

УДК 621.385.6

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОФИЛЯ РУПОРА КРУГОВОГО СЕЧЕНИЯ, ВОЗБУЖДАЕМОГО E_{01} -ВОЛНОЙ

И.В. ЛУЩИЦКАЯ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь,

Поступила в редакцию 27 апреля 2006

Для рупора кругового сечения решена задача нахождения оптимального профиля, обеспечивающего при значительном уменьшении длины одномодовость волны в апертуре. При моделировании процесса возбуждения рупора используется метод отображения внутренней области рупора на цилиндр единичного радиуса, а также эффективный метод блочной матричной прогонки, позволяющий решить краевую задачу для амплитуд возбуждаемых волн в случае расширяющегося волновода с переходом закритических волн в распространяющиеся.

Ключевые слова: рупор, нерегулярный волновод.

Введение

Рупорные излучатели или просто рупоры широко используются в антенной технике, в частности, для сопряжения полого волновода с зеркальной антенной или для измерений полей излучателей [1, 2].

Основное назначение рупора состоит в том, чтобы согласовать волновод с открытым пространством, что достигается за счет плавного увеличения радиуса волновода до значения, при котором фазовая скорость основной волны приближается к скорости света в свободном пространстве. При этом условии отражение от открытого конца волновода практически отсутствует и диаграмма направленности излучения соответствует распределению рабочей волны на раскрытие рупора.

Однако проблема реализации такого рупора заключается в том, что при необходимом для идеального сопряжения выходном радиусе в рупоре возбуждаются высшие типы волн, которые имеют фазовую скорость, большую скорости света в открытом пространстве, что приводит как к рассогласованию и, следовательно, увеличению коэффициента отражения, так и к искажению диаграммы направленности. Как показывают расчеты, за счет увеличения длины рупора с плавным увеличением радиуса эти негативные факторы хотя и возможно уменьшить, однако лишь до определенного не всегда приемлемого уровня. Наиболее радикальный путь улучшения характеристик рупора — подбор закона изменения профиля, при котором высшие типы волн на его выходном сечении отсутствуют и при этом коэффициент отражения из-за их возбуждения минимален.

В настоящей работе такая оптимизационная задача решается для рупора, представляющего преобразователь сопротивления для симметричной E_{01} -волны. Найдены и исследованы оптимальные варианты профилей рупора ограниченной длины, в котором возможно возбуждение одной или двух распространяющихся волн. Следует отметить, что в таком рупоре кроме

распространяющихся, возбуждается также ряд ближайших закритических для текущего сечения волн. Чтобы обеспечить их отсутствие на выходном сечении, (после которого они становятся распространяющимися) рупор имеет достаточно протяженный регулярный выходной участок. В статье задача оптимизации решается для одночастотного режима; она весьма актуальна в настоящее время для расчета и оптимизации профиля выходного рупорного излучателя релятивистской сверхмощной ЛБВ-0 с рабочим типом волны E_{01} .

Схема рупора и математическая модель, используемая для расчетов

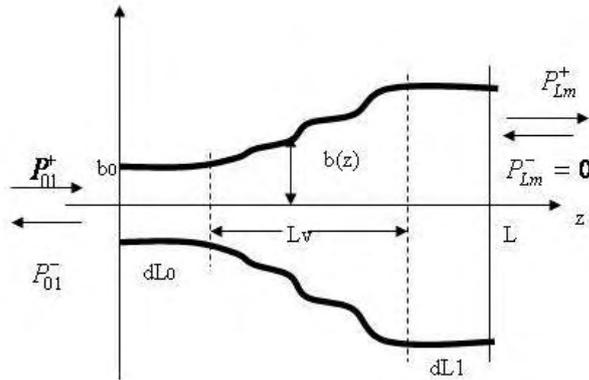


Рис. 1. Схема рупора

Схема рассматриваемого рупора приведена на рис. 1.

Рупор имеет вид отрезка круглого нерегулярного расширяющегося волновода, представляющего преобразователь волнового сопротивления для E_{01} -волны круглого

волновода: $W_{01}^E = W^0 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2\pi b'} v_{01}\right)^2}$; v_{01} — первый корень $J_0(x)$; λ — длина волны в свободном пространстве; b' — радиус волновода; $W^0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$ — волновое сопротивление свободного пространства. Выходной радиус должен быть велик настолько, что

$\left(\frac{\lambda}{2\pi b'} v_{01}\right)^2 \rightarrow 0$ и $W_{01}^E \rightarrow W^0$. В этом случае отражением от открытого конца можно пренеб-

речь и считать, что мощности обратных волн на выходе отсутствуют: $P_{Lm}^- = 0$. Нерегулярный участок длины L_v , сопряжен с отрезками регулярного волновода, имеющими длину ΔL_0 и ΔL_1 , достаточную для затухания возбуждаемых закритических волн. На вход $z = 0$ рупора радиуса $v_{01} < b_0 < v_{02}$ подается E_{01} -волна, имеющая мощность P_{01}^+ . Мощность отраженной E_{01} -волны P_{01}^- , а также мощности всех возбуждаемых в выходном сечении распространяющихся волн P_{Lm}^+ ($m = 1, 2, \dots$) находятся в результате расчета. Закритические волны энергии не переносят, однако их амплитуда в выходном сечении может быть большой, за счет чего структура основной волны будет искажена. Это, естественно, следует предотвратить.

Возбуждение волн в таком рупоре на рабочей частоте ω описывается следующими безразмерными уравнениями Максвелла для комплексных амплитуд и граничными условиями на внутренней поверхности рупора S :

$$\text{rot} \dot{\vec{B}} = jw \dot{\vec{E}}; \quad \text{rot} \dot{\vec{E}} = jw \dot{\vec{B}}; \quad \left[\vec{n} \cdot \dot{\vec{E}} \right]_S = 0. \quad (1)$$

Здесь приняты следующие безразмерные переменные: $\{\vec{E}, \vec{B}\} = \text{real} \left\{ \dot{\vec{E}}, \dot{\vec{B}} \cdot e^{j\omega t} \right\}$; $w = \omega / \omega_0$;

ω_0 — опорная частота, $(r, z, b, L) = k_0 \cdot (r', z', b', L')$; $k_0 = \omega_0 / c$; c — скорость света; $T = z / L$; $\dot{\vec{E}} = \dot{\vec{E}}' / E_0$; $\dot{\vec{B}} = \dot{\vec{B}}' \cdot c / E_0$; E_0 — амплитуда волны на входе рупора.

При задании граничных условий в сечениях ($z=0$ и $z=L$) используем тот факт, что на регулярных участках волновода электромагнитное поле представляется в виде суммы прямой и обратной симметричных E_{0m} -волн (как распространяющихся, так и затухающих) вида

$$\sum_m \dot{e}_m^+ e^{-jk_m^e z} (\dot{E}^{e+}, \dot{B}^{e+})_m + \dot{e}_m^- e^{+jk_m^e z} (\dot{E}^{e-}, \dot{B}^{e-})_m, \quad (2)$$

где \dot{e}_m^\pm — постоянные амплитуды; $(\dot{E}^{e\pm}, \dot{B}^{e\pm})_m$ — мембранные функции; E_{0m} — волны регулярного волновода; $k_m^e = \sqrt{w^2 - v_{0m}^2} / b^2$ — продольное волновое число.

Воспользуемся общей теорией возбуждения нерегулярного волновода, построенной на основе метода отображения внутренней области нерегулярного волновода на цилиндр единичного радиуса, развитого в [3, 4]. Согласно этой теории решение (1) для компонент симметричных E -волновых полей представляется в виде разложения по собственным E_{0m} волнам стандартного волновода единичного радиуса:

$$\begin{aligned} \dot{E}_r &= -\frac{I}{b(z)} \sum_{m=1}^M \dot{A}_m(z) \cdot J_1(v_{0m} \frac{r}{b(z)}); & \dot{B}_\varphi &= -\frac{j}{b(z)} \sum_{m=1}^M \dot{V}_m(z) \cdot J_1(v_{0m} \frac{r}{b(z)}); \\ \dot{E}_z &= \sum_{m=1}^M [\dot{C}_m(z) \cdot J_0(v_{0m} \frac{r}{b(z)}) - \frac{r}{b^2} \frac{db}{dz} \dot{A}_m(z) \cdot J_1(v_{0m} \frac{r}{b(z)})]; \end{aligned} \quad (3)$$

M — количество учитываемых волн.

Амплитуды, \dot{A}_m, \dot{V}_m , представляющие коэффициенты разложения компонент поля, удовлетворяют системе парных линейных обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\vec{u}}{dT} = G(T)\vec{u}; \quad \vec{u} = \{\dot{A}_1, \dot{V}_1, \dot{A}_2, \dot{V}_2, \dots, \dot{A}_m, \dot{V}_m\} = \{u^1 \dots u^{2M}\}. \quad (4)$$

Элементы матрицы G выражаются следующим образом (обозначим $b'_T = \frac{db}{dT}$):

Для $m=1 \dots M, k=1 \dots M, k \neq m$:

$$\begin{aligned} g_{2m-1, 2m-1} &= -\frac{b'_T}{b}; & g_{2m-1, 2m} &= \frac{L}{w} \left[(w)^2 - \frac{v_{0m}^2}{b^2} \right]; \\ g_{2m-1, 2k} &= 0; & g_{2m-1, 2k-1} &= \frac{b'_T}{b} \frac{2v_{0m}^2}{v_{0k}^2 - v_{0m}^2} \frac{J_1(v_{0k})}{J_1(v_{0m})}; \\ g_{2m, 2m-1} &= -wL \left\{ 1 + \frac{b_T'^2}{L^2} \left[\frac{1}{3} \left(1 + \frac{1}{v_{0m}^2} \right) - \sum_{k \neq m} \frac{4v_{0k}^2}{(v_{0m}^2 - v_{0k}^2)^2} \right] \right\}; \\ g_{2m, 2m} &= \frac{b'_T}{b}; & g_{2m, 2k} &= -\frac{b'_T}{b} \frac{2v_{0k}^2}{v_{0m}^2 - v_{0k}^2} \frac{J_1(v_{0k})}{J_1(v_{0m})}; \\ g_{2m, 2k-1} &= -w \frac{b_T'^2}{L} \left[\frac{4(v_{0m}^2 + v_{0k}^2)}{(v_{0m}^2 - v_{0k}^2)^2} \frac{J_1(v_{0k})}{J_1(v_{0m})} - \sum_{\substack{l \neq m \\ l \neq k}} \frac{4v_{0l}^2}{(v_{0m}^2 - v_{0l}^2)(v_{0k}^2 - v_{0l}^2)} \frac{J_1(v_{0k})}{J_1(v_{0m})} \right] \end{aligned}$$

Амплитуды \dot{C}_m получаются после решения (4) по формуле

$$\dot{C}_{sm} = -\frac{v_{0m} \dot{B}_m}{w \cdot b^2} + \frac{b'_T}{L_0 b} \times \left(-\frac{\dot{A}_m}{v_{0m}} + \sum_{k \neq m} \frac{2 \cdot v_{0m}}{v_{0k}^2 - v_{0m}^2} \cdot \frac{J_1(v_{0k})}{J_1(v_{0m})} \dot{A}_k \right);$$

Граничные условия к системе (4) формулируются следующим образом:
для распространяющихся E_{0m} волн:

$$\begin{aligned} w \dot{A}_m(0) + j k_{0m}^e \dot{V}_m(0) &= j k_{0m}^e w b_0 2 \dot{e}_{0m}^+; \\ -w \dot{A}_m(1) + j k_{Lm}^e \dot{V}_m(1) &= j k_{Lm}^e w b_L 2 \dot{e}_{Lm}^- \end{aligned} \quad (5)$$

для закритических E_{0m} волн:

$$\begin{aligned} w \dot{A}_m(0) + k_{0m}^e \dot{V}_m(0) &= k_{0m}^e w b_0 2 \dot{e}_{0m}^+; \\ -w \dot{A}_m(1) + k_{Lm}^e \dot{V}_m(1) &= k_{Lm}^e w b_L 2 \dot{e}_{Lm}^- \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $k_{0m}^e = \sqrt{w^2 - (v_{0m}^2 / b_0^2)}$; $k_{Lm}^e = \sqrt{w^2 - (v_{0m}^2 / b_L^2)}$; \dot{e}_{0m}^+ , \dot{e}_{Lm}^+ — амплитуды волн на входе и выходе рупора, соответствующие представлению (2).

Безразмерная мощность, переносимая парциальной E_{0m} -волной через поперечное сечение волновода в выбранных переменных выражается следующим образом:

$$P_m(T) = \frac{1}{2} J_1^2(v_{0m}) \cdot \text{Im}[\dot{A}_m(T) \cdot \dot{V}_m(T)]. \quad (7)$$

Исходя из представления (2) на регулярных участках, мощности прямой и обратной распространяющихся волн в выбранных безразмерных переменных представим в виде

$$P_m^\pm = \frac{1}{2} J_1^2(v_{0m}) \cdot \text{Im} \left(\dot{A}_m \pm \frac{j}{L \cdot k_m^e} \frac{d\dot{A}_m}{dT} \right) \left(\dot{V}_m \pm \frac{j}{L k_m^e} \frac{d\dot{V}_m}{dT} \right) \quad (8)$$

Для выполнения условий излучения на входном и выходном сечениях рупора (см. рис. 1) в (5), (6) задавалось:

на входе: $e_{0l}^+ = 1$; $e_{0m}^+ = 0, m > 1$; на выходе:

$$e_{Lm}^- = 0; m \geq 1 \quad (9)$$

Особенности расчета и методика оптимизации профиля

Особенность краевой задачи для системы (4) состоит в том, что применение для ее решения метода пристрелки приводит к некорректной задаче Коши из-за наличия экспоненциально нарастающих составляющих в представлении общего решения при учете закритических волн в (3). Для решения подобных задач ранее предлагались метод направленной ортогонализации [5], различные варианты методов дифференциальной прогонки [6, 7], которые, однако, для случая расширяющегося волновода с переходом закритических волн в распространяющиеся неприменимы.

Ниже для этой краевой задачи предлагается универсальный устойчивый алгоритм на основе метода блочной матричной прогонки.

Для численного решения краевой задачи (4)–(6) выберем равномерную сетку: $\{T_i = (i-1)h, h = 1/n, i = 1 \dots n+1\}$; $\{\bar{u}_i = \bar{u}(T_i)\}$ — таблица значений искомого решения в узлах сетки.

Для расчетов выберем трехточечную конечно-разностную неявную схему Адамса третьего порядка точности:

$$\frac{h}{12}G_{i-1}\bar{u}_{i-1} - (E + \frac{8h}{12}G_i)\bar{u}_i + (E - \frac{5h}{12}G_{i-1})\bar{u}_{i+1} = 0; \quad i = 2 \dots n; \quad (10)$$

E — единичная матрица, $G_i = G(T_i)$.

Систему (10) следует дополнить одним недостающим конечноразностным уравнением (выберем неявную двухточечную схему второго порядка):

$$(E + \frac{h}{2}G_1)\bar{u}_1 + (-E + \frac{h}{2}G_2)\bar{u}_2 = 0 \quad (11)$$

и граничными условиями, которые следуют из (5), (6):

$$\alpha_m^0 u_1^{2m-1} + \beta_m^0 u_1^{2m} = \gamma_m^0; \quad \alpha_m^L u_{n1}^{2m-1} + \beta_m^L u_{n1}^{2m} + \gamma_m^L; \quad m = 1 \dots M. \quad (12)$$

Для решения системы (10)–(12) с блочно-ленточной матрицей была разработана экономичная модификация метода Гаусса – метод блочной матричной прогонки.

Профиль нерегулярного участка рупора аппроксимировался многопараметрической функцией вида

$$b(T) = b_0 + (b_L - b_0) \cdot P_5(T) + \sum_{k=1}^K c_k \cdot \varphi_3[(K+3) \cdot T - k - 1] \quad (13)$$

Здесь $T = (z - \Delta L_0) / L_v$; P_5 — полином, задающий монотонное сопряжение входного и выходного регулярных отрезков; $P_5(T) = x^3(10 - 15T + 6T^2)$; $P_5(0) = P_5'(0) = P_5''(0) = P_5'(1) = P_5''(1) = 0$; $P_5(1) = 1$; $c_1 \dots c_K$ — коэффициенты разложения немонотонной составляющей $b(T)$ по сдвигам финитной функции $\varphi_3(x)$, представляющей B -сплайн третьей степени:

$$\varphi_3(x) = \begin{cases} 0, & |x| \geq 2; \\ \frac{(2-x)^3}{6}, & 1 \leq x \leq 2; \\ \frac{1}{6} [1 + 3(1-x) + 3(1-x)^2 - 3(1-x)^3], & 0 \leq x \leq 1; \\ \varphi_3(-x), & x \leq 0. \end{cases} \quad (14)$$

Такая аппроксимация обеспечивает гладкость второго порядка сопряжения с регулярными участками, коэффициенты же $c_1 \dots c_K$ соответствуют отклонениям $b(T)$ от монотонного

сопряжения в точках $T_k = \frac{k+1}{K+3}$; $k = 1 \dots K$.

Целевая функция задавалась из условия минимизации мощности отраженной волны на входе, мощности высших распространяющихся волн на выходе и квадрата амплитуд закритических волн на выходе:

$$F(c_1, \dots, c_K, \Delta L_1) \Rightarrow \min [P_1^-(0) + \sum_{m=2}^{m_r} P_m(L) + \sum_{m=m_r+1}^M [A_m^2(L) + V_m^2(L)]] \quad (15)$$

Анализ оптимальных вариантов

Как показывают теоретические и экспериментальные исследования [1,2], при раскрытии открытого конца волновода, а следовательно и рупора, соответствующего $b_L > 6$ (в наших безразмерных единицах), коэффициентом отражения от открытого конца можно пренебречь. При этом диаграмма направленности наилучшая, если в раскрытии фронт волны близок к плоскому, что обеспечивается в рассматриваемом варианте рупора (рис.1) гладким сопряжением с регулярным участком. Однако внутри рупора возбуждаются высшие типы волн. Выполненные нами расчеты монотонного рупора ($c_1 = c_2 = \dots c_K = 0$ в (13)) показали, что для $b_0 = 3, b_L = 10$ при длине $L_v = 15$ на выходе наблюдается две волны E_{01} и E_{02} с одинаковыми мощностями. Мощность третьей возбуждаемой волны при этом составляет 5% от начальной мощности волны. Для $L_v = 30$ выходная мощность E_{02} составляет 10%, для $L_v = 50$ – 2%. Обратное отражение связанное с возбуждением высших волн при этом ничтожно мало $P_{01}^- < 0.02\%$ при $L_v \geq 10$. Таким образом, для обеспечения одномодовости в монотонном рупоре его длина L_v должна превосходить радиус не менее чем в 5 раз, что не всегда приемлемо.

Как показали наши расчеты, за счет оптимизации немонотонного профиля рупора его длина может быть значительно уменьшена.

Для исследования были выбраны три варианта рупоров с одинаковым $b_0 = 3$ и увеличивающимся радиусом выходного сечения: 1) $b_L = 6$, 2) $b_L = 8$, 3) $b_L = 10$. Увеличение b_L обеспечивает приближение выходного сопротивления к сопротивлению открытого пространства: $W_{01}^E = 0.91 \cdot W_0 = 0.95 \cdot W = 0.97 \cdot W$ соответственно. Как показано в [2], такого раскрытия достаточно, чтобы пренебречь отражением от конца.

Расчеты показали, что при $L_v \geq 12$ для всех трех вариантов на фиксированной частоте за счет оптимизации коэффициентов $c_1 \dots c_K$ удастся найти профиль $b(z)$ при котором обеспечивается практически одномодовая трансформация сопротивления E_{01} -волны — значения $P_1^-(0), P_2(L), P_3(L)$ ничтожно малы.

Вариант 1) $b_0 = 3; b_L = 6; L_v = 10; M = 5; K = 5; c_{1-5} = -0.31, 0.13, 0.73, 0.29, -0.34;$
 $P_1(L) = 0.72; P_2(L) = 0.00004; P_1^-(0) = 0.0004.$

Вариант 2) $b_0 = 3; b_L = 8; L_v = 10; M = 5; K = 5; c_{1-5} = 1.13, 1.72, 0.09, -0.10, -0.25;$
 $P_1(L) = 0.72; P_2(L) = 0.0013; P_1^-(0) = 0.0002.$

Вариант 3) $b_0 = 3; b_L = 10; L_v = 14.1; M = 6; K = 6; c_{1-6} = -0.79, 2.22, -0.46, 0.004, 0.02, -0.79;$
 $P_1(L) = 0.72; P_2(L) = 0.0005; P_1^-(0) = 0.00004.$

На рис. 2–4 приведены оптимизированный профиль $b(z)$ (жирная кривая) и основные характеристики вариантов 1–3 соответственно: распределение вдоль рупора амплитуд $|\dot{A}_m(T)|$, $|\dot{V}_m(T)|$ и мощностей P_m возбуждаемых волн.

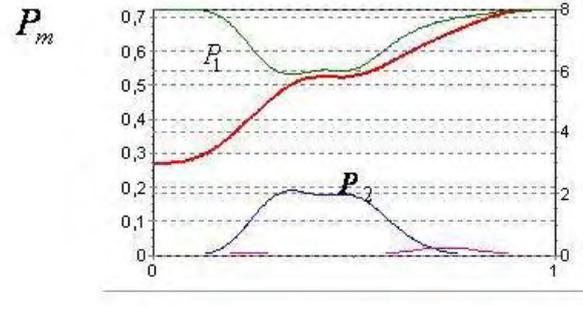
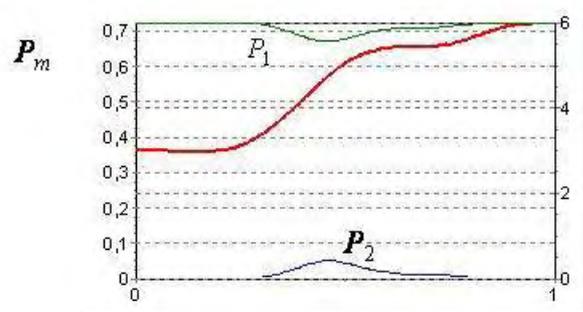
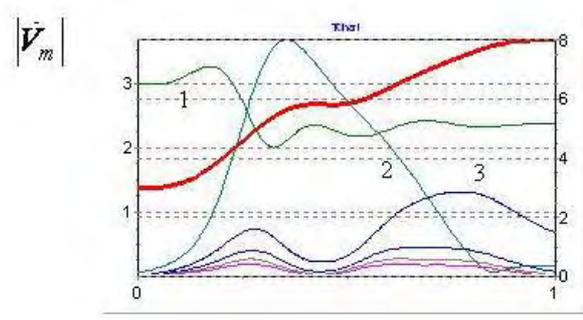
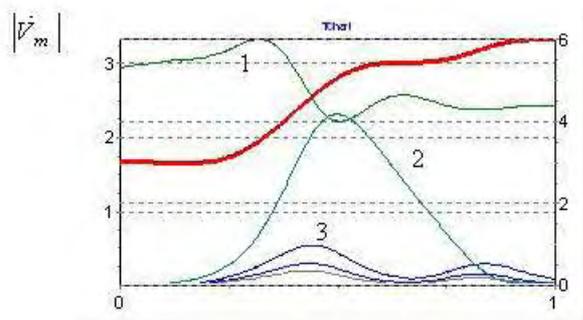
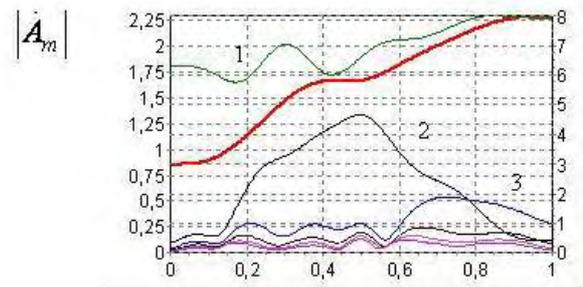
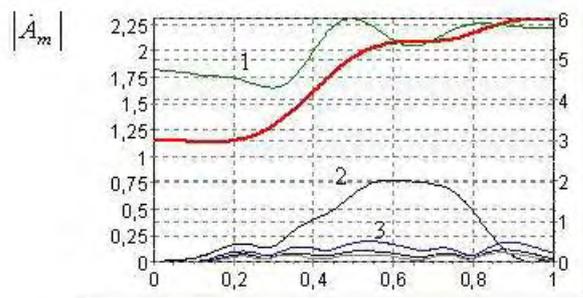


Рис. 2. Изменение вдоль рупора амплитуд и мощностей возбуждаемых волн для варианта 1: кривые 1, 2, 3 соответствуют волнам E_{01} – E_{03}

Рис. 3. Изменение вдоль рупора амплитуд и мощностей возбуждаемых волн для варианта 2: кривые 1, 2, 3 соответствуют волнам E_{01} – E_{03}

В варианте 1 наряду с E_{01} возбуждается еще одна распространяющаяся E_{02} волна. Амплитуды закритических волн благодаря плавному сопряжению затухают и в выходном сечении их величина не превосходит 2% от основной при $\Delta L_1 = 0.5$. Однако недостаточно большой радиус выходного сечения этого варианта приводит к небольшому рассогласованию ($W_{01}^E = 0.91 \cdot W_0$).

В варианте 2 радиус раскрыва увеличен до $b_L = 8$, что снижает рассогласование до 5%. Однако в этом варианте из-за того, что радиус b_L приближен к критическому $b_{кр} = 8.46$ для E_{03} волны, она выходит из закритического режима ($P_3 \neq 0$) на конечном нерегулярном участке рупора, (хотя радиус не превосходит $b_{кр}$) и ее амплитуда в выходном сечении оказывается значительной. На выходном регулярном участке эта волна опять закритическая и поэтому для того чтобы ее амплитуда затухла на выходе до 5% от основной, длина конечного регулярного участка должна быть $\Delta L_1 = 4$, что приемлемо для трансформатора сопротивлений, но не для рупора.

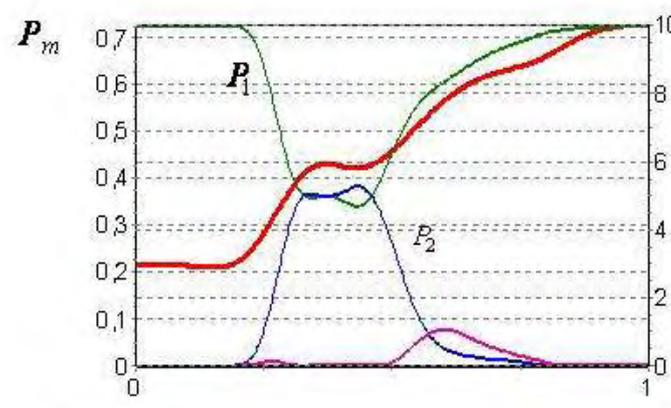
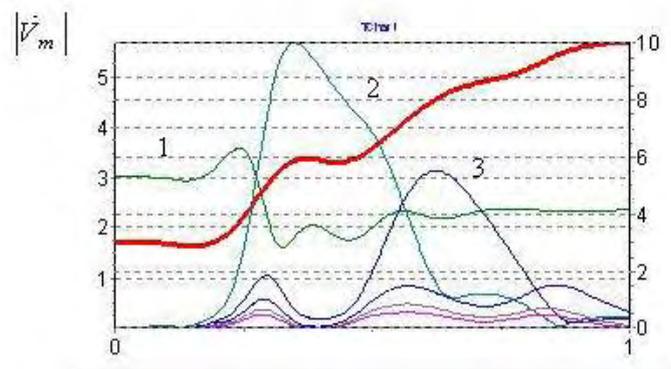
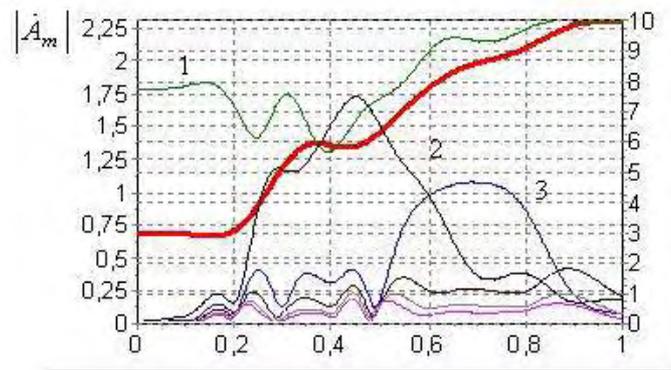


Рис. 4. Изменение вдоль рупора амплитуд и мощностей возбуждаемых волн для варианта 3: кривые 1, 2, 3 соответствуют волнам E_{01} – E_{03}

В варианте 3 радиус раскрыва увеличен до $b_L = 10$ и обеспечивает 97%-ное согласование. При этом радиусе распространяются волны E_{02} и E_{03} , а критический радиус E_{04} -волны $b_{кр} = 11.8$ расположен на удалении от b_L . В результате, как видно из рис.4, затухание амплитуды E_{04} -волны до 5%-ного уровня обеспечивается при минимальном $\Delta L_1 \approx 1.5$. Следует отметить что длина L_v в этом варианте увеличена в 1,4 раза, чтобы обеспечить такие же выходные параметры как и в варианте 1.

На рис. 5 представлена для варианта 3 характерная зависимость от относительной частоты W мощностей P_{L1} , P_{L2} основной E_{01} и E_{02} -волн на раскрыве и отраженной мощности P_{01}^- при фиксированной амплитуде $e_{01}^+ = 1$. Мощность P_{L3} остается меньше 0.5% от P_{L1} . Зависимости рис. 5 указывают на узкополосность немонотонного рупора.

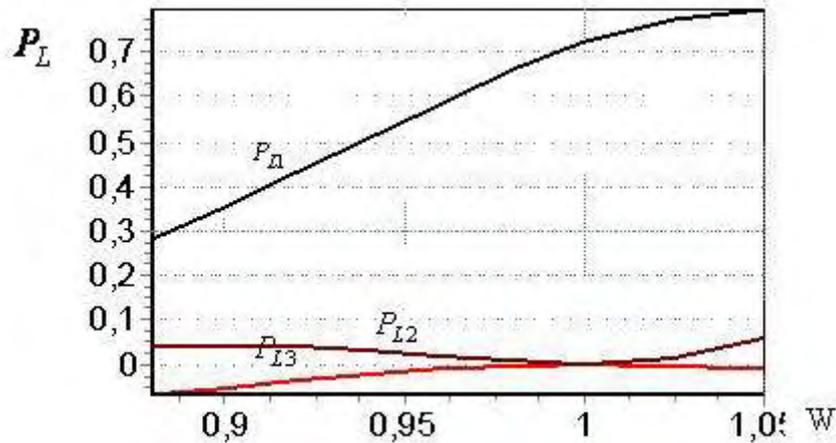


Рис. 5. Частотная характеристика фильтра для варианта 3: кривые 1 — $P_{L1}(W)$, 2 — $P_{L2}(W)$, 3 — $P_{L3}(W)$

OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE OF THE MEGAPHONE OF CIRCULAR SECTION RAISED E_{01} -WAVE

I.V. LUSHCHYTSKAYA

Abstract

For a megaphone of circular section the task of a finding of the optimum structure providing at significant reduction of length one-mode waves in the aperture is solved. At modelling process of excitation of a megaphone the method of display of internal area of a megaphone on the cylinder of individual radius, and also an effective method block matrix trial run is used, allowing to solve a regional task for amplitudes of raised waves in case of an extending wave guide with transition supercritical waves in extending.

Литература

1. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М., 1988.
2. Вайштейн Л.А. Электромагнитные волны. М., 1957.
3. Кураев А.А. Мощные приборы СВЧ. Методы анализа и оптимизации параметров. М., 1986.
4. Гуринович А.Б., Кураев А.А., Сеницын А.К. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2000. Т. 5, № 6. С. 11–16.
5. Ильинский А.С., Слепян Г.Я. Колебания и волны в электродинамических системах с потерями. М., 1983.
6. Батура М.П., Кураев А.А., Сеницын А.К. Материалы 14-Международной конференции КрыМиКо 2004. Севастополь.
7. Бугаев С.П., Канавец В.И., Климов А.Н. и др. Физические процессы в многоволновых черенковских генераторах. Сб. "Релятивистская высокочастотная электроника". Вып. 5. Горький, 1988.