

Phân tích và tổng hợp ăng ten ống dẫn sóng có khe ngang với sự phân bố biên độ theo hình sin

Lê Doãn Trinh^{1*}, Trần Thị Nhung²

¹Viện thiết kế tàu quân sự, Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng;

²Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Nam Định.

*Email: anhletrinhnd@gmail.com

Nhận bài: 16/6/2022; Hoàn thiện: 11/11/2022; Chấp nhận đăng: 28/11/2022; Xuất bản: 23/12/2022.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2022.90-95>

ABSTRACT

Bài báo phân tích và tổng hợp ăng ten ống dẫn sóng có khe ngang với sự phân bố biên độ theo hình Sin khi búp sóng chính vuông góc với ống dẫn sóng, trong khi vẫn đảm bảo được hệ số phản xạ của ăng ten. Ăng ten ống dẫn sóng có dạng hình hộp chữ nhật, bên trong chứa chất điện môi lý tưởng ($\epsilon=2.25$), trên cạnh dài của hình hộp chữ nhật có các cặp rãnh nằm ngang được phân bố dọc theo ống dẫn sóng. Bằng phương pháp phần tử hữu hạn, bài báo đã tổng hợp chiều dài, khoảng cách giữa hai khe ngang và chiều dài chu kì của từng cặp khe ngang. Kết quả tính toán cho thấy rằng, tại tần số $f=10$ Ghz khi búp sóng chính vuông góc với ống dẫn sóng, có thể tổng hợp được sự phân bố biên độ của ăng ten theo hình Sin với giá trị búp sóng phụ lớn nhất lúc này = -16.6 dB. Góc quét theo tần số của ăng ten sau khi được tổng hợp = 35° , khi tần số thay đổi từ 9 Ghz đến 10.5 Ghz.

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

1. GIỚI THIỆU

Với ưu thế về giá thành, trong khi vẫn đảm bảo được các thông số kỹ thuật, những năm gần đây, việc nghiên cứu ăng ten ống dẫn sóng trở thành một trong các xu thế của các nhà khoa học trên thế giới. Các đặc điểm của ăng ten ống dẫn sóng, cũng như các phương pháp dùng để phân tích chúng đã được nghiên cứu trong nhiều tài liệu khác nhau [1-4].

Hầu hết các nghiên cứu này đều nghiên cứu ăng ten ống dẫn sóng với rãnh dọc, ví dụ như: bài báo [5] đã phân tích và tổng hợp ăng ten ống dẫn sóng có rãnh dọc với sự phân bố biên độ theo hình Sin, bài báo [6] đã nghiên cứu ăng ten ống dẫn sóng có 4 rãnh dọc với dải quét tần số rộng.

Ngoài ra, cũng có rất nhiều nghiên cứu về ăng ten ống dẫn sóng có khe ngang đã được công bố như: bài báo [7] đã nghiên cứu về ăng ten phẳng 2 chiều được làm từ các ống dẫn sóng xếp lại với nhau, bên trong ống dẫn sóng chứa chất điện môi và bên trên ống dẫn sóng có các cặp khe ngang được sắp xếp theo chu kì không đổi, bài báo [8] đã nghiên cứu về ăng ten ống dẫn sóng với số lượng khe ngang khác nhau trong 1 chu kì, bài báo [9] đã nghiên cứu về ăng ten ống dẫn sóng với ba khe ngang hoạt động trong 2 chế độ bức xạ khác nhau.

Tuy nhiên, tất cả các nghiên cứu về ăng ten ống dẫn sóng đều chưa đề cập đến vấn đề tổng hợp sự phân bố biên độ dọc theo ống dẫn sóng khi búp sóng chính vuông góc với ống dẫn sóng. Bởi vì, với ăng ten ống dẫn sóng, khi búp sóng chính vuông góc với ống dẫn sóng, do hiện tượng cộng hưởng phản xạ của sóng vô tuyến, toàn bộ sóng điện từ sẽ bị phản xạ lại hết, dẫn đến không có hiện tượng truyền sóng [1]. Để giải quyết vấn đề này, có thể sử dụng, ăng ten ống dẫn sóng có cặp khe ngang, và điều chỉnh khoảng cách của 2 khe ngang để sóng có thể truyền được trong ống dẫn sóng [2]. Tuy nhiên, khi sử dụng cặp khe ngang, nếu thay đổi chiều dài của chúng để tổng hợp sự phân bố biên độ thì góc chiếu xạ từng chu kì của ăng ten sẽ bị thay đổi dẫn đến không tạo được sóng phẳng phía trên bề mặt của ăng ten. Vì vậy, để giải quyết đồng thời 2 vấn đề trên, bài báo này sẽ phân tích và tổng hợp ăng ten ống dẫn sóng có khe ngang với sự phân bố biên độ theo hình Sin khi búp sóng chính vuông góc với ống dẫn sóng, trong khi vẫn đảm bảo được hệ số phản xạ của ăng ten tại tần số $f=10$ Ghz.

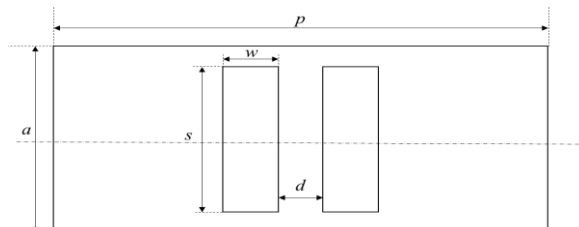
Cấu trúc của bài báo như sau: phần 2 – nghiên cứu hình dáng bên ngoài của ăng ten, phần 3 – tìm hiểu sự phụ thuộc các tham số của ăng ten vào chiều dài của khe ngang, phần 4 – tổng hợp các tham số của ăng ten theo yêu cầu, phần 5 – đánh giá kết quả nhận được, và phần 6 – kết luận.

2. ĐỐI TƯỢNG NGHIÊN CỨU

Đối tượng nghiên cứu của bài báo là ăng ten ống dẫn sóng có khe ngang với một chu kì được thể hiện ở hình 1, trong đó: a – Chiều rộng của ăng ten, b – Chiều dài chu kì của một cặp khe ngang, w – Chiều rộng của khe ngang, s – Chiều dài của khe ngang, d – Khoảng cách giữa hai khe ngang. Bên trong ăng ten chứa chất điện môi lý tưởng với $\epsilon=2.25$. Chiều dày của ăng ten = 5 mm. ăng ten được làm từ kim loại lý tưởng (pec) với độ dày = 0.5mm.

Để tổng hợp sự phân bố biên độ của ăng ten, bài báo cố định giá trị chiều rộng của ăng ten $a = 15$ mm, và chiều rộng của khe ngang $w = 2$ mm.

Việc tổng hợp ăng ten ống dẫn sóng được thực hiện bằng phương pháp phần tử hữu hạn, trên phần mềm Ansys Electronics Suite.



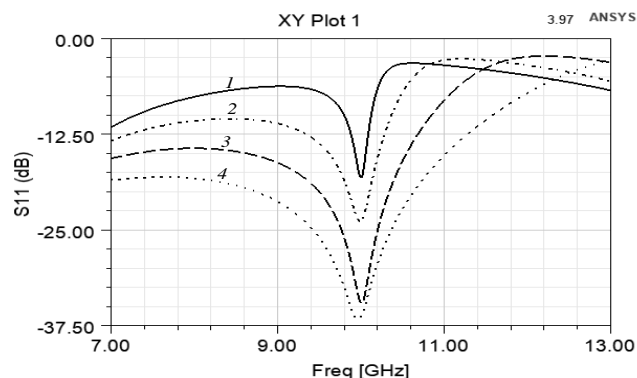
Hình 1. Một chu kì của ăng ten ống dẫn sóng với khe ngang.

3. SỰ PHỤ THUỘC CÁC THAM SỐ CỦA ĂNG TEN VÀO CHIỀU DÀI CỦA KHE NGANG

Để nghiên cứu sự phụ thuộc các tham số của ăng ten vào chiều dài của khe ngang, bài báo chọn 4 giá trị chiều dài khe ngang lần lượt là $s_1 = 8$ mm, $s_2 = 9$ mm, $s_3 = 10$ mm, $s_4 = 11$ mm.

Có hai vấn đề khi tổng hợp sự phân bố biên độ theo hình Sin bằng cách thay đổi chiều dài của khe ngang đó là:

- Chiều dài của khe ngang thay đổi làm cho ăng ten không đảm bảo được hệ số phản xạ của mình khi búp sóng chính vuông góc với ống dẫn sóng.
- Chiều dài của khe ngang thay đổi, dẫn đến tại cùng một tần số, góc chiếu xạ của ăng ten sẽ bị thay đổi [7].

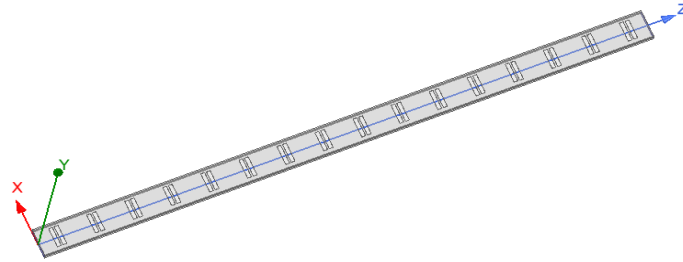


Hình 2. Sự phụ thuộc của hệ số phản xạ vào tần số với từng giá trị của chiều dài khe ngang.

Để giải quyết vấn đề thứ nhất, bài báo đã thay đổi khoảng cách giữa hai khe ngang với $d_1 = 3.97$ mm, $d_2 = 3.36$ mm, $d_3 = 2.39$ mm, $d_4 = 0.97$ mm tương ứng với từng giá trị chiều dài khe ngang $s_1 = 8$ mm, $s_2 = 9$ mm, $s_3 = 10$ mm, $s_4 = 11$ mm, sao cho tại tần số $f = 10$ Ghz, hệ số phản

xạ của một chu kì với $p = 26 \text{ mm}$ là nhỏ nhất. Hình 2 thể hiện sự phụ thuộc của hệ số phản xạ (S_{11}) vào tần số với từng giá trị của chiều dài khe ngang, trong đó: 1 - $s_1 = 8 \text{ mm}$, 2 - $s_2 = 9 \text{ mm}$, 3 - $s_3 = 10 \text{ mm}$, 4 - $s_4 = 11 \text{ mm}$.

Để giải quyết vấn đề thứ hai, bài báo đã thay đổi chiều dài chu kì p tương ứng với từng giá trị chiều dài và khoảng cách giữa hai khe ngang, sao cho tại tần số $f = 10 \text{ Ghz}$, búp sóng chính của ăng ten vuông góc với ống dẫn sóng. Ăng ten được sử dụng để tính toán trong trường hợp này là ăng ten có 16 chu kì giống nhau (tương ứng với chiều dài ăng ten khoảng 400 mm) (hình 3).



Hình 3. Ăng ten ống dẫn sóng với 16 chu kì giống nhau.

Hệ số phát xạ của ăng ten được tính bằng công thức [2]:

$$S_{px} = 1 - (S_{11})^2 - (S_{12})^2 \quad (1)$$

Trong đó: S_{px} – Hệ số phát xạ, S_{11} – Hệ số phản xạ, S_{12} – Hệ số truyền sóng.

Từ kết quả giải quyết 2 vấn đề trên và công thức (1), ta nhận được bảng 1.

Bảng 1. Sự phụ thuộc các tham số ăng ten vào chiều dài của khe ngang.

s	S_{11}	S_{12}	d	p	S_{px}
8	0.00198	0.98511	3.97	25.42	0.02955
9	0.023	0.95296	3.36	24.43	0.09134
10	0.05723	0.87567	2.39	22.7	0.22993
11	0.11931	0.70583	0.97	20.2	0.48757

Bằng phương pháp gần đúng, ta có thể viết lại sự phụ thuộc của của hệ số phát xạ, chiều dài chu kì, khoảng cách giữa 2 khe ngang vào chiều dài của khe ngang lần lượt theo công thức:

$$S_{px}(s) = 2 * 10^5 e^{0.9333s} \quad (2)$$

$$p(s) = -0.005s^3 - 0.235s^2 + 4.09s + 10.3 \quad (3)$$

$$d(s) = -0.015s^3 + 0.225s^2 - 1.18s + 6.69 \quad (4)$$

4. TỔNG HỢP CÁC THAM SỐ CỦA ĂNG TEN

Sự phân bố biên độ dọc theo ống dẫn sóng của ăng ten theo hình Sin được thể hiện bằng công thức:

$$E(y) = \sin(\pi y/L) \quad (5)$$

Trong đó: $E(y)$ – Sự phân bố biên độ theo trục y , L – Chiều dài của ăng ten, y – Tọa độ y được tính từ đầu của ăng ten.

Bằng việc tích phân sự phân bố biên độ dọc theo ống dẫn sóng của ăng ten, ta có công thức thể hiện sự phụ thuộc của hệ số phát xạ vào tọa độ y khi sự phân bố biên độ theo hình Sin là [1]:

$$S_{px}(y) = (10^2 E(y)/2) / (2L(P_0/(P_0 - P_L)/\pi + L(\cos(\pi y/L) - 1)/\pi) \quad (6)$$

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 (phát xạ 90% công suất).

Từ công thức (2), (5) và (6), ta có công thức thể hiện sự phụ thuộc của chiều dài khe ngang vào tọa độ y là:

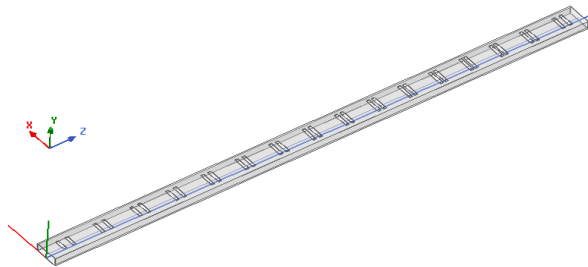
$$s(y) = (\ln(S_{px}(y)) - \ln(2 \cdot 10^5)) / 0.9333 \quad (7)$$

Từ công thức (7), ta nhận được chiều dài của khe ngang, sau đó thay giá trị này vào công thức (3) và (4), ta nhận được khoảng cách giữa hai khe ngang và chiều dài chu kì của từng cặp khe ngang.

Giả sử chiều dài của ăng ten khoảng 400mm, lúc này ta cần có 16 cặp khe ngang để tổng hợp sự phân bố biên độ theo hình Sin (chiều dài và số lượng chu kì có thể thay đổi mà không ảnh hưởng đến kết quả tổng hợp). Kết quả sau khi tổng hợp các tham số của ăng ten được thể hiện ở bảng 2.

5. KẾT QUẢ TỔNG HỢP ĂNG TEN

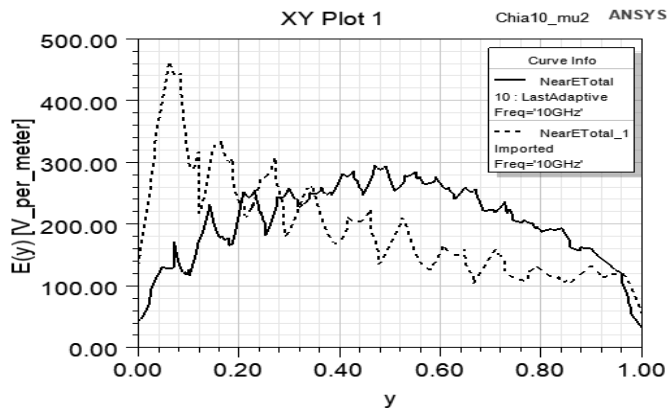
Hình dáng mới của của ăng ten sau khi tổng hợp các tham số được thể hiện ở hình 4.



Hình 4. Hình dáng mới của ăng ten sau khi tổng hợp các tham số.

Để so sánh kết quả nhận được, bài báo sử dụng một ăng ten ống dẫn sóng với cặp khe ngang khác có 16 chu kì giống nhau với các tham số lần lượt là: $a = 15$ mm, $b = 21.6$ mm, $w = 2$ mm, $s = 10.5$ mm, $d = 1.7$ mm, sao cho P_0 và P_L của ăng ten này lần lượt bằng 1 và 0.1. ăng ten này có thể giải quyết vấn đề về hệ số phản xạ khi phụ búp sóng chính vuông góc với ống dẫn sóng, nhưng không đảm bảo được góc chiếu xạ của từng chu kì khi thay đổi chiều dài của cặp khe ngang.

Hình 5 thể hiện sự phân bố biên độ tại tần số $f = 10$ GHz của ăng ten trước và sau khi tổng hợp các tham số (nét liền - sau khi tổng hợp, nét đứt - trước khi tổng hợp). Từ hình 5 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 theo hình Sin.

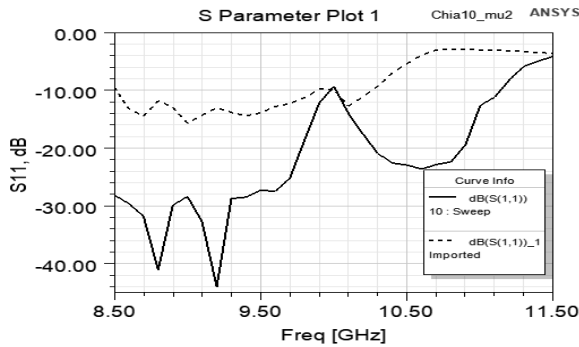


Hình 5. Sự phân bố biên độ dọc theo ống dẫn sóng của ăng ten tại tần số $f = 10$ GHz (nét liền - sau khi tổng hợp, nét đứt - trước khi tổng hợp).

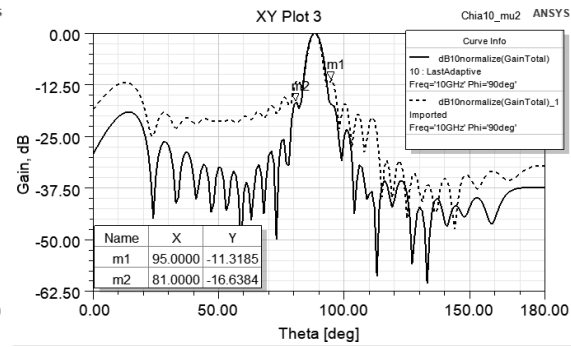
Bảng 2. Các tham số của ăng ten sau khi tổng hợp.

s (mm)	d (mm)	p (mm)
7.25	4.245	25.695
8.432	3.745	25.082
8.989	3.369	24.445
9.364	3.054	23.888
9.653	2.773	23.387
9.892	2.514	22.923
10.101	2.268	22.483
10.289	2.03	22.059
10.461	1.797	21.645
10.62	1.568	21.243
10.764	1.351	20.861
10.885	1.159	20.528
10.961	1.034	20.311
10.941	1.068	20.37
10.688	1.467	21.064
9.692	2.733	23.314

Hình 6 thể hiện sự phụ thuộc của hệ số phản xạ của ăng ten vào tần số (nét liền - sau khi tổng hợp, nét đứt – trước khi tổng hợp). Từ hình 6 thấy rằng: tại tần số $f = 10$ GHz, khi búp sóng chính vuông góc với ống dẫn sóng, hệ số phản xạ của ăng ten trước và sau khi tổng hợp sự phân bố biên độ tương đương nhau. Tuy nhiên, tại các tần số khác ăng ten sau khi tổng hợp có hệ số phản xạ tốt hơn ăng ten trước khi tổng hợp.

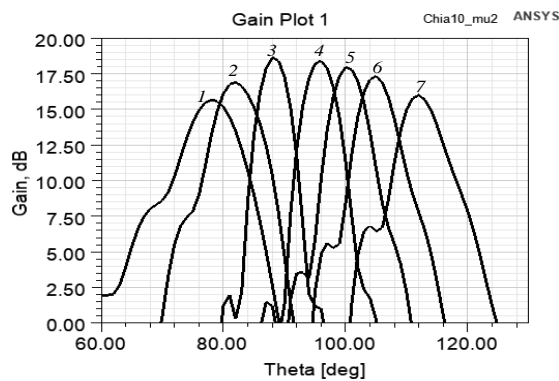


Hình 6. Sự phụ thuộc của hệ số phản xạ vào tần số (nét liền - sau khi tổng hợp, nét đứt – trước khi tổng hợp).



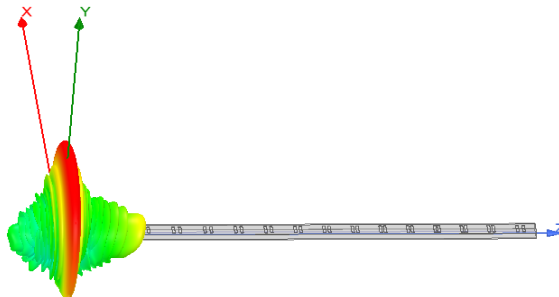
Hình 7. Giá trị chuẩn hóa đồ thị bức xạ của ăng ten tại tần số $f = 10$ GHz (nét liền - sau khi tổng hợp, nét đứt – trước khi tổng hợp).

Hình 7 thể hiện giá trị chuẩn hóa đồ thị bức xạ của ăng ten tại tần số $f = 10$ GHz (nét liền - sau khi tổng hợp, nét đứt – trước khi tổng hợp). Từ hình 7 thấy rằng: giá trị lớn nhất búp sóng phụ của ăng ten sau khi tổng hợp (-16.6 dB) nhỏ hơn giá trị lớn nhất búp sóng phụ của ăng ten trước tổng hợp (-11.3 dB).



Hình 8. Búp sóng chính của ăng ten tại các tần số khác nhau.

Hình 8 thể hiện búp sóng chính của ăng ten tại các tần số khác nhau (1 – 10.5 GHz, 2 – 10.3 GHz, 3 – 10 GHz, 4 – 9.7 GHz, 5 – 9.5 GHz, 6 – 9.3 GHz, 7 – 9 GHz), hình 9 thể hiện đồ thị bức xạ của ăng ten dạng 3D tại tần số $f = 10$ GHz.



Hình 9. Đồ thị bức xạ của ăng ten dạng 3D tại tần số $f = 10$ GHz.

6. KẾT LUẬN

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

- Bằng việc thay đổi các tham số của ăng ten ống dẫn sóng có khe ngang như: chiều dài khe ngang, khoảng cách giữa hai khe ngang, và chiều dài chu kì của một cặp khe ngang, có thể tổng hợp được sự phân bố biên độ theo hình Sin dọc theo ống dẫn sóng.

- Tại tần số $f = 10$ Ghz, giá trị lớn nhất búp sóng phụ của ăng ten ống dẫn sóng sau khi tổng hợp nhỏ hơn (-16.6 dB) nhỏ hơn giá trị lớn nhất búp sóng phụ của ăng ten trước tổng hợp (-11.3 dB).

- Góc quét theo tần số của ăng ten sau khi được tổng hợp $= 35^{\circ}$, khi tần số thay đổi từ 9 Ghz đến 10.5 Ghz.

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-целевых антенных решеток” // Успехи современной радиоэлектроники. №5. С. 3-28. (2007).
- [4]. Банков С. Е. “Антенные решетки с последовательным питанием” // – М., Физматлит. (2013).
- [5]. Калиничев В. И. “Анализ и синтез волноводно-целевой антенны с заданным амплитудным распределением” // Журнал радиоэлектроники. №12. (2015).
- [6]. Калошин В. А., Ле Д. Т., “Фролова Е. В. Волноводно-целевая антенна с широким сектором частотного сканирования” // Журнал радиоэлектроники. №3. (2020).
- [7]. Калиничев В. И., Бабаскин А. А. “Частотно-фазовое сканирование волноводно-целевых антенных решеток, заполненных диэлектриком” // Журнал радиоэлектроники. №9. (2017).
- [8]. David R. S., Okan Yurduseven, Laura P. M. and others. “Analysis of a waveguide-fed metasurface antenna” // Phys. Rev. Appl. V8(5). 054048. (2017).
- [9]. Калошин В. А., Ле Д. Т., “Волноводно-целевая антенна с сектором частотного сканирования 180 градусов” // Журнал радиоэлектроники. №4. (2020).

ABSTRACT

Transverse slotted waveguide antenna with sinusoidal amplitude distribution

In this paper, a transverse slotted waveguide antenna with sinusoidal amplitude distribution is investigated when the main lobe is located perpendicular to the waveguide, while ensuring the reflectivity of the antenna. The waveguide antenna is made in the form of a rectangular box with an ideal dielectric inside ($\epsilon = 2.25$). On the long side of the rectangular box, there are pairs of transverse slots distributed along the waveguide. In the article, the lengths of slots, the distance between two transverse slots and the length of the period of each pair of transverse slots are synthesized by the finite element method. The calculation results show that at a frequency of $f = 10$ Ghz, when the main lobe is located perpendicular to the waveguide, it is possible to synthesize the amplitude distribution of the antenna in a sinusoidal form with the largest sidelobe value $= -16.6$ dB. The frequency sweep angle of the antenna after summing $= 35^{\circ}$, when the frequency changes from 9 Ghz to 10.5 Ghz.

Keywords: Electronic radio; High frequency equipment; Waveguide antenna with transverse-slot.