

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 раскрыва вдоль оси z (отрезок CD) меньше расстояния от горловины до раскрыва 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 раскрыва 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 раскрыва со значением [1, с. 66]

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

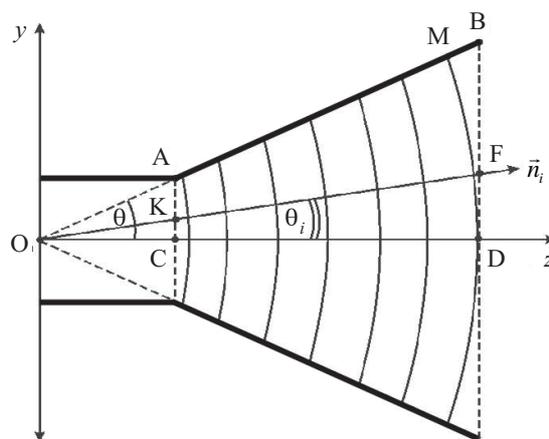


Рис. 1. Продольный разрез H-секториального рупорного излучателя с прямолинейными образующими: θ — половинный угол раскрыва РИ; θ_i — текущее значение половинного угла раскрыва

Фазовая ошибка в раскрыве 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 раскрыва либо минимизацией фазовой ошибки в раскрыве РИ.

Однако увеличивать площадь раскрыва РИ сколько угодно много простым расширением стенок нецелесообразно, т. к. фазовая ошибка будет расти быстрее, чем площадь раскрыва, и КНД не будет увеличиваться. Поэтому чтобы фазовая ошибка не возрастала с увеличением площади раскрыва, 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 раскрыве — 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 θ_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_ϕ — фазовая скорость замедленной волны.

Отсюда получим выражение для v_ϕ :

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

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 ξ 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 ξ 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 θ_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 θ_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 θ_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 ξ_i для области OBD , получим значения скоростей и коэффициентов замедления электромагнитных волн для всех направлений θ_i .

Определение параметров замедляющей структуры

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

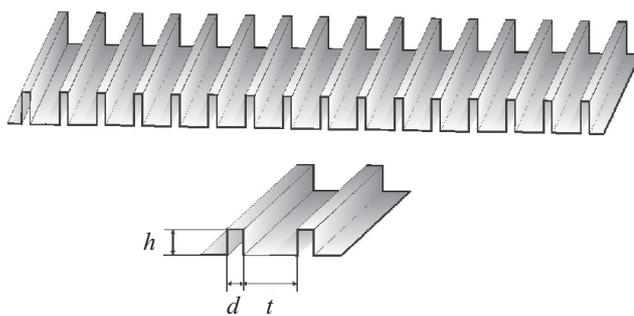


Рис. 2. Импедансная металлическая гребенка

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;

λ_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 θ_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 π . 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 θ_{\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 θ_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 θ_{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 θ_i для длины волны $\lambda_0 = 32$ мм при максимальном угле θ_{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-

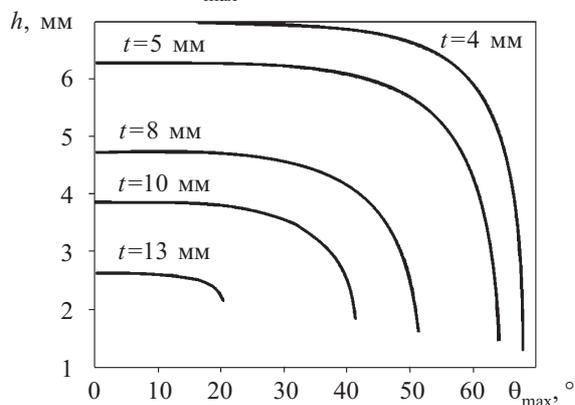


Рис. 3. График зависимости высоты ребер h от угла θ при разной ширине канавок t

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 θ в данном случае не превышает 68° .

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 — $2\theta \approx 2\theta_{\text{max}}$.

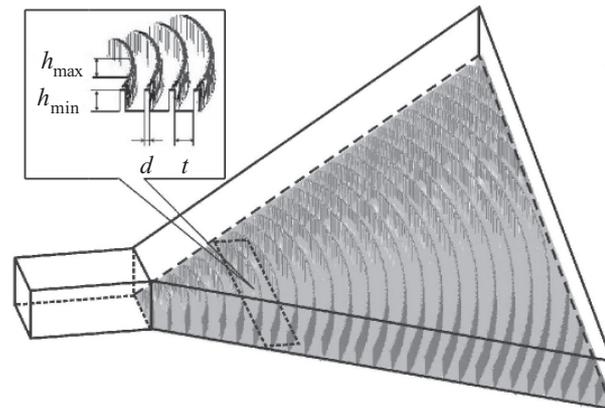


Рис. 4. Схематичный вид H -секториального РИ с импедансной замедляющей гребенкой, компенсирующей фазовую ошибку

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