

## Ăng ten ống dẫn sóng khe dọc với góc quét rộng theo tần số

Lê Doãn Trinh\*

Viện Thiết kế tàu quân sự, Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng.

\*Email: anhletrinhnd@gmail.com

Nhận bài: 13/9/2023; Hoàn thiện: 09/11/2023; Chấp nhận đăng: 15/11/2023; Xuất bản: 10/12/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2023.92-96>

### TÓM TẮT

Bài báo phân tích và tổng hợp ăng ten ống dẫn sóng khe dọc để mở rộng góc quét theo tần số bằng việc đồng thời khắc phục hiện tượng cộng hưởng phản xạ ( $f = 17.3$  GHz) và tạo sự phân bố biên độ đều dọc ống dẫn sóng ( $f = 19.6$  GHz). Ăng ten ống dẫn sóng có dạng hình hộp chữ nhật, bên trong chứa chất điện môi từ vật liệu Rogers RO4003 ( $\epsilon = 3.55$ ), trên cạnh dài của hình hộp chữ nhật có các cặp khe dọc được phân bố dọc theo ống dẫn sóng. Kết quả tính toán cho thấy rằng, có thể cùng lúc khắc phục được hiện tượng cộng hưởng phản xạ khi búp sóng chính vuông góc với ống dẫn sóng và tổng hợp được sự phân bố biên độ đều dọc theo ống dẫn sóng ở hai tần số khác nhau. Việc tổng hợp đã giúp tăng hệ số khuếch đại của ăng ten lên 0.8 dB tại tần số 17.3 GHz và tăng 2.8 dB ở tần số 21.5 GHz. Đồng thời, góc quét theo tần số của ăng ten sau khi tổng hợp (58 độ) cũng được mở rộng hơn so với trước khi tổng hợp (50 độ).

**Từ khóa:** Ăng ten ống dẫn sóng; Khe dọc; Sự phân bố biên độ; Phương pháp phần tử hữu hạn.

### 1. MỞ ĐẦU

Trong những năm gần đây, rất nhiều nhà khoa học trên thế giới đã nghiên cứu ăng ten ống dẫn sóng nhằm nâng cao các thông số kỹ thuật và giảm giá thành của chúng. Những nghiên cứu cơ bản về ăng ten ống dẫn sóng đã được trình bày trong rất nhiều tài liệu khác nhau [1-4].

Để nâng cao các thông số kỹ thuật của ăng ten, một trong những hướng nghiên cứu chính đó là mở rộng góc quét của ăng ten theo tần số. Hiện nay, đã có rất nhiều bài báo với nhiều phương pháp khác nhau được đưa ra để mở rộng góc quét theo tần số, ví dụ như: Bài báo [5] đã tổng hợp chiều dài của 4 khe dọc; Bài báo [6] đã bổ sung thêm 4 lỗ nằm xung quanh khe dọc; Bài báo [7] đã sử dụng khe dọc kết hợp với khe ngang; Bài báo [8] đã thay đổi hằng số điện môi tại các vị trí có khe dọc; Bài báo [9] đã sử dụng 2 lớp điện môi kết hợp với các khe trong lớp điện môi.

Tuy nhiên, tất cả các nghiên cứu trên đều chưa đề cập đến vấn đề tổng hợp ăng ten ống dẫn sóng để cùng lúc có thể khắc phục được hiện tượng cộng hưởng phản xạ khi búp sóng chính vuông góc với ống dẫn sóng, và tạo được sự phân bố biên độ đều dọc ống dẫn sóng tại 2 tần số khác nhau, nhằm mở rộng góc quét theo tần số. Bởi vì, nếu chỉ thay đổi chiều dài của khe dọc hoặc chỉ thay đổi hằng số điện môi dọc theo ống dẫn sóng thì ta chỉ có thể khắc phục được một trong hai vấn đề trên.

Vi vậy, để đồng thời giải quyết hai vấn đề này, bài báo sẽ tổng hợp lại các tham số của lớp điện môi để thay đổi hằng số điện môi dọc theo ống dẫn sóng nhằm khắc phục hiện tượng cộng hưởng phản xạ và tổng hợp lại chiều dài các khe dọc để tổng hợp sự phân bố biên độ đều dọc theo ống dẫn sóng.

Cấu trúc của bài báo như sau: Phần 2 – Đối tượng nghiên cứu; Phần 3 – Tính toán các tham số của ăng ten; Phần 4 – Kết quả tổng hợp ăng ten; Phần 5 – Kết luận.

### 2. ĐỐI TƯỢNG NGHIÊN CỨU

Đối tượng nghiên cứu của bài báo là ăng ten ống dẫn sóng khe dọc với một chu kì được thể hiện ở hình 1. Trong đó:  $a = 6.6$  mm – Chiều rộng của ăng ten;  $p = 12.8$  mm – Chiều dài 1 chu kì của ăng ten;  $w$  – Chiều rộng của khe dọc;  $s$  – Chiều dài của khe dọc. Độ dày của ăng ten là 0.813

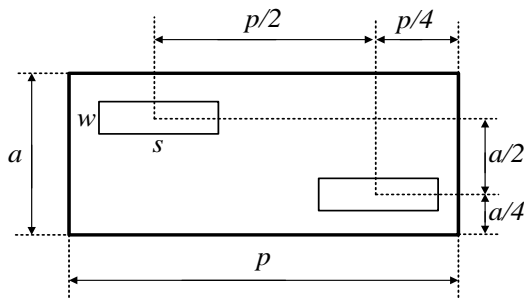
mm. Ăng ten được làm từ đồng với độ dày 0.035 mm. Bên trong chứa chất điện môi từ vật liệu Rogers RO4003 ( $\epsilon = 3.55$ ).

Nhằm mở rộng góc quét của ăng ten theo tần số, bài báo sẽ đi giải quyết hai vấn đề đó là:

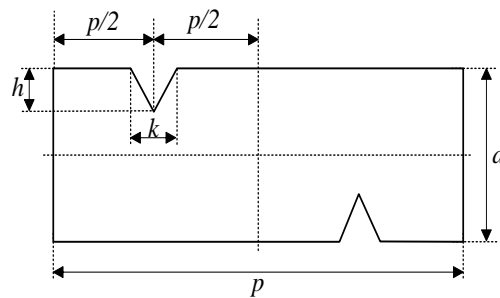
- Khắc phục được sự cộng hưởng phản xạ ở tần số thứ nhất khi búp sóng chính vuông góc với ống dẫn sóng.
- Tạo được sự phân bố biên độ đều dọc theo ống dẫn ở tần số thứ hai.

Để giải quyết vấn đề thứ nhất: Bài báo đã thay đổi cấu trúc lớp điện môi nhằm thay đổi hằng số điện môi dọc theo ống dẫn sóng, bằng việc thay đổi chiều cao phần bị cắt của lớp điện môi (hình 2 -  $h$  là chiều cao phần bị cắt của lớp điện môi,  $k$  là chiều rộng phần bị cắt của lớp điện môi).

Để giải quyết vấn đề thứ hai: Thông qua việc tính toán hệ số truyền sóng, bài báo đã thay đổi chiều dài khe dọc của khe dọc ( $s$ ) và cố định chiều rộng của khe dọc.



**Hình 1.** Một chu kỳ của ăng ten ống dẫn sóng với khe dọc.



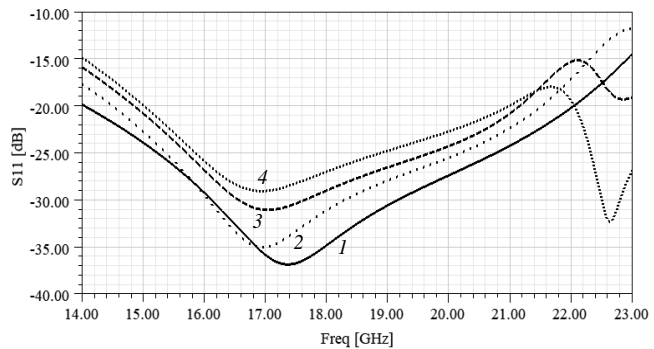
**Hình 2.** Cấu trúc lớp điện môi.

### 3. TÍNH TOÁN CÁC THAM SỐ CỦA ĂNG TEN

#### 3.1. Tổng hợp chiều cao phần bị cắt của lớp điện môi.

Để khắc phục hiện tượng cộng hưởng phản xạ, bài báo đã chọn 4 giá trị chiều dài khe dọc lần lượt là  $s_1 = 4.3$  mm,  $s_2 = 4.6$  mm,  $s_3 = 4.9$  mm,  $s_4 = 5.1$  mm, cố định chiều rộng phần bị cắt của lớp điện môi  $k = 0.9$  mm và thay đổi chiều cao phần bị cắt, sao cho tại tần số = 17.3 GHz, hệ số phản xạ của một chu kỳ là nhỏ nhất.

Bằng phương pháp phần tử hữu hạn, bài báo đã tìm ra được 4 giá trị của  $h$  để hệ số phản xạ ( $S_{11}$ ) đạt giá trị nhỏ nhất, đó là:  $h_1 = 0.99$  mm,  $h_2 = 1.15$  mm,  $h_3 = 1.28$  mm,  $h_4 = 1.36$  mm, tương ứng với chiều dài khe dọc bên trên. Hình 3 thể hiện sự phụ thuộc hệ số phản xạ vào tần số với từng giá trị chiều dài của khe dọc, trong đó: 1 -  $s_1 = 4.3$  mm, 2 -  $s_2 = 4.6$  mm, 3 -  $s_3 = 4.9$  mm, 4 -  $s_4 = 5.1$  mm.



**Hình 3.** Sự phụ thuộc của hệ số phản xạ vào chiều dài của khe dọc.

Bằng phương pháp gần đúng, ta có phương trình thể hiện sự phụ thuộc của chiều cao phần cắt lớp điện môi vào chiều dài khe dọc, nhằm khắc phục hiện tượng cộng hưởng phản xạ, như sau:

$$h(s) = 0.125s^3 - 1.8917s^2 + 9.9404s - 16.715 \quad (1)$$

#### 3.2. Tổng hợp chiều dài của khe dọc.

Để tính toán hệ số truyền sóng tại tần số 19.6 GHz, bài báo lấy 4 giá trị chiều dài khe dọc lần

lượt là  $s_1 = 4.3$  mm,  $s_2 = 4.6$  mm,  $s_3 = 4.9$  mm,  $s_4 = 5.1$  mm, cố định chiều rộng của khe dọc  $w = 0.4$  mm, tính toán độ lệch pha ( $\Delta\varphi$ ) và hệ số phẩm ( $Q$ ) của một chu kì, thông qua phương pháp EigenMode [10], với các công thức (2), (3), (4), (5). Trong đó:  $\lambda$  – Bước sóng;  $c$  – Tốc độ ánh sáng;  $f$  – Tần số tính toán;  $k$  – Số lượng các bước sóng;  $\beta$  – Phần ảo của hệ số truyền sóng;  $\Delta\varphi$  – Độ lệch pha trong 1 chu kì;  $p$  – Chiều dài của 1 chu kì;  $\alpha$  – Phần thực của hệ số truyền sóng;  $Q$  – Hệ số phẩm chất. Sau khi tính toán, ta có bảng 1:

**Bảng 1.** Sự phụ thuộc hệ số truyền sóng vào chiều dài của khe dọc.

|                                | $s$        | $\Delta\varphi$ | $Q$    | $\beta$ | $\alpha$ |
|--------------------------------|------------|-----------------|--------|---------|----------|
| $\lambda = c/f$ (2)            | <b>4.3</b> | 268.5           | 133.41 | 366.11  | 2.156    |
| $k = 2\pi/\lambda$ (3)         | <b>4.6</b> | 267.3           | 97.27  | 364.47  | 2.971    |
| $\beta = \Delta\varphi/p$ (4)  | <b>4.9</b> | 264.9           | 68.87  | 361.2   | 4.234    |
| $\alpha = k^2/(2*Q*\beta)$ (5) | <b>5.1</b> | 262.1           | 53.63  | 357.38  | 5.495    |

Để tổng hợp sự phân bố biên độ đều dọc theo ống dẫn sóng, ta sẽ tổng hợp thông qua phần thực của hệ số truyền sóng [5]. Bằng phương pháp gần đúng, ta có thể viết lại sự phụ thuộc của phần thực của hệ số truyền sóng vào chiều dài của khe dọc theo công thức:

$$\alpha(s) = 0.014 * e^{1.19s} \quad (6)$$

### 3.3. Tổng hợp các tham số của ăng ten.

Bằng việc tích phân phần thực của hệ số truyền sóng dọc theo ống dẫn sóng của ăng ten, ta có công thức thể hiện sự phụ thuộc của phần thực hệ số truyền sóng vào tọa độ  $y$  với sự phân bố biên độ đều dọc theo ống dẫn sóng là [1]:

$$\alpha(y) = \frac{10^3}{\int_y^L dy + \frac{P_L}{P_0 - P_L} \int_0^L dy} \quad (7)$$

Trong đó:  $P_0 = 1$  – công suất ở đầu vào của ăng ten,  $P_L = 0.1$  – công suất ở đầu ra của ăng ten,  $L$  – chiều dài của ăng ten,  $y$  – vị trí trung tâm của chu kì.

Từ công thức (6) và (7), ta có công thức thể hiện sự phụ thuộc của chiều dài khe dọc vào tọa độ  $y$  là:

$$s(y) = \frac{\ln(0.5*\alpha(y)) - \ln(0.014)}{1.19} \quad (8)$$

Giả sử ăng ten có 16 chu kì, từ công thức 6, 7, 8, ta tính được chiều dài của khe dọc, sau đó thay vào công thức 5 để tìm chiều cao phần bị cắt của lớp điện môi. Từ đó, ta có bảng 2.

**Bảng 2.** Chiều dài của khe dọc và chiều cao phần bị cắt của lớp điện môi theo chu kì.

| STT           | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>s (mm)</b> | 4.273 | 4.323 | 4.376 | 4.433 | 4.494 | 4.56  | 4.631 | 4.709 |
| <b>h (mm)</b> | 0.973 | 1.003 | 1.034 | 1.065 | 1.097 | 1.13  | 1.164 | 1.199 |
| STT           | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    |
| <b>s (mm)</b> | 4.795 | 4.891 | 4.999 | 5.123 | 5.269 | 5.446 | 5.669 | 5.975 |
| <b>h (mm)</b> | 1.236 | 1.276 | 1.319 | 1.369 | 1.428 | 1.505 | 1.616 | 1.808 |

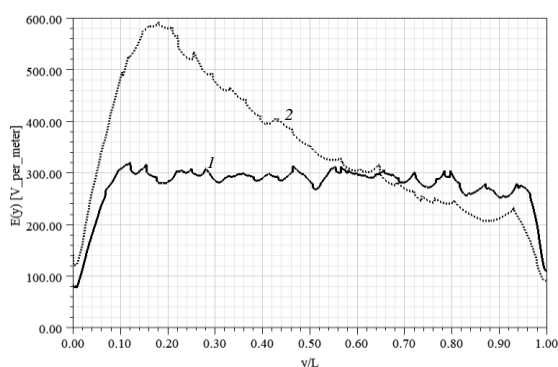
## 4. KẾT QUẢ TỔNG HỢP

Để so sánh kết quả tính toán, ta sử dụng một ăng ten khác cũng có 16 chu kì với tổng chiều

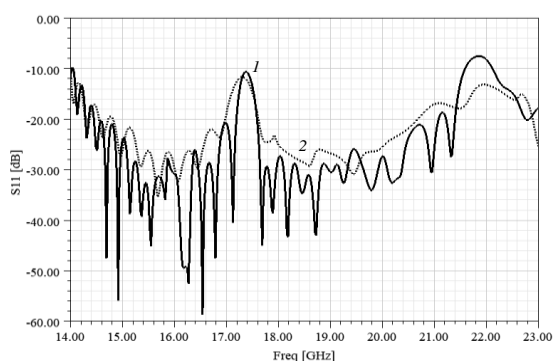
dài bằng với ăng ten đã tổng hợp, độ dài của khe dọc và chiều cao phần bị cắt của lớp điện môi không đổi, và lần lượt bằng  $s = 5.1$  mm,  $h = 1.3$  mm. Các giá trị này đảm bảo cho ăng ten có thể khắc phục được hiện tượng cộng hưởng phản xạ tại tần số 17.3 GHz khi búp sóng chính vuông góc với ống dẫn sóng.

Hình 4 thể hiện sự phân bố biên độ tại tần số  $f = 19.6$  GHz của ăng ten trước (nét đứt) và sau khi tổng hợp (nét liền) chiều dài khe dọc. Hình 5 thể hiện hệ số phản xạ của ăng ten trước (nét đứt) và sau khi tổng hợp (nét liền).

Từ hình 4 thấy rằng: Trước khi tổng hợp, sự phân bố biên độ của ăng ten dọc theo ống dẫn sóng có hàm mũ, còn khi tổng hợp thì sự phân bố biên độ của ăng ten đã là sự phân bố đều. Từ hình 5 thấy rằng: Việc tổng hợp chiều dài của khe dọc hầu như không ảnh hưởng đến hệ số phản xạ của ăng ten. Từ hình 4 và hình 5 thấy rằng có thể cùng một lúc khắc phục hiện tượng cộng hưởng phản xạ và tổng hợp sự phân bố biên độ đều tại 2 tần số khác nhau của ăng ten.

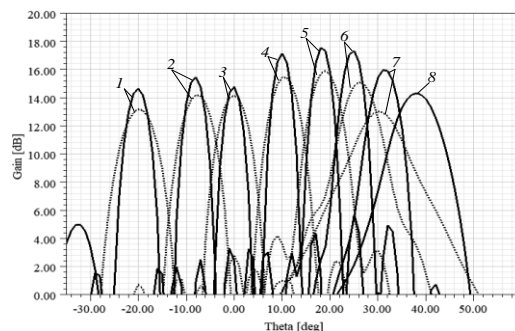


**Hình 4.** Sự phân bố biên độ của ăng ten trước và sau khi tổng hợp chiều dài của khe dọc tại tần số 19.6 GHz.



**Hình 5.** Hệ số phản xạ của ăng ten trước và sau khi tổng hợp chiều dài của khe dọc.

Hình 6 thể hiện giản đồ hướng của ăng ten trước (nét đứt) và sau khi tổng hợp (nét liền) tại các tần số khác nhau (1 – 15.5 GHz, 2 – 16.5 GHz, 3 – 17.3 GHz, 4 – 18.5 GHz, 5 – 19.6 GHz, 6 – 20.5 GHz, 7 – 21.5 GHz, 8 – 22.5 GHz). Từ hình 6 thấy rằng, việc tổng hợp sự phân bố biên độ đều đã giúp tăng hệ số khuếch đại của ăng ten lên 0.8 dB tại tần số 17.3 GHz và tăng 2.8 dB ở tần số 21.5 GHz. Đồng thời, góc quét theo tần số của ăng ten sau khi tổng hợp (58 độ) cũng được mở rộng hơn so với trước khi tổng hợp (50 độ).



**Hình 6.** Giản đồ hướng của ăng ten trước và sau khi tổng hợp chiều dài của khe dọc.

## 5. KẾT LUẬN

Từ kết quả nhận được có thể đưa ra được những kết luận như sau:

- Có thể cùng lúc khắc phục được hiện tượng cộng hưởng phản xạ khi búp sóng chính vuông góc với ống dẫn sóng và tổng hợp được sự phân bố biên độ đều dọc theo ống dẫn sóng ở hai tần số khác nhau.
- Việc tổng hợp đã giúp tăng hệ số khuếch đại của ăng ten lên 0.8 dB tại tần số 17.3 GHz và tăng 2.8 dB ở tần số 21.5 GHz.
- Góc quét theo tần số của ăng ten sau khi tổng hợp (58 độ) được mở rộng hơn so với trước

khi tổng hợp (50 độ).

Việc nghiên cứu ăng ten ống dẫn sóng khe dọc với góc quét theo tần số rộng là cơ sở để tiếp tục nghiên cứu mảng ăng ten phẳng với góc quét rộng.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Уолтер К. “Антенны бегущей волны” // под ред. А. Ф. Чаплина. – М.: Энергия. – (1970).
- [2]. Калошин В. А. “Антенны миллиметровых волн” // Зарубежная радиоэлектроника. №11. С.81-96. (1984).
- [3]. Мануилов М. Б., Лерер В. А., Синявский Г. П. “Методы расчета и новые применения волноводно-щелевых антенных решеток” // Успехи современной радиоэлектроники. №5. С. 3-28. (2007).
- [4]. Банков С. Е. “Антенные решетки с последовательным питанием” // – М., Физматлит. (2013).
- [5]. Калошин В. А., Ле Д. Т., “Фролова Е. В. Волноводно-щелевая антенна с широким сектором частотного сканирования” // Журнал радиоэлектроники. №3. (2020).
- [6]. Imane Serhsouh, Mohamed Himdi, Hassan Lebbar, Hamsakutty Vettikalladi, “Reconfigurable SIW Antenna for Fixed Frequency Beam Scanning and 5G Applications” // IEEE Access. IEEE. V. 8. pp.60084-60089. (2020).
- [7]. Yuanxi Cao, Sen Yan, “Multi-beam SIW leaky-wave antenna with 2-D beam scanning capability for millimeter-wave radar applications” // Int J RF Microw Comput Aided Eng. V. 1. (2021).
- [8]. Saeed Kamalzadeh, Mohammad Soleimani, “Multibeam SIW Leaky-Wave Antenna with Beam Scanning Capability in Two Dimensions”, Electronics. V. 11. (2022).
- [9]. Калошин В. А., Ле Д. Т., “Волноводно-щелевая антенна с сектором частотного сканирования 180 градусов” // Журнал радиоэлектроники. №4. (2020).
- [10]. Калиничев В. И. “Анализ и синтез волноводно-щелевой антенны с заданным амплитудным распределением” // Журнал радиоэлектроники. №12. (2015).

### ABSTRACT

#### Longitudinal slotted waveguide antenna with a wide frequency sweep angle

*The article analyzes and synthesizes slotted longitudinal-waveguide antennas so that, at the same time, it is possible to overcome the phenomenon of reflected resonance, when the main beam is perpendicular to the waveguide ( $f = 17.3$  GHz), and create a uniform distribution of amplitudes along the antenna at two different frequencies, to expand the sectors of frequency scanning ( $f = 19.6$  GHz). The waveguide antenna has a rectangular shape, contains a dielectric material made of Rogers RO4003 ( $\epsilon = 3.55$ ), on the long side of the rectangular box, there are pairs of longitudinal slots distributed along the waveguide. The calculation results show that it is possible to simultaneously overcome the reflected resonance when the main beam is perpendicular to the waveguide and synthesize a uniform amplitude distribution along the waveguide at two different frequencies. The synthesis increased the gain of the antenna by 0.8 dB at 17.3 GHz and by 2.8 dB at 21.5 GHz. At the same time, the sectors of frequency scanning after synthesis (58 degrees) are also wider than before synthesis (50 degrees).*

**Keywords:** Waveguide antenna; Vertical slot; Amplitude distribution; Extended finite element method.