

А. А. КАРПЕНКО, д. ф.-м. н. Я. И. ЛЕПИХ

Украина, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова  
E-mail: ndl\_lepikh@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
09.10 2006 г.

Оппонент к. т. н. Э. Н. ГЛУШЕЧЕНКО  
(НПП "Сатурн", г. Киев)

## КОМПЕНСАЦИЯ ФАЗОВОЙ ОШИБКИ В ИЗЛУЧАТЕЛЯХ СВЧ-ВОЛН С ПОМОЩЬЮ ИМПЕДАНСНОЙ СТРУКТУРЫ

*Предложен метод компенсации фазовой ошибки в H-секториальном рупорном излучателе с помощью импедансной структуры в виде металлической гребенки с меняющейся высотой канавок.*

Как известно, рупорные излучатели (РИ) обладают высокими характеристиками излучения в области сверхвысоких частот (СВЧ), что делает их незаменимыми элементами современных информационных систем связи. Однако возрастающие требования минимизации функциональных узлов радиоаппаратуры накладывают ограничения и на размеры РИ.

Прямое уменьшение размеров без изменения конструктивных решений РИ приводит к ухудшению характеристик их излучения. Одной из важнейших характеристик РИ является его диаграмма направленности (ДН). При уменьшении длины РИ с неизменной частотой излучаемого сигнала увеличивается ширина его ДН, а также растет уровень боковых лепестков и их количество. Причиной ухудшения ДН в данном случае является фазовая ошибка, увеличивающаяся при укорочении РИ.

В статье предлагается метод компенсации фазовой ошибки в рупорном излучателе с помощью импедансной замедляющей структуры, что позволяет получать короткие РИ без ухудшения их диаграммы направленности.

Рассмотрим горизонтальное сечение РИ (H-плоскость) (рис. 1). Вследствие расширения волновода плоская волна в волноводе трансформируется в цилиндрическую с фазовым центром в точке О. Из рис. 1 видно, что расстояние от горловины РИ до его раскрытия вдоль оси z (отрезок CD) меньше расстояния от горловины до раскрытия вдоль образующей РИ (отрезок AB) на величину  $MB = \Delta r$ . Поэтому время прихода волнового фронта в точки D и B будет разным. Волновой фронт волны дойдет до края раскрытия в точке B с запаздыванием по отношению к центральной точке D на время, равное  $\Delta t = \Delta r/c$ , где c — скорость распространения электромагнитных волн.

Максимальное отставание фазы от ее значения на оси РИ (фазовая ошибка —  $\Delta\phi$ ) будет наблюдаться на краях раскрытия со значением [1, с. 66]

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r,$$
 где  $\lambda$  — длина волны, соответствующая центральной частоте рабочего диапазона РИ.

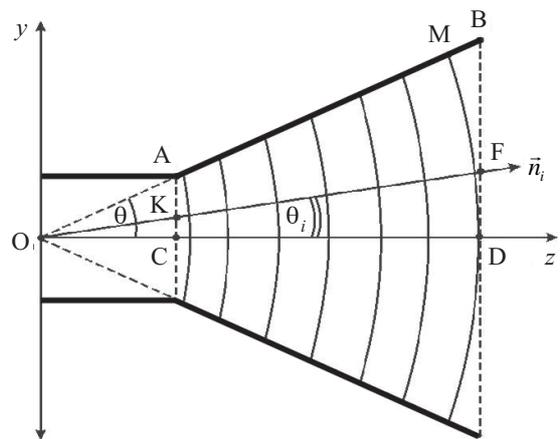


Рис. 1. Продольный разрез H-секториального рупорного излучателя с прямолинейными образующими:  $\theta$  — половинный угол раскрытия РИ;  $\theta_i$  — текущее значение половинного угла раскрытия

Фазовая ошибка в раскрытии РИ уменьшает его коэффициент использования поверхности (КИП) и коэффициент направленного действия (КНД). Диаграмма направленности при этом расширяется. Воспрепятствовать уменьшению КНД, связанному с укорочением РИ, можно увеличением площади раскрытия либо минимизацией фазовой ошибки в раскрытии РИ.

Однако увеличивать площадь раскрытия РИ сколько угодно простым расширением стенок нецелесообразно, т. к. фазовая ошибка будет расти быстрее, чем площадь раскрытия, и КНД не будет увеличиваться. Поэтому чтобы фазовая ошибка не возрастала с увеличением площади раскрытия, необходимо также увеличивать длину рупора. В коротком рупоре фазовая ошибка играет существенную роль, а в длинном — несущественную.

Вместе с тем увеличение размеров рупора делает его нерациональным с точки зрения массогабаритных характеристик и материалоемкости. По этой причине применяют другие методы выравнивания фазы в раскрытии — с помощью диэлектрических линз, волноводных вставок и рупоров специальной формы.

Анализ показывает, что РИ имеет оптимальные размеры, когда фазовые сдвиги на его краях не превышают  $\pi/2$  в плоскости вектора электрического поля (E-плоскости) и  $3\pi/4$  в H-плоскости. РИ с такими фазовыми сдвигами принято называть оптимальными [2, с. 99].

Для устранения фазовой ошибки необходимо, чтобы фронт электромагнитной волны, распространяющейся в РИ, проходил неравные расстояния за равные промежутки времени в области от горловины до раскрытия РИ. Это возможно, если ее скорость распространения будет меняться по определенному закону (от оси до образующей РИ), зависящему от угла  $\theta_i$  (рис. 1). Очевидно, что вдоль оси  $z$  волна должна быть замедлена относительно волны, распространяющейся вдоль огибающей  $AB$ , на величину, необходимую для выравнивания волнового фронта. Это условие должно выполняться для каждой точки пространства внутри РИ.

Для решения данной задачи предлагается использовать замедляющие свойства периодических импедансных структур.

### Определение коэффициента замедления электромагнитных волн в РИ

Так как продольное сечение РИ симметрично оси  $z$ , то для решения задачи достаточно рассмотрения области  $OBD$  (рис. 1). Для того, чтобы фазовая ошибка была равна нулю, т. е.  $\Delta\phi=0$ , необходимо, чтобы волновой фронт проходил путь  $AB$  и  $CD$  за одно и то же время, т. е. должно выполняться условие

$$\frac{AB}{c} = \frac{CD}{v_\phi}, \quad (1)$$

где  $c$  — скорость света;

$v_\phi$  — фазовая скорость замедленной волны.

Отсюда получим выражение для  $v_\phi$ :

$$v_\phi = \frac{CD}{AB} c = \cos \theta \cdot c. \quad (2)$$

Запишем два крайних условия для скорости электромагнитной волны в РИ:

- 1) вдоль образующей РИ  $v_\phi = c$ ;
- 2) вдоль оси  $z$  РИ  $v_\phi = \cos \theta \cdot c$ .

Введем коэффициент замедления скорости распространения электромагнитной волны  $\xi$  в замедляющей структуре в виде соотношения

$$\xi = \frac{c}{v_\phi}. \quad (3)$$

Запишем крайние условия для коэффициента замедления в РИ:

$$1) \text{ вдоль образующей РИ } \xi = \xi_0 = 1; \quad (4)$$

$$2) \text{ вдоль оси } z \text{ РИ } \xi_z = \frac{1}{\cos \theta}. \quad (5)$$

Определим закон изменения  $\xi$  в области  $ABDC$  РИ, при котором для любых углов  $0 \leq \theta_i \leq \theta$  выполняются условия (4)–(5).

Возьмем произвольный вектор  $\vec{n}_i$ , образующий с осью РИ угол  $\theta_i$ , и определим скорость волны  $v_{\phi i}$  в направлении вектора  $\vec{n}_i$ . Для этого должно выполняться условие

$$\frac{KF}{v_{\phi i}} = \frac{CD}{v_\phi} = \frac{AB}{c}. \quad (6)$$

Из (2) и (6) получим:

$$AB = \frac{CD}{\cos \theta}; \quad KF = \frac{CD}{\cos \theta_i}. \quad (7)$$

Зависимость скорости волны от угла  $\theta_i$  из (6) и (7) будет иметь вид

$$v_{\phi i} = c \frac{\cos \theta}{\cos \theta_i}. \quad (8)$$

Учитывая соотношение (3), получим зависимость величины коэффициента замедления от угла  $\theta_i$  в виде

$$\xi_i = \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta}. \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, что коэффициент замедления электромагнитной волны в направлении вектора  $\vec{n}_i$  должен быть таким, чтобы ее фаза не отличалась от фазы волны, распространяющейся вдоль огибающей  $AB$  РИ.

Очевидно, что

$$\text{при } \theta_i = \theta \Rightarrow \xi_i = \xi_0 = 1 \Rightarrow v_\phi = c;$$

$$\text{при } \theta_i = 0 \Rightarrow \xi_i = \frac{1}{\cos \theta} \Rightarrow v_\phi = c \cdot \cos \theta.$$

Таким образом, крайние условия для скорости электромагнитной волны в РИ для углов в диапазоне  $0 \leq \theta_i \leq \theta$  выполняются.

Определив все  $v_{\phi i}$  и  $\xi_i$  для области  $OBD$ , получим значения скоростей и коэффициентов замедления электромагнитных волн для всех направлений  $\theta_i$ .

### Определение параметров замедляющей структуры

В качестве замедляющей структуры используем импедансную металлическую гребенку, конструкция которой представлена на рис. 2.

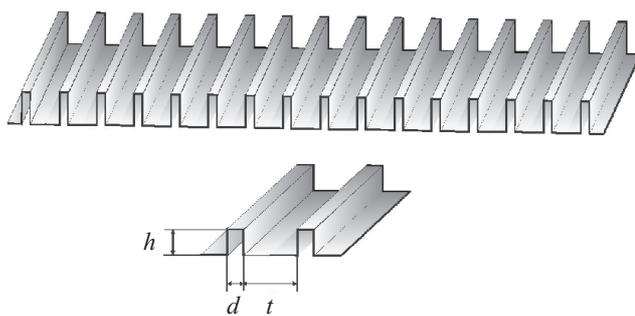


Рис. 2. Импедансная металлическая гребенка

Коэффициент замедления электромагнитной волны  $\xi_{гр}$  для гребенки такой структуры определяется по формуле [2, с. 115]

$$\xi_{гр} = \sqrt{1 + \left( \frac{t}{t+d} \right)^2 \operatorname{tg}^2 \left( \frac{2\pi h_3}{\lambda_0} \right)}, \quad (10)$$

где  $t$  — ширина канавки импедансной гребенки;

$d$  — толщина ребра;

$h_3$  — эффективная высота ребер;

$\lambda_0$  — средняя длина волны рабочего диапазона рупорного излучателя.

Формула (10) справедлива при условии

$$\begin{cases} t + d < 0,5\lambda; \\ d \ll t. \end{cases} \quad (11)$$

Эффективная высота ребер в первом приближении равна

$$h_3 = h - 0,14(d+t), \quad (12)$$

где  $h$  — конструктивная высота ребер.

Уменьшение расчетной конструктивной высоты ребер (12) является результатом проникновения электромагнитного поля замедленной поверхностной волны в верхнюю часть канавок гребенки.

Приравнявая (9) и (10), найдем конструктивную высоту ребер гребенки как функцию угла  $\theta_i$ :

$$h_i(\theta_i) = \text{arctg} \left( \frac{t+d}{t} \sqrt{\frac{\cos^2 \theta_i}{\cos^2 \theta} - 1} \right) + 0,14(d+t) + \pi k, \quad (13)$$

где  $k$  — целое число ( $k = 1, 2, 3, \dots, n$ ).

Формула (13) определяет конструктивную высоту гребенки в  $i$ -м направлении относительно оси  $z$  (рис. 1), при которой во всех точках раскрыва РИ фаза волны будет одинаковой.

Минимальная фазовая скорость замедленной волны  $v_{\min}$  ограничена дискретностью ребер гребенки. В соответствии с условием (11) разность фаз в соседних канавках не может превышать  $\pi$ . Тогда

$$v_{\min} = 2(t+d)f = c \frac{2(t+d)}{\lambda}, \quad (14)$$

где  $f$  — частота электромагнитных колебаний.

Соотношение (14) совместно с (10) определяет верхний  $f_{\text{в}}$  и нижний  $f_{\text{н}}$  пределы рабочего частотного диапазона, соответственно:

$$f_{\text{в}} = \frac{c}{2(t+d) \sqrt{1 + \left( \frac{t}{t+d} \right)^2 \text{tg}^2 \left( \frac{2\pi h_3}{\lambda_0} \right)^2}}; \quad (15)$$

$$f_{\text{н}} = \frac{2,14 \cdot 10^6}{h_3 \left( 1 - \frac{t}{t+d} \right)}. \quad (16)$$

Подставив (14) в (3) и затем приравняв полученное выражение к (5), найдем предельно допустимый угол  $\theta_{\max}$ , при котором замедляющее свойство гребенки сохраняется.

$$\xi_z = \frac{1}{\cos \theta_{\max}} = \frac{c}{v_{\min}}. \quad (17)$$

Отсюда

$$\theta_{\max} = \pm \arccos \frac{2(t+d)}{\lambda} + 2\pi k;$$

$$k \in z; \quad \left| \frac{2(t+d)}{\lambda} \right| < 1. \quad (18)$$

Тогда минимальная длина РИ (отрезок  $OD$ ) при той же величине раскрыва будет равна

$$OD_{\min} = \frac{BD}{\text{tg} \theta_{\max}}, \quad (19)$$

где  $BD$  — половина длины широкой стенки раскрыва РИ.

При длине РИ меньшей, чем  $OD_{\min}$ , гребенка теряет замедляющую способность, что приводит к появлению в раскрыве РИ фазовой ошибки.

При расчете параметров импедансной гребенки необходимо соблюдать следующие интервалы значений конструктивной высоты ребер  $h$ , при которых над ней может существовать замедленная поверхностная волна [2—4].

Первый случай:

$$0 < h < \frac{\lambda_{\max}}{4}. \quad (20)$$

В этом случае  $v_{\phi} < c$ , а входное комплексное сопротивление гребенки  $Z_{\text{вх}}$  носит индуктивный характер. Амплитуда поверхностной волны максимальна у поверхности и убывает по мере удаления от нее.

Во втором случае

$$\frac{\lambda}{4} < h < \frac{\lambda}{2}, \quad (21)$$

$v_{\phi} < c$ , а входное комплексное сопротивление гребенки  $Z_{\text{вх}}$  носит емкостный характер. Амплитуда поверхностной волны минимальна у поверхности и возрастает по мере удаления от нее (псевдоповерхностная волна).

Третий случай аналогичен первому:

$$\frac{\lambda}{2} < h < \frac{3\lambda}{4}. \quad (22)$$

Если  $h = \frac{\lambda}{4}$ , то коэффициент замедления  $\xi_{\text{гр}} = \infty$  и фазовая скорость замедленной волны  $v_{\phi} = 0$ , а входное комплексное сопротивление гребенки  $Z_{\text{вх}}$  равно бесконечности, и замедленной поверхностной волны не существует.

Соотношение (10) справедливо, когда вектор скорости распространения электромагнитных волн над импедансной гребенкой  $\vec{n}_i$  перпендикулярен ее ребрам при любых значениях угла  $\theta_i$ . Соблюдение этого условия возможно лишь в случае, когда ребра выполнены в виде радиальных дуг с центром кривизны в точке  $O$  (рис. 1).

Таким образом, полученная замедляющая структура представляет собой металлическую гребенку ребер и канавок с радиальной кривизной, центром в точке  $O$  и высотой ребер, меняющейся по закону (13).

Определим, во сколько раз длина РИ с импедансной гребенкой меньше длины классического оптимального  $H$ -секториального РИ с прямолинейными образующими при одинаковых размерах их раскрывов.

Длина оптимального  $H$ -секториального РИ с прямолинейными образующими определяется соотношением [2, с. 99]

$$l_{\text{опт}} = \frac{a^2}{3\lambda}, \quad (23)$$

где  $l_{\text{опт}}$  — оптимальная длина РИ;  
 $a$  — размер широкой стенки раскрыва РИ.

Минимальная длина полученного РИ с импедансной гребенкой определяется по формуле (19). При одинаковых размерах их раскрывов будет выполняться условие  $BD = \frac{1}{2}a$ . Тогда перепишем (19) в виде

$$OD_{\text{min}} = \frac{a}{2\text{tg}\theta_{\text{max}}}, \quad (24)$$

где  $\theta_{\text{max}}$  — максимальный угол  $BOD$ , при котором замедляющие свойства гребенки сохраняются.

Так как  $l_{\text{опт}} > OD_{\text{min}}$ , то правомерно записать уравнение

$$l_{\text{опт}} = N \cdot OD_{\text{min}}, \quad (25)$$

где  $N$  — коэффициент кратности.

Подставив (23) и (24) в (25), получим:

$$\frac{a^2}{3\lambda} = N \frac{a}{2\text{tg}\theta_{\text{max}}}. \quad (26)$$

Из последнего, с учетом того, что  $BD = \frac{1}{2}a$ , получим выражение, показывающее, во сколько раз длина РИ с импедансной гребенкой меньше длины классического оптимального  $H$ -секториального РИ с прямолинейными образующими при одинаковых размерах их раскрывов:

$$N = \frac{2a \cdot \text{tg}\theta_{\text{max}}}{3\lambda} = \frac{4BD \cdot \text{tg}\theta_{\text{max}}}{3\lambda}. \quad (27)$$

### Результаты и их обсуждение

Учитывая условия (11), по формулам (13) и (18) получено семейство кривых, отображающих зависимость конструктивной высоты ребер  $h$  гребенки от углов  $\theta_i$  для длины волны  $\lambda_0 = 32$  мм при максимальном угле  $\theta_{\text{max}}$  для разной ширины канавок (рис. 3). Толщина ребер импедансной гребенки  $d$  для всех случаев была равна 2 мм.

Из рисунка видно, что уменьшение ширины канавок  $t$  приводит к увеличению предельно допустимого угла раскрыва  $2\theta_{\text{max}}$  и, как следствие, к уменьше-

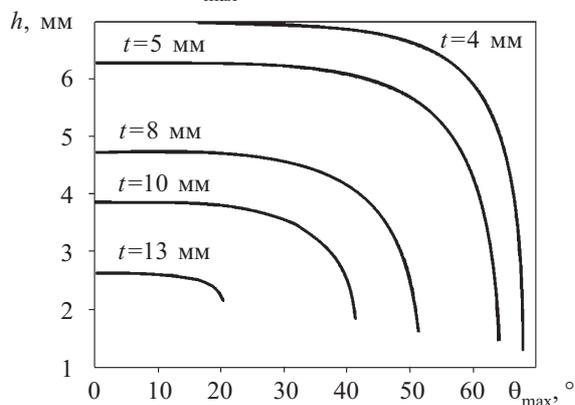


Рис. 3. График зависимости высоты ребер  $h$  от угла  $\theta$  при разной ширине канавок  $t$

нию длины РИ. Однако при  $t > 4$  мм конструктивная высота ребер  $h$  приближается к пределу  $\lambda/4$ , на котором замедленной волны не существует. Поэтому максимум угла  $\theta$  в данном случае не превышает  $68^\circ$ .

Методом компьютерного моделирования получен рельеф импедансной замедляющей гребенки (рис. 4), компенсирующей фазовую ошибку в  $H$ -секториальном РИ с углом раскрыва, близким к предельно допустимому углу —  $2\theta \approx 2\theta_{\text{max}}$ .

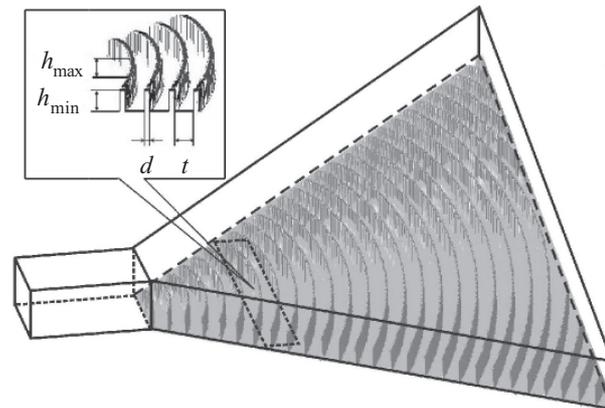


Рис. 4. Схематичный вид  $H$ -секториального РИ с импедансной замедляющей гребенкой, компенсирующей фазовую ошибку

Из рис. 4 видно, что в нулевом направлении, при  $\theta_i = 0$ , высота ребра максимальна —  $h_{\text{max}}$  (скорость волны минимальна), а на образующей РИ, при  $\theta_i = \theta_{\text{max}}$ , минимальна —  $h_{\text{min}}$  (скорость волны максимальна).

### Выводы

$H$ -секториальный рупорный излучатель с импедансной гребенкой обладает большим коэффициентом направленного действия, чем классический оптимальный  $H$ -секториальный РИ с прямолинейными образующими, при одинаковых габаритных размерах их раскрывов. Это обусловлено тем, что при отсутствии фазовой ошибки коэффициент использования поверхности раскрыва РИ стремится к единице.

Достоинством данной конструкции является то, что фазовый фронт распространяющейся в РИ электромагнитной волны остается плоским на всей протяженности РИ. Это позволяет создавать РИ с раскрывом больших размеров без снижения КИП, КНД и коэффициента усиления рупорного излучателя.

Введение в условия (4)–(5) дополнительных функций позволяет получить заранее заданную форму волнового фронта в раскрыве РИ и, как следствие, управлять диаграммой направленности  $H$ -секториального РИ.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Шумлянский И. И. Рупорные излучатели со ступенчатыми и криволинейными образующими. — К.: Вища шк., 1986.
2. Хмель В. Ф., Шумлянский И. И., Горобец Н. Н. и др. Теория и расчет антенн и устройств сверхвысоких частот. Сб. задач. — Одесса: Латстар, 2001.
3. Андрійшин В. О. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Ч. 1. Теорія електромагнітного поля та техніка НВЧ. — Одеса: Астропринт, 2005.
4. Бененсон Л. С., Кюркчан А. Г. Метод развязки антенн при помощи периодических структур // Радиотехника. — 1995. — № 12. — С. 62–69.