

В. Б. БЕЛЯВЦЕВ, канд. физ.-мат. наук

**НАПРАВЛЕННОСТЬ ВОЛНОВОДНЫХ ОТВЕТВИТЕЛЕЙ СО СВЯЗЬЮ
ЧЕРЕЗ ЗАКРЫТОЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛЕНКОЙ СТУПЕНЧАТОЕ
ОКНО С СИНУСОИДАЛЬНЫМИ СТУПЕНЬКАМИ**

Характеристика направленности волноводных ответвителей, в которых связь между волноводами осуществляется через окно в общей стенке, закрытое металлической пленкой толщиной порядка скин-слоя, минимизируется в области рабочих частот путем выполнения передней и задней кромок окна связи ступенчатыми [1]. Размеры и смещения прямоугольных ступенек определяются в соответствии с выбранными амплитудно-фазовыми распределениями. При одинаковой длине прямоугольных ступенек в соответствии с принципом наложения решеток направленность (в децибелах) равна сумме направленностей прямоугольной ступеньки и кромки.

Известно, что прямоугольное окно обладает не лучшими направленными свойствами и по значению минимальной направленности уступает окну, поперечный размер которого изменяется по синусоидальному закону [2]. В статье приведены результаты расчета и рассмотрены варианты формирования характеристики направленности ответвителей с распределенной непрерывно слабой связью через ступенчатое окно, каждая ступенька которого выполнена по форме полупериода синусоиды.

Введем следующие обозначения: i — номер ступеньки; m — число ступенек; h_i — ширина i -й ступеньки; h — ширина окна связи; l_{0i} — длина i -й ступеньки; l_i — смещение i -й ступеньки относительно первой; l — длина окна связи; y — поперечная ко-

ордината; z — продольная координата (рис. 1). Каждая ступенька выполнена по форме полупериода синусоиды и площадь ее ограничена прямой линией

$$y_i = \sum_{j=1}^{i-1} h_j$$

и кривой

$$y_i(z) = y_i + h_i \sin \frac{\pi}{l_{oi}} (z - l_i),$$

$$l_i \leq z \leq l_i + l_{oi}.$$

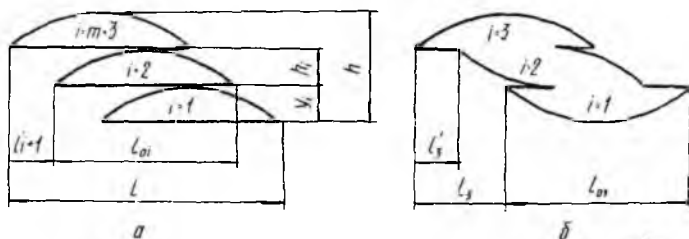


Рис. 1

Направленность вычисляется по формуле [2]

$$N = 20 \lg \left| \frac{F(\theta = 0)}{F(\theta \neq 0)} \right|, \quad (1)$$

где для ступенчатого окна

$$F(\theta \neq 0) = \sum_{i=1}^{i=m} F_i(\theta \neq 0); \quad (2)$$

$$F_i(\theta \neq 0) = h_i \int_{l_i}^{l_i + l_{oi}} \sin \frac{\pi}{l_{oi}} (z - l_i) \exp\left(i \frac{2\theta}{l} z\right) dz; \quad (3)$$

$\theta = 2\pi l / \lambda_B$ — электрическая длина окна связи; λ_B — длина волны в волноводе.

Результаты интегрирования имеют вид

$$F_i(\theta = 0) = \frac{2}{\pi} h_i l_{oi}; \quad (4)$$

$$F_i(\theta \neq 0) = \frac{\pi}{2} \frac{h_i l_{oi}}{1 - (\pi/2\theta_{oi})^2} \frac{\cos \theta_{oi}}{\theta_{oi}} \times \\ \times [\cos(2\theta_i + \theta_{oi} - \theta) + i \sin(2\theta_i + \theta_{oi} - \theta)]; \quad (5)$$

$$\theta_i = \frac{2\pi l_i}{\lambda_B}; \quad \theta_{oi} = \frac{2\pi l_{oi}}{\lambda_B}.$$

После подстановки (2)–(5) в (1) имеем

$$N = 20 \lg \left| \frac{\left(\frac{2}{\pi}\right)^2 \sum_{i=1}^{i=m} h_i l_{oi}}{\sum_{i=1}^{i=m} \left(1 - (\pi/2\theta_{oi})^2\right)^2 \frac{h_i l_{oi} \cos \theta_{oi}}{\theta_{oi}} + 2 \sum_{i=1}^{i=m-1} \sum_{j=i+1}^{j=m} \frac{h_i l_{oi} \cos \theta_{oi} \cos \theta_{oj}}{1 - (\pi/2\theta_{oi})^2 \theta_{oi}} \times \right. \\ \left. \times \frac{h_j l_{oj} \cos \theta_{oj}}{1 - (\pi/2\theta_{oj})^2 \theta_{oj}} \cos(2(\theta_i - \theta_j) + (\theta_{oi} - \theta_{oj})) \right|^{1/2} \quad (6)$$

Формула (6) справедлива при любых сочетаниях амплитудно-фазовых распределений, а при $m=1$ из нее следует известное соотношение [2]

$$N = 20 \lg \left| \frac{1 - (2\theta_0/\pi)^2}{\cos \theta_0} \right| \quad (7)$$

С учетом формул для расчета направленности решеток из сосредоточенных элементов [3] конечные выражения упрощаются. В частности, для равномерного амплитудного и равномерного фазового распределений формула (6) принимает вид

$$N = 20 \lg \left| \frac{m \sin \theta' [1 - (2\theta_0/\pi)^2]}{\sin(m\theta') \cos \theta_0} \right| \quad (8)$$

Рассмотрим для примера формирование зависимости направленности от частоты путем сочетания биномиального амплитудного и равномерного фазового распределений. При выводе формулы (6) следует

$$N = 20 \lg \left| \frac{1 - (2\theta_0/\pi)^2}{\cos \theta_0 (\cos \theta')^{m-1}} \right| \quad (9)$$

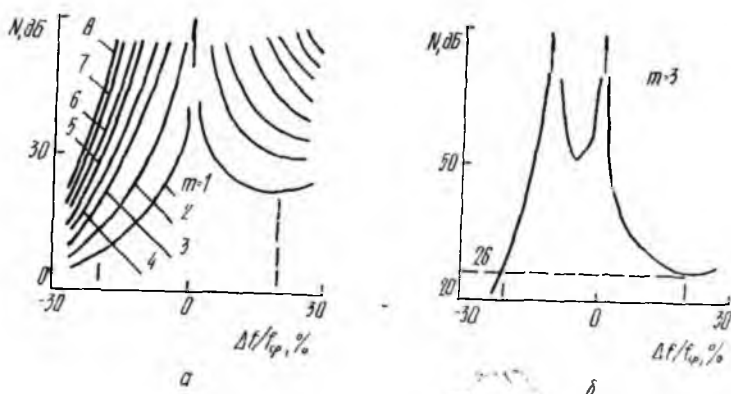


Рис. 2

Условие $N \rightarrow \infty$ выполняется в точках $l_0/\lambda_0 = 0,75 + (k/2)$, $l'/\lambda_0 = (1+2k)/4$ ($k=0, 1, 2, 3, \dots$). На рис. 2, а графики постро-

ны для $l_0/\lambda_{в\ ср}=0,75$, $l'/\lambda_{в\ ср}=0,25$, т. е. оба максимума совмещены ($\lambda_{в\ ср}$ — длина волны в волноводе на средней частоте полосы $\pm 20\%$). Характер кривых повторяет характер кривых для решеток из сосредоточенных элементов связи. Минимальные значения направленности достигаются на нижней частоте и для $m=1, \dots, 8$ равны N_{\min} ($m=1, \dots, 8$) $\approx 8, 13, 18, 23, 28, 33, 38, 43$ дБ. Если незначительно изменить длину ступеньки или смещение ступеньки относительно предыдущей, в области рабочих частот появится два максимума направленности. Равенство значений направленности на крайних частотах при биномиальном амплитудном и равномерном фазовом распределении обеспечивается выбором геометрических размеров, удовлетворяющих уравнению

$$\left| \frac{1 - (2\alpha_1)^2 \cos(\pi\alpha_2)}{1 - (2\alpha_2)^2 \cos(\pi\alpha_1)} \right| = \left| \frac{\cos(\pi\beta_1)}{\cos(\pi\beta_2)} \right|^{m-1}, \quad (10)$$

где q — коэффициент перекрытия; $q = \lambda_{\max}/\lambda_{\min}$;

$$\alpha_i = \psi_i(q) \frac{l_0}{\lambda_{в\ ср}}; \quad \beta_i = \psi_i(q) \frac{l'}{\lambda_{в\ ср}}; \quad \psi_1(q) = \frac{4}{1+q}; \quad \psi_2(q) = q\psi_1(q).$$

На рис. 2, б приведен график для трехступенчатого окна. Первый максимум образован выбором $l'/\lambda_{в\ ср} \approx 0,31$, второй — выбором $l_0/\lambda_{в\ ср} = 0,75$. Направленность увеличилась на 8 дБ. При $l_0/\lambda_{в\ max} = 0,75$, $l'/\lambda_{в\ ср} = 0,25$ $N \rightarrow \infty$ в точках $\Delta f/f_{ср} = -20; 0; 2,5\%$. Значения N_{\min} находятся между первыми двумя максимумами: N_{\min} ($m=1, \dots, 8$) $\approx 23, 32, 39, 46, 53, 59, 65, 71$ дБ. Это на 14... 15 дБ больше по сравнению с данными на рис. 2, а. Они могут быть увеличены выбором l' , обеспечивающим равенство N_{\min} в двух минимумах зависимости направленности от частоты. Аналогично минимизируется характеристика направленности при другом неравномерном амплитудном распределении, а также при равномерном амплитудном и неравномерном фазовом распределении.

Формула для расчета переходного ослабления ответвителя на прямоугольных волноводах со связью по общей узкой стенке через окно синусоидальной формы, закрытое металлической пленкой толщиной порядка скин-слоя, получена с использованием исходных данных работы [4] в виде

$$C = 20 \lg \frac{\mu_0 b a^3 \exp(d/\delta)}{\sqrt{2} \mu l \lambda_{в} \delta}. \quad (11)$$

Здесь μ_0, μ — абсолютные магнитные проницаемости свободного пространства и пленки; $b \times a$ — размеры поперечного сечения волновода ($a > b$); d — толщина пленки; δ — глубина скин-слоя для материала пленки.

Из (11) следует, что при одинаковой длине ступенек необходимо амплитудное распределение реализуется выбором размеров h_i . Например, при чебышевском амплитудном и равномерном

фазовом распределении для $q=2,2$, $m=5$ $h_i/b=0,231$; $0,637$; $1,000$; $0,637$; $0,231$ [3], $l_i/\lambda_b=(i-1)/4$. Значение l_i определяют в соответствии с вариантом формирования зависимости направленности от частоты. Переходное ослабление обеспечивается выбором материала и толщины пленки, а также длины ступеньки l_0 . Переходное ослабление можно рассчитать по формуле (11) для синусоидального окна с размерами $h \times l_0$, где $\sum_{i=1}^{i=m} h_i$.

Конструктивно окно связи удобно выполнить так, чтобы основания крайних ступенек были обращены во внутрь окна, а левые или правые половины других ступенек повернуты на 180° вокруг продольной оси ступеньки (рис. 1, б). Для связи по общей узкой стенке подобные повороты не приведут к изменению направленности.

В области связи ответвителей с непрерывно распределенной слабой связью, к числу которых относятся и рассматриваемые ответвители, возбуждается так называемая щелевая волна [5]. Наличие щелевой волны приводит к уменьшению направленности, особенно с уменьшением толщины металлической пленки, поэтому расчетное значение $N_{\text{мин}}$ должно быть примерно на 10 дБ больше заданного уровня [1].

Список литературы: 1. *Белявцев В. Б., Середний В. П., Сосунов В. А.* Неэквидистантные волноводные ответвители с непрерывно распределенной слабой связью//Радиотехника и электроника. — 1982. — 27, № 10. — С. 1911—1915. 2. *Миллер С. Е.* Теория связанных волн и ее применение к волноводам//Волноводные линии передачи с малыми потерями/Под ред. В. Б. Штейншлейгера. — М., 1960. — С. 139—199. 3. *Сосунов В. А., Шибяев А. А.* Направленные ответвители сверхвысоких частот. — Саратов: Приволж. кн. изд.-во, 1964. — 134 с. 4. *Белявцев В. Б.* Расчет переходного ослабления ответвителей со связью через пленку толщиной порядка скин-слоя в общей стенке волноводов//Изв. вузов. Радиоэлектроника. — 1976. — 19, № 2. — С. 100—102. 5. *Модель А. М.* Распространение электромагнитных волн в двух связанных волноводах различных сечений//Радиотехника. — 1966. — 21, № 3. — С. 31—37.

Поступила в редколлегию 03.02.86