

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ СО СРЕЗАННЫМИ КРОМКАМИ РАСКРЫВА

*Н. Н. Горобец, Ю. В. Лытов*

Харьков

Задача оптимального распределения электромагнитной энергии в свободном пространстве в настоящее время весьма актуальна, но при решении ее с помощью излучателей, не превышающих длину волны, встречаются большие трудности. Однако такие излучатели в антенной технике имеют чрезвычайно важное значение. Они используются как в качестве самостоятельных слабонаправленных антенн, так и в качестве облучателей зеркальных и линзовых антенн и элементов решеток. В подобных случаях весьма желательна специальная, в частности столообразная форма диаграммы направленности излучателя.

Действительно, при столообразном амплитудном распределении в раскрыве зеркальных и линзовых антенн существенно повышается их коэффициент направленного действия при приемлемом уровне

боковых лепестков. В случае сканирующих антенных решеток коэффициент направленного действия при отклонении главного максимума уменьшается, причем величина этого уменьшения определяется в основном диаграммой направленности единичного излучателя в решетке. Если диаграмма направленности излучателя-элемента решетки имеет в заданном секторе углов столбобразную форму, коэффициент направленного действия антенны при сканировании изменяется незначительно.

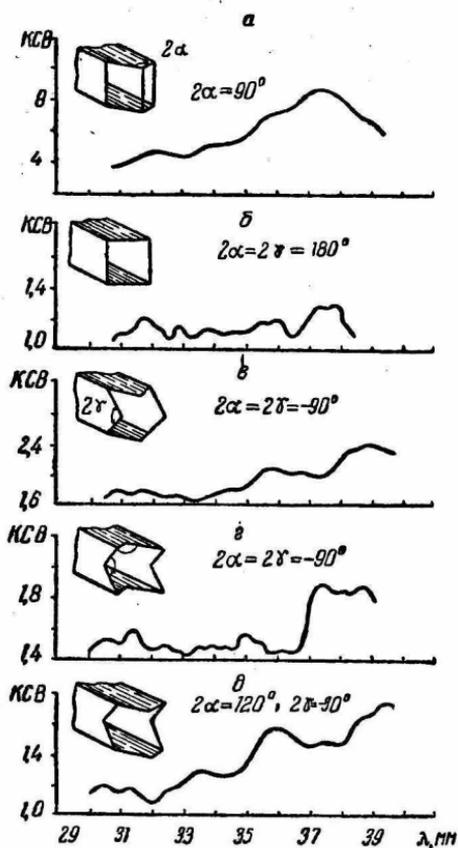


Рис. 1.

Кроме того, на практике часто необходимо увеличить ширину диаграммы направленности, в частности волноводных излучателей.

В статье приведены результаты разработки волноводного излучателя со столбобразной формой диаграммы направленности, который можно использовать также при круговой поляризации излучения. В случае эллиптической или круговой поляризации необходимо обеспечить одинаковую форму диаграммы направленности излучателя в двух ортогональных плоскостях. При этом, как известно [1], поляризация излучения антенны в пределах переднего полупространства не будет изменяться, что также необходимо на практике.

Для решения поставленной задачи можно использовать уже известный волноводный излучатель со срезанными кромками раскрыва и рассеивателем электромагнитных волн в его середине [2]. Такой излучатель позволяет увеличить ширину диаграммы направленности и в некоторых пределах регулировать ее форму. Однако рассеиватель-перемычка в раскрыве волновода, помещенная параллельно вектору электрического поля, неизбежно приводит к увеличению отражений и, следовательно, КСВ излучателя. Непосредственные измерения КСВ подобного излучателя подтверждают данные предположения. На рис. 1, а представлена зависимость КСВ от длины волны излучателя в виде открытого

боковых лепестков. В случае сканирующих антенных решеток коэффициент направленного действия при отклонении главного максимума уменьшается, причем величина этого уменьшения определяется в основном диаграммой направленности единичного излучателя в решетке. Если диаграмма направленности излучателя-элемента решетки имеет в заданном секторе углов столбобразную форму, коэффициент направленного действия антенны при сканировании изменяется незначительно.

конца квадратного волновода сечением  $23 \times 23$  мм со срезанными под углом  $90^\circ$  в плоскости электрического вектора поля кромками раскрыва и проволочной перемычкой диаметром 0,6 мм в середине волновода. Видно, что КСВ в диапазоне волн изменяется от 4,0 до 8,8. Оказалось также, что величина КСВ мало зависит от угла среза, так как отражения от перемычки больше отражений от раскрыва волновода. Поскольку отражения заметно ухудшают поляризационные характеристики волноводных антенн [3], излучатель с рассеивателем в данном случае неприменим.

Из качественных соображений легко заметить, что использование рассеивателей в раскрыве волноводных излучателей со срезанными кромками под углом не является обязательным для увеличения ширины и изменения формы диаграммы направленности. Действительно, в пределах каждой части раскрыва устанавливается линейное фазовое распределение, что приводит к отклонению максимума излучения этой части от оси волновода. Срезанные части раскрыва имеют главные максимумы, направленные по разные стороны от оси волновода. Однако ширина диаграммы направленности этих частей велика, поэтому результирующая диаграмма не имеет провала в направлении оси волновода, но форма ее может существенно изменяться. В частности, при надлежащем выборе углов среза раскрыва можно обеспечить столообразную форму диаграммы направленности.

Чтобы диаграмма направленности была одинаковой в двух ортогональных плоскостях, необходимо срезать кромки излучающего раскрыва также в двух плоскостях. Таким образом, для решения поставленной задачи необходимо подобрать углы среза кромок раскрыва квадратного волновода.

Строгий электродинамический расчет излучения из открытого конца квадратного волновода со срезанными в двух плоскостях кромками раскрыва весьма сложен. Из условий возбуждения раскрыва можно допустить, что амплитудное распределение поля в каждой его части совпадает с проекцией распределения поля в раскрыве открытого конца волновода на плоскость среза кромки раскрыва, а фазовое распределение — линейное, причем величина отклонения фазы также определяется этой проекцией. Будем искать поле излучения открытого конца волновода со срезанными в двух ортогональных плоскостях кромками раскрыва как полусумму полей двух независимых излучателей со срезанными кромками в плоскости электрического и магнитного векторов поля при одинаковых условиях их запитывания. Отметим, что принятые допущения предполагают, что волна в срезанной части волновода у излучающего конца распространяется так же, как и в регулярном волноводе. Недостатки данного допущения очевидны, однако только в этом случае можно достаточно просто получить формулы для расчета диаграмм.

При указанных предположениях поле излучения открытого конца квадратного волновода со срезанными в двух плоскостях

под разными углами кромками раскрыва, возбуждаемого основной волной типа  $H_{10}$ , получим в виде

$$\vec{E}(\theta\varphi) = \left\{ \vec{\theta}^{\circ} \left( \frac{K \frac{\lambda_g}{\lambda} + \cos\theta}{K \frac{\lambda_g}{\lambda} + 1} \right) \cos\varphi - \right. \\ \left. - \vec{\varphi}^{\circ} \left( \frac{1 + K \frac{\lambda_g}{\lambda} \cos\theta}{1 + K \frac{\lambda_g}{\lambda}} \right) \sin\varphi \right\} \frac{ia^2 \psi(R)}{2\pi\lambda} E_{so} \times \\ \times \left\{ \frac{1}{\sin\alpha} \frac{\sin\eta_1}{\eta_1} \left[ \frac{\frac{2i}{\pi} (\beta_2 - \eta_2) - e^{i(\beta_2 - \eta_2)}}{1 - \frac{4}{\pi^2} (\beta_2 - \eta_2)^2} + \frac{\frac{2i}{\pi} (\beta_2 + \eta_2) - e^{i(\beta_2 + \eta_2)}}{1 - \frac{4}{\pi^2} (\beta_2 + \eta_2)^2} \right] - \right. \\ \left. - i \frac{1}{\sin\gamma} \frac{\cos\eta_2}{1 - \left(\frac{2\eta_2}{\pi}\right)^2} \left[ \frac{1 - e^{i(\beta_1 - \eta_1)}}{\beta_1 - \eta_1} + \frac{1 - e^{i(\beta_1 + \eta_1)}}{\beta_1 + \eta_1} \right] \right\}.$$

Здесь  $\vec{\theta}^{\circ}$ ,  $\vec{\varphi}^{\circ}$  — орты сферической системы координат в точке наблюдения;

$\lambda$  — длина волны в свободном пространстве;

$K$  — КСВ излучателя;

$a$  — поперечный размер волновода;

$\psi(R) = \frac{e^{-i \frac{2\pi}{\lambda} R}}{R}$  — функция сферической волны;

$R$  — расстояние от начала координат до точки наблюдения;

$E_{so}$  — амплитуда поля в середине раскрыва излучателя;

$\eta_1 = \pi \frac{a}{\lambda} \sin\theta \cos\varphi$ ;                       $\beta_1 = \pi \frac{a}{\lambda_g} \operatorname{ctg}\gamma$ ;

$\eta_2 = \pi \frac{a}{\lambda} \sin\theta \sin\varphi$ ;                       $\beta_2 = \pi \frac{a}{\lambda_g} \operatorname{ctg}\alpha$ ;

$\alpha$ ,  $\gamma$  — половина углов среза кромок раскрыва в плоскостях магнитного и электрического поля соответственно;

$\lambda_g$  — длина волны в волноводе.

Амплитудные и фазовые диаграммы направленности антенны легко найти из общего выражения для поля (при  $\varphi = 0^\circ$  получим диаграммы в плоскости электрического поля, при  $\varphi = 90^\circ$  — в плоскости магнитного поля).

Поскольку комплексный множитель излучателя является комплексной функцией, предложенная волноводная антенна не имеет фазового центра, что, по-видимому, может затруднить ее

использование в качестве облучателей зеркальных и линзовых антенн. Легко убедиться подстановкой  $2\alpha = 2\gamma = 180^\circ$ , что полученная формула переходит в известную формулу для поля излучения из открытого конца волновода [4].

При выводе выражений для диаграммы направленности не учтено не только нарушение условий распространения электромагнитных волн у излучающего конца волновода, но также волны высших типов, токи на кромках и внешних стенках волновода. В связи с этим результаты расчетов могут не достаточно точно описывать характеристики излучателей, и поэтому необходимы детальные экспериментальные исследования.

Экспериментально измерены диаграммы направленности и КСВ семнадцати излучателей в виде открытого конца квадратного волновода сечением  $23 \times 23$  мм с V-образными срезами кромок раскрыва под углом  $2\gamma$  в плоскости электрического и  $2\alpha$  магнитного поля, которые были равны:  $2\alpha = 2\gamma = \pm 60^\circ; \pm 90^\circ; \pm 120^\circ; \pm 150^\circ; \pm 180^\circ; 2\alpha = 90^\circ, 2\gamma = \pm 120^\circ; 2\alpha = \pm 90^\circ, 2\gamma = \mp 90^\circ; 2\alpha = 120^\circ, 2\gamma = \pm 90^\circ; 2\alpha = -120^\circ, 2\gamma = 90^\circ; 2\alpha = -90^\circ, 2\gamma = 120^\circ$ .

Проанализировано около 800 диаграмм направленности этих излучателей в двух плоскостях, записанных на диаграммной ленте самописца в диапазоне от 2,9 до 4,0 см.

Из результатов измерения зависимости КСВ испытанных излучателей от длины волны (типичные результаты приведены на рис. 1, в, г, д) видно, что такие излучатели имеют много меньший КСВ, чем излучатели с рассеивателями в раскрыве (рис. 1, а), но несколько выше, чем открытый конец волновода (рис. 1, б). Отметим, что величина КСВ меньше у излучателя со срезанными внутрь волновода кромками раскрыва (при отрицательных значениях углов  $\alpha$  и  $\gamma$ ) и у излучателей с разными знаками углов среза в ортогональных плоскостях. Увеличение КСВ в длинноволновой области диапазона обусловлено ухудшением согласования излучателя со свободным пространством.

Измерения диаграмм направленности излучателей со срезанными кромками раскрыва подтвердили возможность увеличения ширины и регулировки формы диаграммы. На рис. 2 приведены диаграммы направленности в двух плоскостях на волне 3,9 см открытого конца квадратного волновода и двух излучателей со срезанными кромками под углами:  $2\alpha = 120^\circ, 2\gamma = 90^\circ$  и  $2\alpha = -90^\circ, 2\gamma = 120^\circ$ . Видно, что в последнем случае диаграмма направленности имеет четко выраженную столбобразную форму, причем ширина ее практически одинакова в обеих плоскостях.

Характер изменения диаграмм направленности излучателей в диапазоне волн виден из рис. 3, на котором приведены зависимости от длины волны ширины диаграммы направленности по уровню 0,7; 0,5; 0,3  $E_{\max}$  открытого конца квадратного волновода и двух излучателей со срезанными кромками раскрыва. Здесь кривые с точками соответствуют плоскости магнитного вектора поля в волноводе, с крестиками — электрического.

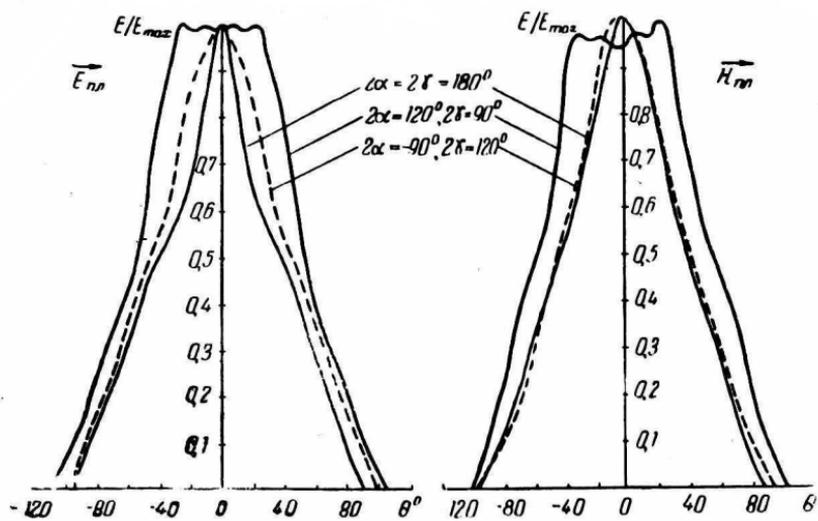


Рис. 2.

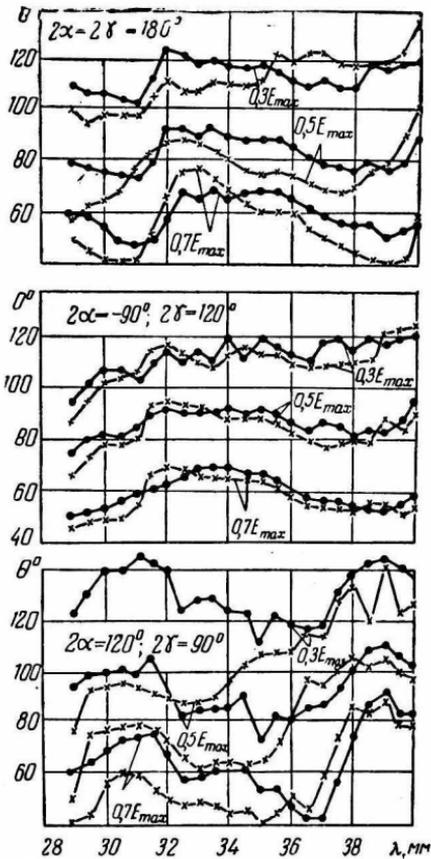


Рис. 3.

Детальный анализ всех диаграмм направленности квадратного волновода со срезанными кромками раскрыва показывает, что с помощью подобных излучателей можно:

1) увеличить ширину диаграммы направленности при углах среза  $2\alpha = 2\gamma = 90^\circ$ ;  $2\alpha = 2\gamma = 150^\circ$  и  $2\alpha = 120^\circ$ ,  $2\gamma = 90^\circ$ ;

2) обеспечить равенство ширины диаграммы направленности в обеих ортогональных плоскостях в широком диапазоне волн при углах среза  $2\alpha = 120^\circ$ ,  $2\gamma = -90^\circ$  и  $2\alpha = -90^\circ$ ,  $2\gamma = 120^\circ$ , причем в последнем случае ширина диаграммы направленности мало изменяется в диапазоне частот;

3) получить диаграмму направленности столообразной формы в широком диапазоне частот при углах среза  $2\alpha = 120^\circ$ ,  $2\gamma = -90^\circ$  большей ширины, чем открытого конца волновода, а также в узком диапазоне при углах среза  $2\alpha = 2\gamma = \pm 60^\circ$ ;  $\pm 90^\circ$ ;  $\pm 150^\circ$ ;  $2\alpha = 120^\circ$ ,  $2\gamma = 90^\circ$ ; причем ширина диаграммы может быть как больше, так и меньше ширины диаграммы открытого конца волновода.

Измерения поляризационных диаграмм описанных волноводных антенн в диапазоне волн показали, что они обеспечивают излучение с весьма малым изменением поляризации в пределах главного лепестка диаграммы направленности.

Таким образом, приведенные исследования показывают, что путем изменения формы излучающего раскрыва открытого конца квадратного волновода можно регулировать ширину и форму его диаграммы направленности в широких пределах при приемлемом значении КСВ и хороших поляризационных характеристиках.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. В. Шубарин, Н. Н. Горобец. Зависимость поляризационной диаграммы от амплитудно-фазового распределения поля в раскрыве антенн сверхвысоких частот. «Изв. вузов, Радиотехника» т. 8, № 5, 1965, с. 561—573.

2. Антенны сантиметровых волн (пер. с англ., под ред. Я. Н. Фельда). Изд-во «Советское радио», 1950, с. 51—53.

3. Ю. В. Шубарин, Н. Н. Горобец, В. А. Волошин. Влияние отражений в эллиптически поляризованных антеннах на поляризацию их поля излучения. Труды XXII Всесоюзной научной сессии НТОРЭС им. А. С. Попова, Секция антенных устройств. М., 1966, с. 26—33.

4. Ю. В. Шубарин. Антенны сверхвысоких частот. Изд-во ХГУ, Харьков, 1960, с. 165—170.