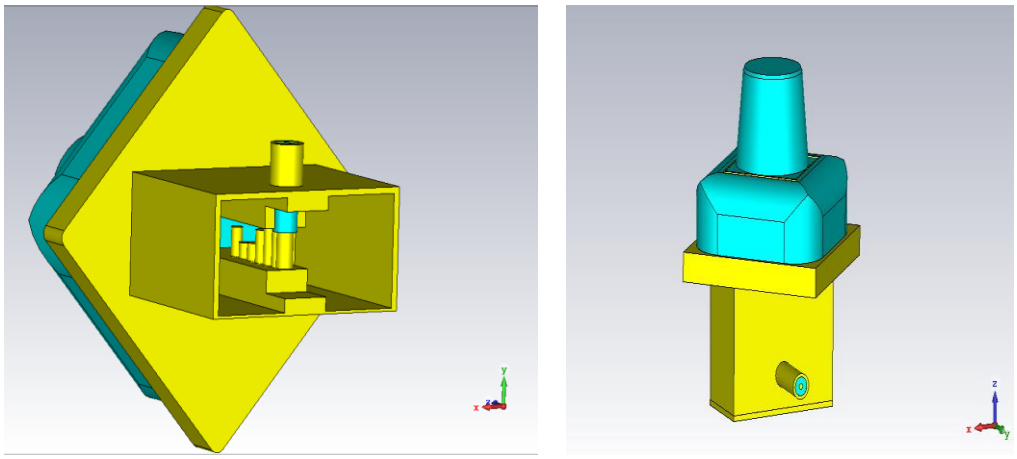
$$F_E(\theta)=\frac{1+\sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}\cos\theta}{1+\sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}\frac{\sin\left(\frac{\pi b}{\lambda}\sin\theta\right)}{\frac{\pi b}{\lambda}\sin\theta}, \quad (1)$$

$$F_H(\theta)=\frac{\pi^2}{4}\frac{\sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}+\cos\theta}{\sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}+1}\frac{\cos\left(\frac{\pi a}{\lambda}\sin\theta\right)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2-\left(\frac{\pi a}{\lambda}\sin\theta\right)^2}.$$



Hình 1. *Hình ảnh ống sóng hình chữ nhật.*

Ống dẫn sóng hình chữ nhật có kết cấu đơn giản, dễ gia công chế tạo, giá thành sản xuất thấp. Tuy nhiên, lại có các mặt hạn chế như tính định hướng không cao, tính tương thích với môi trường không gian ngoài ống dẫn sóng kém. Do vậy, nhóm tác giả nghiên cứu và tính toán bộ chiếu xạ có gờ kết hợp thấu kính điện môi như trên hình 2. Việc sử dụng bộ chiếu xạ có gờ kết hợp thấu kính điện môi nhằm mục đích thu được giản đồ hướng tương đồng tại cả 2 mặt phẳng và giảm kích thước tổng thể của hệ thống anten.



Hình 2. *Bộ chiếu xạ anten trên phần mềm CST.*

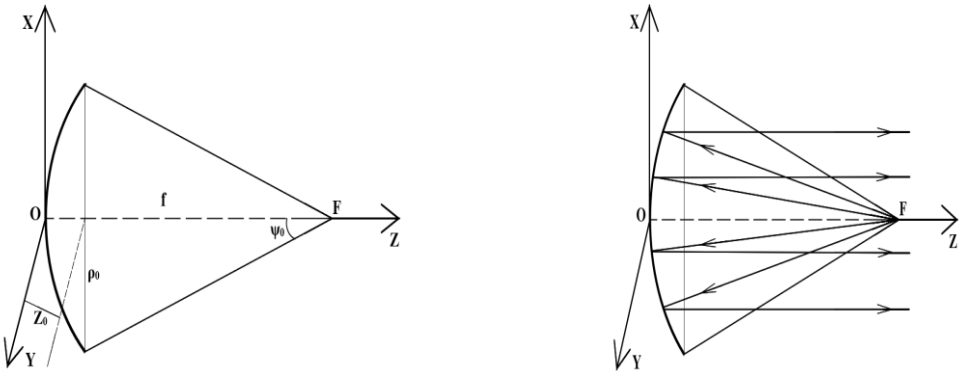
Bộ chiếu xạ được cấu tạo bởi 1 đoạn ống dẫn sóng hình chữ nhật có gờ ở 2 bên thành rộng ngắn mạch đầu cuối [2-4]. Mặt mở của bộ chiếu xạ là đoạn ống dẫn sóng vuông có gờ ở cả 4 thành và được xoay nghiêng một góc 45^o so với trục ngang của đoạn ống dẫn sóng chữ nhật, để

bộ chiếu xạ không phụ thuộc phân cực của sóng tới. Đầu ra của bộ chiếu xạ là bộ chuyển đổi sang cáp đồng trục để nhận tín hiệu. Mặt mở của bộ chiếu xạ được tiếp nối bằng một thấu kính điện môi để đạt được dạng đồ thị bức xạ mong muốn của hệ thống anten. Tuy nhiên, việc sử dụng bộ chiếu xạ kết hợp thấu kính điện môi, thường sẽ dẫn đến sự tổn hao trong lớp điện môi, đó là nguyên nhân làm giảm hệ số tăng ích và xuất hiện sự sai lệch về biên độ. Chính vì thế, phải sử dụng chất điện môi có hằng số điện môi lớn hơn so với hằng số điện môi của chân không, ngoài ra phải có tang của góc suy hao điện môi nhỏ ở tần số làm việc. Chất điện môi phải đảm bảo khả năng hấp thụ và truyền sóng tốt trong dải tần số làm việc. Từ những yêu cầu về lựa chọn chất điện môi và tối ưu giá trị trên phần mềm mô phỏng, nhóm tác giả lựa chọn chất điện môi Teflon (hằng số điện môi là 3 và góc tang suy hao là 0.007). Để thu được hệ số phản xạ S_{11} tốt nhất trên dải tần số, tác giả sử dụng các ốc vít có đường kính và khoảng cách như nhau để điều chỉnh.

2.2. Tính toán, thiết kế anten parabol sử dụng bộ chiếu xạ dải tần rộng

Anten gương là anten định hướng phổ biến, được ứng dụng rộng rãi nhất. Anten gương có kết cấu đơn giản, có thể nhận được các dạng giản đồ hướng khác nhau và hệ số tăng ích cao.

Nguyên lý làm việc của anten gương cũng tương tự như nguyên lý của gương quang học. Sóng điện từ trường từ bộ chiếu xạ đặt tại tiêu điểm phát ra, khi đi tới bề mặt dẫn điện của gương, sẽ kích thích dòng điện trên đó, tạo ra trường thứ cấp hay còn gọi là trường của sóng phản xạ với dạng của mặt sóng và hướng truyền lan biến đổi theo yêu cầu. Trong phần lớn các trường hợp, mặt gương có nhiệm vụ biến đổi sóng cầu với tính định hướng kém, thành sóng phẳng hoặc gần phẳng với năng lượng tập trung trong một góc không gian hẹp, để thu được giản đồ hướng có hệ số tăng ích và tính định hướng cao [9-13].



Hình 3. *Nguyên lý hoạt động của anten parabol.*

Bề mặt parabol được hình thành khi quay xung quanh trục tiêu điểm *Oz* được viết dưới dạng: $x^2=4fz$.

Bán kính mở của gương là: $\rho_0 = 2f\tan\frac{\psi_0}{2}$, (2)

Trong đó, $2\psi_0$ là góc mở của gương, f là tiêu cự parabol.

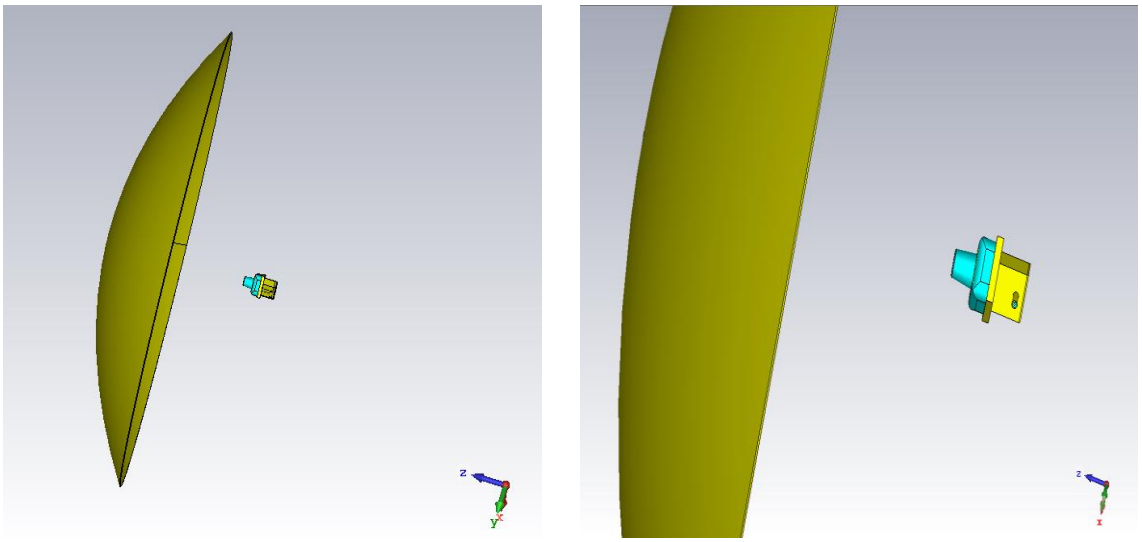
Chiều sâu của gương là: $z_0 = \frac{\rho_0^2}{4f}$, (3)

Trong đó, ρ_0 là bán kính của gương.

Độ rộng búp sóng: $2\theta_{0.5} = (65...70)\frac{\lambda}{2\rho_0}$. (4)

Hệ số tăng ích của anten có thể được tính theo công thức: $G = \frac{160^2}{\theta_{Az}\theta_{El}}$, (5)

Trong đó, θ_{Az}, θ_{El} tương ứng là độ rộng búp sóng trong mặt phẳng ngang và đứng.



Hình 4. *Anten parabol, sử dụng bộ chiếu xạ dải tần rộng trên phần mềm CST.*

Dựa trên các tham số kích thước của anten, chúng ta có thể tính toán được các tham số kỹ thuật của anten thông qua các công thức như sau:

Hệ số định hướng của anten: $D = \frac{4\pi S}{\lambda^2}\nu$, (6)

Trong đó, S là diện tích khẩu độ của anten, ν là hệ số sử dụng bề mặt khẩu độ.

Hệ số tăng ích của anten: $G = D\eta$, (7)

$$\eta = \eta_a \eta_p,$$

$$\eta_p = \frac{4T_{WR}\exp(-2\alpha l)}{(1+)T_{WR}^{\ 2}},$$

$$\eta_a = \frac{\int_{\theta=0}^{\psi_0}\int_{\varphi=0}^{2\pi} F^2(\theta,\varphi)\sin\theta d\theta d\varphi}{\int_{\theta=0}^{\pi}\int_{\varphi=0}^{2\pi} F^2(\theta,\varphi)\sin\theta d\theta d\varphi},$$

Trong đó, η_a, η_p lần lượt là hệ số tăng ích của khẩu độ gương và đường truyền; $F(\theta,\varphi)$ là giản đồ hướng chuẩn hóa của bộ chiếu xạ; T_{WR} là hệ số sóng chạy; α là hệ số tắt dần; l là chiều dài đường truyền.

3. MÔ PHỎNG, TÍNH TOÁN, THẢO LUẬN

3.1. Số liệu đầu vào

Dựa vào các yêu cầu về tham số kỹ thuật và công thức 1-7, đồng thời tối ưu các tham số kích thước trên phần mềm mô phỏng. Từ đó, xây dựng bản vẽ 3D trên phần mềm mô phỏng CST 2019 với các tham số chính của anten như trong bảng 1.

Bảng 1. *Các tham số kích thước chính của anten.*

STT	Ký hiệu	Gía trị
1	f	4-8 GHz
2	a	32.95 mm
3	b	15.2 mm
4	F	340 mm
5	ρ_0	475 mm
6	ε	3

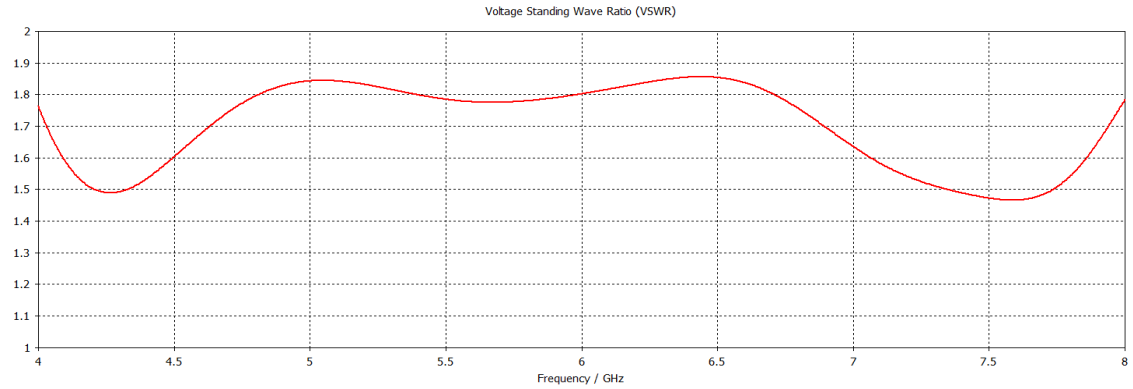
3.2. Phương pháp, công cụ mô phỏng

Sử dụng phương pháp tính toán trong miền thời gian (Time Domain Solver) trên phần mềm mô phỏng CST 2019.

Qua quá trình mô phỏng trên phần mềm, thu được các tham số anten:

- Giản đồ hướng 3D, 2D;
- Hệ số sóng đứng;
- Hệ số tăng ích.

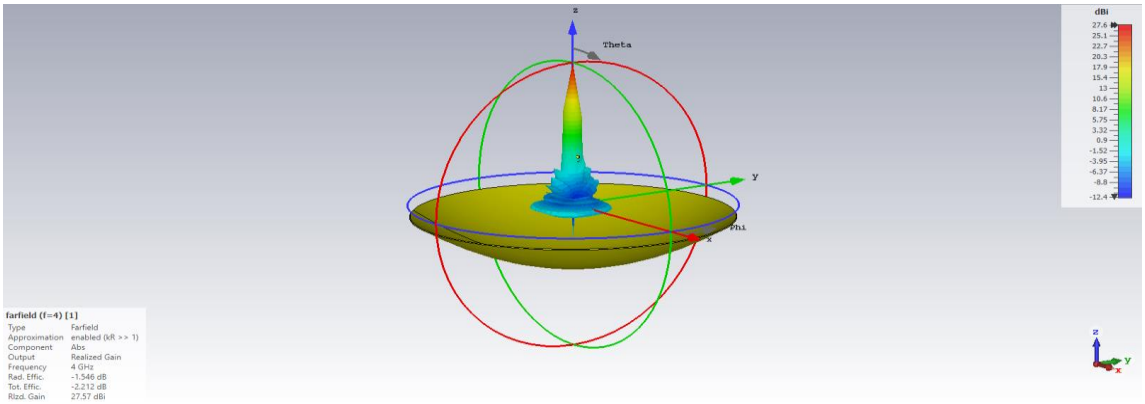
3.3. Kết quả mô phỏng



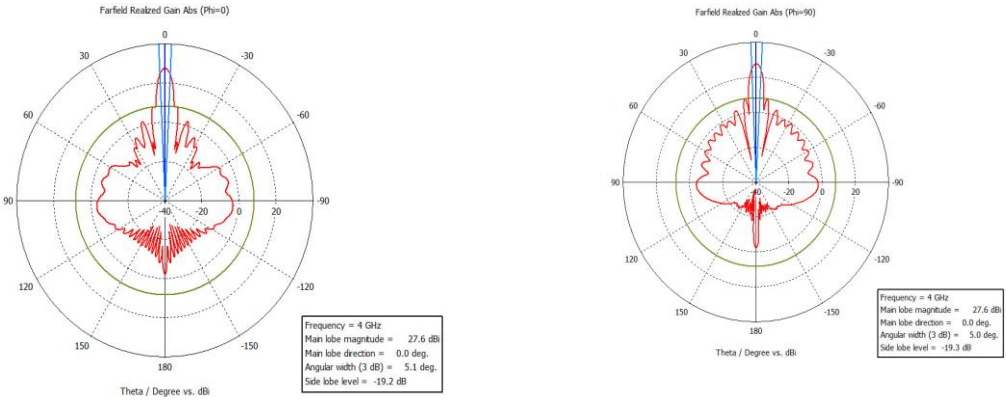
Hình 5. *Hệ số sóng đứng của anten.*

Từ hình 5, hệ số sóng đứng của anten nhỏ hơn 1.85 trong dải tần số 4÷8 GHz, đáp ứng tốt trong các đài ra đa thụ động. Kết quả giản đồ hướng tại tần số 4 GHz được trình bày trong hình 6.

Từ hình 6, hệ số tăng ích của anten tại tần số 4 GHz ở cả 2 mặt phẳng là 27.6 dB và mức búp sóng phụ nhỏ hơn -19.2 dB. Kết quả giản đồ hướng tại tần số 8 GHz được trình bày trong hình 7.

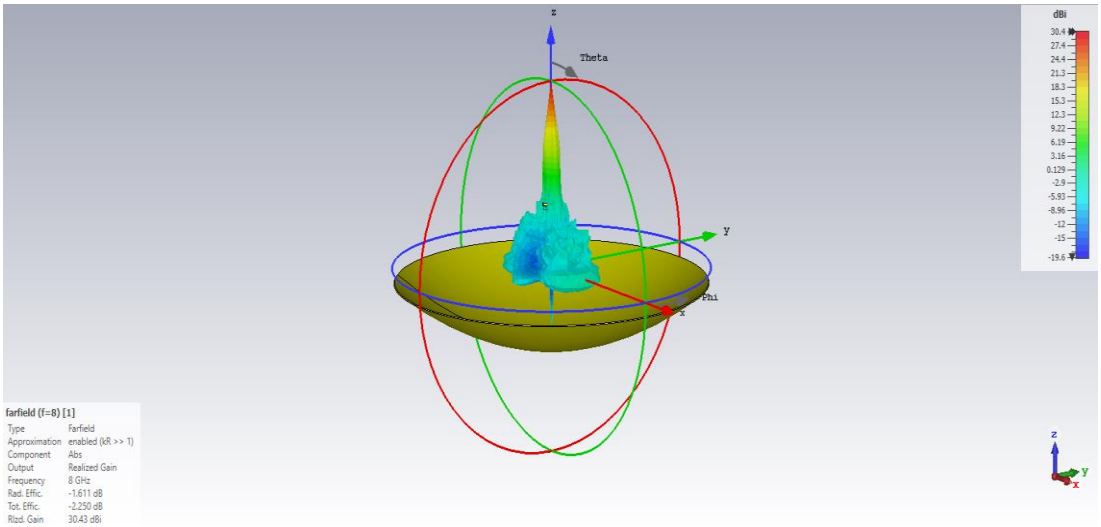


a) Giản đồ hướng 3D.

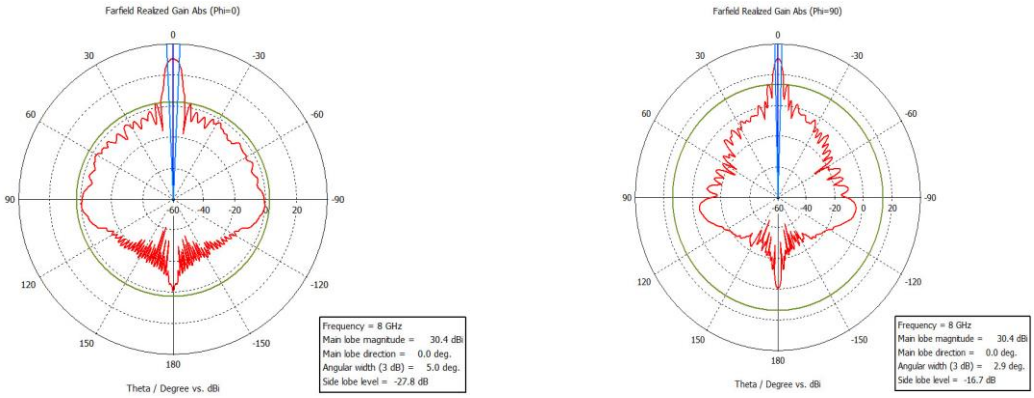


b) Giản đồ hướng 2D.

***Hình 6**. Giản đồ hướng tại f = 4 GHz.*



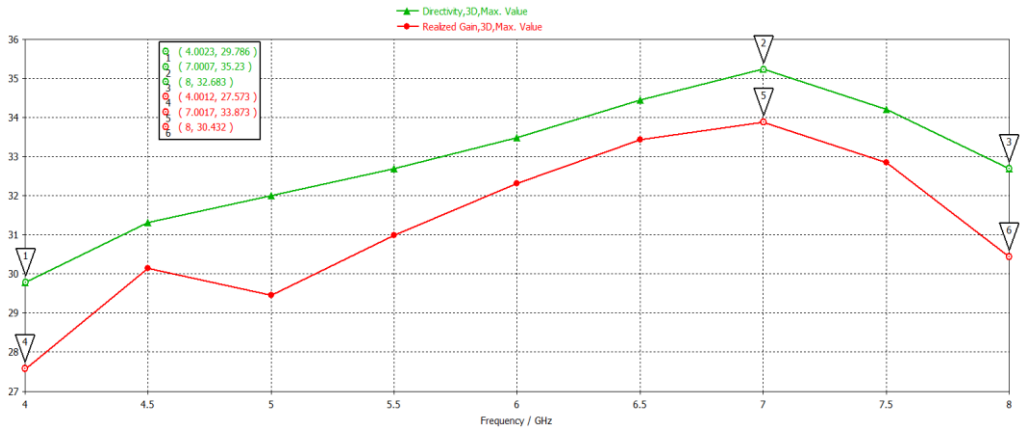
a) Giản đồ hướng 3D.



a) Giản đồ hướng 2D.

***Hình 7.** Giản đồ hướng tại f = 8 GHz.*

Từ hình 7, hệ số tăng ích của anten tại tần số 8 GHz ở cả 2 mặt phẳng là 30.4 dB và mức búp sóng phụ nhỏ hơn -16.7 dB.



Hình 8. *Hệ số tăng ích của anten.*

Từ hình 8, anten làm việc trong dải tần số 4÷8 GHz với hệ số tăng ích lớn hơn 27.6 dB. Hệ số tăng ích cao trong dải tần số làm việc, đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật cho các đài ra đa thụ động hiện nay.

3.4. Phân tích kết quả mô phỏng

Qua kết quả mô phỏng đưa ra các tham số kỹ thuật của anten như sau:

Bảng 2. *Các tham số kỹ thuật của anten.*

TT	Tham số kỹ thuật	Đơn vị đo	Kết quả mô phỏng
1	Dải tần số	GHz	4÷8
2	Dạng giản đồ hướng		Hình Kim
3	Hệ số sóng đứng		<1.85
4	Hệ số tăng ích - Directivity - Realized Gain	dBi	 $29.8 \le G \le 35.2$ $27.6 \le G \le 33.9$
5	Độ rộng búp sóng (mức -3 dB)	Độ	$2\theta \le 5.1^0$
6	Mức búp sóng phụ	dBi	≤ -16.7

Từ kết quả trong bảng 2, ta thấy rằng, các tham số kỹ thuật đáp ứng tốt cho các hệ thống anten trên đài ra đa thụ động.

4. KẾT LUẬN

Trên đây, nhóm tác giả đã trình bày một cách tổng quát các bước tính toán thiết kế bộ chiếu xạ sử dụng ống dẫn sóng có gờ kết hợp thấu kính điện môi, để giảm kích thước tổng thể của anten. Kết quả tính toán cho thấy, anten làm việc với hệ số sóng đứng nhỏ hơn 1.85 và hệ số tăng ích lớn hơn 27.6 dBi trên dải tần số 4-8 GHz, đáp ứng các yêu cầu tham số kỹ thuật trên các đài ra đa thụ động. Những kết quả này là cơ sở để chế tạo bộ chiếu xạ làm việc ở dải tần số 4 đến 8 GHz (băng tần C), với các tham số kỹ thuật đảm bảo cho hoạt động của hệ thống anten trên đài ra đa thụ động.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. M.F. Shah, A.A. Fouzia, *"Design and Analysis of Multiple Ridge Waveguide for Wideband Application"*, IEEE ICACCCT, (2014).

[2]. Ali Mehrdadian, Hojjatollah Fallahi, Mohsen Kaboli and Seyyed Abdollah Mirtaheri, *"Design and Implementation of 0.7 to 7 GHz Broadband Double-Ridged Horn Anten20"*. 2014 7th International Symposium on Telecommunications, (2014)

[3]. Alberto Di Maria, Alicja Kość, Markus Limbach, Ralf Horn and Andreas RReigbe, *"Design and Measurements of a Double Ridged Guide Horn Feed for P-Band Direct Path Meeasurement"*, 2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), (2013).

[4]. Ali Mehrdadian, Keyvan Forooraghi. *"Design of a Novel 0.2 to 40 GHz Ultra-Wideband High-Gain Combined Antenna with and without Dielectric Lens"*, 2018 9th International Symposium on Telecommunications, (2018).

[5]. Е.И. Лаврецкий, В.С. Чернышов, *"Исследование влияния регулярных фазовых ошибок на характеристики зеркальной параболической антенны с электрическим сканированием"*, Журнал радиоэлектроники, (2015).

[6]. А.И. Круглов, К.Н. Климов, К.С. Мещерякова, "*Расчет многолучевой зеркальной антенны гибридным методом в программе ANSYS HFSS"*, Крымская конференция СВЧ и телекоммуникационные технологии, стр. 499-500, (2014).

[7]. А. Курушин, Е. Лаврецкий, С. Чадов, *"Расчет зеркальных параболичесских антенн с помощью современных САПР СВЧ"*, Журнал современной электроники, (2014).

[8]. А.В. Халла, *"Расчет импульсной зеркальной антенны",* Достижения вузовской науки, стр. 146-152.

[9]. Д.Ю. Муромцев, О.А. Белоусов, *"Техническая электродинамика",* ФГБОУ ВПО ТГТУ, (2012).

[10]. П. Вуд, *"Анализ и проектирование зеркальных антенн"*, (1984).

[11]. Г.Т. Марков, Д.М. Сазонов, *"Антенны",* Москва, (1975).

[12]. А.А. Филонов, А.Н. Фомин, Д.Д. Дмитриев, В.Н.Гяпкин, Ю.Л. Фатеев, Е.Н. Гарин, В.Н. Ратушняк, И.В. Лютиков, В.А. Леусенко, *"Устройство СВЧ и антенны"*, Сибирский федеральный университет, (2014).

[13]. А.И. Семенихин, С.Н. Стаканов, В.В. Петренко, *"Проектирование зеркальных антенн с помощью пакета Mathcad"*, Таганрог, (1998).

ABSTRACT

Calculation and design of directional antenna wideband irradiators for passive radar applications

Recently, parabolic antennas have been widely investigated and applied for military and civilian purposes. However, ensuring that the antenna system works in a wideband frequency while still meeting the gain and high directivity in both planes is a complicated issue. In this paper, the authors present the results of research and design of an irradiator using ridged waveguides combined with dielectric lenses working in the frequency range 4 - 8 GHz (C band). The results of the analysis of operating principles, calculations and simulations on CST 2019 software show that the antenna system has high gain and directivity in both planes over a wide frequency range, meeting the requirements of operating on passive radars.

Keywords: Passive radar; Parabolic antenna; Dielectric lens.