

УДК 621.396.677.73

## КОНИЧЕСКАЯ РУПОРНАЯ АНТЕННА НА МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ЭКРАНЕ С ПОДМАГНИЧЕННЫМ ГИРОМАГНИТНЫМ РЕЗОНАТОРОМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СВЧ-КОНЦЕНТРАТОРА

©2013 А. А. Солдатов<sup>1</sup>, А. М. Плотников<sup>1</sup>, Н. Р. Салимова<sup>1</sup>, Ш. Р. Салимов<sup>2</sup><sup>1</sup> Поволжский государственный университет  
телекоммуникаций и информатики, г. Самара<sup>2</sup> Самарский государственный технический университет

Рассмотрена антенна на основе конического рупора и подмагниченного гиромагнитного резонатора (ГР) на металлическом экране, используемая для измерения электрических характеристик электромагнитного СВЧ-концентратора. За счёт включения ГР исследуемая антенна обладает улучшенными характеристиками в сравнении с аналогичной структурой без ГР: существенно большим коэффициентом усиления при малых массо-габаритных размерах, излучением поля с вращающейся поляризацией при высокой избирательности, электрической коммутацией направления вращения поля и практически безынерционной электрической перестройкой частоты излучения.

*СВЧ-концентратор, конический рупор, гиромагнитный резонатор, коэффициент усиления, коэффициент эллиптичности.*

### Введение

Энергия электромагнитного поля высокой частоты (ВЧ) в изобилии присутствует в окружающем пространстве, однако основная её часть не используется по непосредственному назначению (т.е. для работы самих систем передачи информации), а расходуется вхолостую, рассеиваясь в различных объектах ландшафта.

В работе [1] показано, что такая энергия может быть использована в полезных целях при построении автономных либо квазиавтономных систем вторичного электропитания радиоэлектронной аппаратуры посредством концентрации такой энергии специальной структурой и последующего её эффективного преобразования в постоянный электрический ток.

Однако при проектировании структур-концентраторов, например подобных [1], разработчик может столкнуться с проблемой, связанной со сложностью измерения электрических характеристик таких структур: параметров матрицы рассеяния [S], характеристик направленности и поляризации.

Эти трудности могут быть связаны с конструктивно-геометрическими особен-

ностями СВЧ-концентраторов и высокими требованиями к передающей и приёмной антеннам измерителя: узкой угловой диаграммой направленности (ДН) при малой ширине линейной апертуры (малой геометрической площади раскрытия) антенны. Классические (в понимании теории антенн [2]) апертурные (и в некоторых случаях линейные) излучатели зачастую не способны дать подобную комбинацию характеристик. В этом случае перед разработчиком встаёт задача спроектировать специальную антенную структуру, характеристики излучения которой удовлетворяют предъявляемым требованиям.

### Постановка задачи и предлагаемая модель антенны

Рассмотрим рупорную антенну на основе подмагниченного ГР, размещённую на металлическом экране. Размеры экрана должны быть как минимум в 8 раз больше диаметра раскрытия рупора, чтобы избежать краевых эффектов.

Схема излучателя на экране показана на рис. 1. Расчёт такой антенны нельзя проводить на основе модели кольца электрического тока, так как наведённый на

экране ток будет иметь ту же величину, что и исходный ток, и противоположное ему направление [3, 4].

Примем за модель излучателя вращающийся ток в раскрыве антенны, как показано на рис. 2.

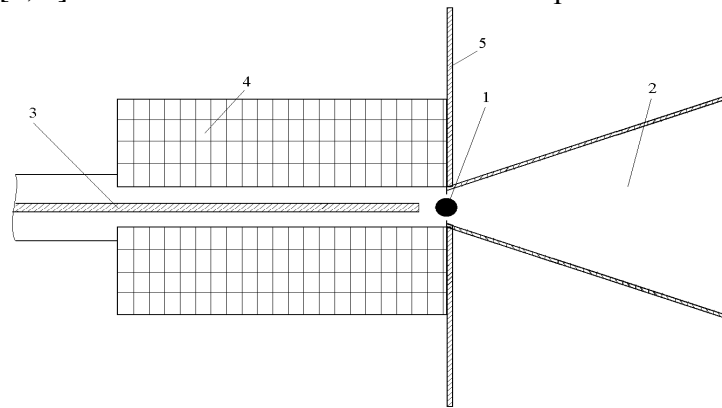


Рис. 1. Коническая антенна на основе ГР с экраном:  
 1 – ЖИГ сферической формы в отверстии; 2 – конический рупор; 3 – фидерная линия;  
 4 – электромагнит; 5 – металлический экран

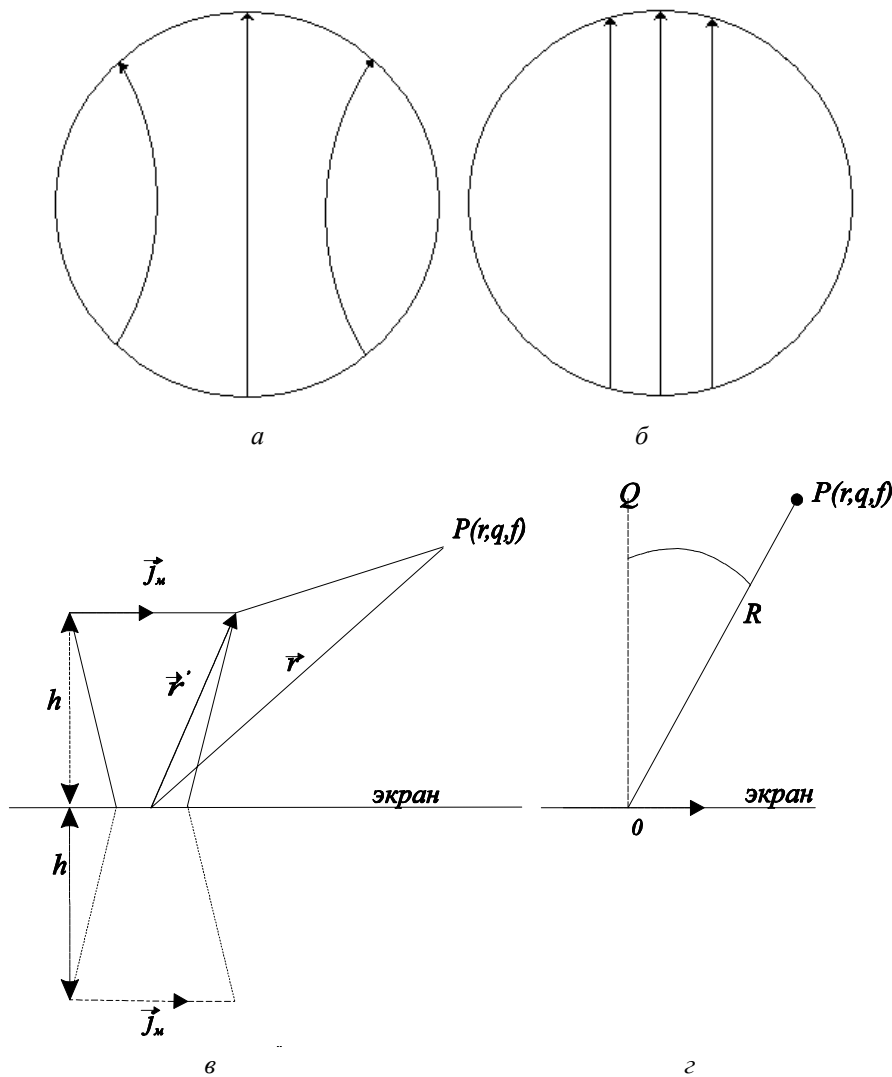


Рис. 2. Модель излучателя с экраном: а и б – вращающиеся токи в раскрыве рупора; в – модель рупорной антенны; г – модель антенны в дальней зоне, Р – точка наблюдения

В дальней зоне антенну можно представить как вращающийся ток с постоянной плотностью  $\mathbf{j}_m$ .

В правовращающейся системе ток можно представить в виде [3,4]

$$\mathbf{j}^m = (x_0 - iy_0) \cdot \mathbf{j}_n^m,$$

где  $\mathbf{j}_n^m$  – плотность магнитного тока.

Исходным уравнением для нахождения векторного магнитного потенциала  $\mathbf{A}^m$  является следующее уравнение:

$$\nabla^2 \mathbf{A}^m(r) + k^2 \mathbf{A}^m(r) = -\mathbf{j}^m,$$

решением которого является выражение [3,4]:

$$\mathbf{A}^m(\mathbf{r}) = \frac{1}{4p} \int_{V_0} \frac{e^{-ik|r-r'|}}{|r-r'|} \mathbf{j}^m(\mathbf{r}') dV, \quad (1)$$

где  $\mathbf{r}$  определяет радиус-вектор точки наблюдения,  $\mathbf{r}'$  – текущая координата интегрирования плоскости вращения тока (точки истока),  $V_0$  – объём, в котором находится  $\mathbf{j}^m$ .

Будем рассматривать дальнюю зону измерения. В этой зоне:

$$|r-r'| = R + p' \cos \Delta j \sin q + z' \cdot \cos q, \\ \Delta j = j - j',$$

где  $R$  – расстояние от начала координат до точки наблюдения.

Тогда (1) запишется в виде:

$$\mathbf{A}^m(\mathbf{r}) = \frac{e^{-ikR}}{4pR} \iint_{p'j'} e^{-ikp' \cos \Delta j \sin q} \mathbf{j}_n^m p' dp' dj' \times \\ \times \frac{1}{h} \int_{z'=-h}^{z'=h} e^{-ikz' \cos q} \cdot dz' \quad (2)$$

или

$$\mathbf{A}^m(\mathbf{r}) = \mathbf{A}_0^m(\mathbf{r}) \cdot f(\mathbf{q}),$$

где

$$\mathbf{A}_0^m(\mathbf{r}) = \frac{e^{-ikR}}{4pR} \iint_{p'j'} e^{-ikp' \cos \Delta j \sin q} \mathbf{j}_n^m p' dp' dj',$$

$f(\mathbf{q})$  – экраный множитель, учитывающий влияние металлического экрана, который находится по формуле:

$$f(\mathbf{q}) = \frac{1}{h} \int_{z'=-h}^{z'=h} e^{-ikz' \cos q} \cdot dz'.$$

Найдём потенциал  $\mathbf{A}_0^m(\mathbf{r})$

$$\mathbf{A}_0^m(\mathbf{r}) = \frac{e^{-ikR}}{4pR} \mathbf{j}_n^m \int_0^a \int_0^{2p} e^{-ikp' \cos \Delta j \sin q} p' dp' dj'. \quad (3)$$

Так как  $\mathbf{j}_n^m$  постоянен, то он вынесен за знак интеграла в (3). Учитывая формулы из [5], возьмём интеграл (3):

$$\int_0^{2p} e^{-ikp' \cos(j-j') \sin q} dj' = 2p J_0(kp' \sin q), \\ \int_0^a J_0(kp' \sin q) p' dp' = a^2 \frac{J_1(ka \sin q)}{ka \sin q}.$$

Введём следующие обозначения:

$$f(\mathbf{q}) = \frac{1}{h} \int_{z'=-h}^{z'=h} e^{ikz' \cos q} dz' = 2 \frac{\sin(kh \cos q)}{kh \cos q}; \\ f_0(\mathbf{q}) = a^2 \frac{J_1(ka \sin q)}{ka \sin q}.$$

В цилиндрической системе координат

$$\mathbf{A}^m = \frac{1}{2R} \left| \mathbf{j}_n^m \right| (r_0 - ij_0) e^{-i(kR+j)} f(\mathbf{q}) f_0(\mathbf{q}).$$

Запишем выражения для составляющих магнитного потенциала в цилиндрической системе координат:

$$A_p^m = \frac{1}{2R} \left| \mathbf{j}_n^m \right| e^{-i(kR+j)} f(\mathbf{q}) f_0(\mathbf{q}), \\ A_j^m = -\frac{i}{2R} \left| \mathbf{j}_n^m \right| e^{-i(kR+j)} f(\mathbf{q}) f_0(\mathbf{q}).$$

Поскольку характеристики антенн, как правило, определяются в сферической системе координат, то запишем в этой системе выражение для вектора потенциала  $\mathbf{A}_1^m$ . При переходе к сферической системе координат от полярной будут справедливы следующие формулы [5]:

$$A_r = A_p \sin q, \quad A_q = A_p \cos q, \quad A_j = A_j.$$

Решение задачи для вектора  $\mathbf{A}^m$  в сферической системе координат запишется в следующем виде:

$$\dot{\mathbf{A}}^M = A_r \dot{\mathbf{r}}_0 + A_q \dot{\mathbf{q}}_0 + A_j \dot{\mathbf{J}}_0,$$

где

$$A_r^i = A_0 \frac{e^{-i(k|\dot{\mathbf{r}}|+j)}}{|\dot{\mathbf{r}}|} \sin q,$$

$$A_q^M = A_p^M \cos q = \frac{1}{2R} \left| \dot{\mathbf{j}}_n^M \right| e^{-i(kR+j)} \cos q \times f(q) f_0(q), \quad (4)$$

$$A_j^M = -\frac{i}{2R} \left| \dot{\mathbf{j}}_n^M \right| e^{-i(kR+j)} f(q) f_0(q).$$

Запишем выражение для составляющих электромагнитного поля  $\dot{\mathbf{E}}$  и  $\dot{\mathbf{H}}$  в сферической системе координат. Для дальней зоны можно пренебречь слагаемыми, пропорциональными  $\frac{1}{r^2}$ ,  $\frac{1}{r^3}$ . В результате получим следующие выражения для составляющих электромагнитного поля:

$$\begin{aligned} E_r = 0, \quad H_r = 0, \quad E_j &= kA_0 \frac{e^{-i(k|\dot{\mathbf{r}}|+j)}}{|\dot{\mathbf{r}}|} \cos q, \\ H_j &= -\frac{ikA_0}{2} \frac{e^{-i(k|\dot{\mathbf{r}}|+j)}}{|\dot{\mathbf{r}}|}, \quad E_q = -kA_0 \frac{e^{-i(k|\dot{\mathbf{r}}|+j)}}{|\dot{\mathbf{r}}|}, \\ H_q &= \frac{ikA_0}{2} \frac{e^{-i(k|\dot{\mathbf{r}}|+j)}}{|\dot{\mathbf{r}}|}. \end{aligned} \quad (5)$$

При нахождении формул (5) использовались известные соотношения:

$$\dot{\mathbf{E}} = -rot \dot{\mathbf{A}}^M, \quad \dot{\mathbf{H}} = \frac{1}{ik} grad \cdot div \dot{\mathbf{A}}^M - ik \dot{\mathbf{A}}^M.$$

Рассмотрим амплитудную характеристику диаграммы направленности в дальней зоне

$$\begin{aligned} |\dot{\mathbf{E}}| &= \sqrt{|E_q|^2 + |E_j|^2} = \frac{kA_0 e^{-i(kR+j)}}{|\dot{\mathbf{r}}|} \times \\ &\times \sqrt{1 + \cos^2 q} \cdot |f(q) f_0(q)|. \end{aligned}$$

Максимальное значение  $|\dot{\mathbf{E}}|$  имеет место при  $q = 0$ :

$$|\dot{\mathbf{E}}|_{\max} = |\dot{\mathbf{E}}|_{q=0} = \frac{kA_0 e^{-i(kR+j)}}{|\dot{\mathbf{r}}|} \sqrt{2}.$$

Амплитудная диаграмма направленности  $F1(q)$  находится по формуле:

$$F1(q) = \frac{|E|}{|E|_{q=0}} = \sqrt{\frac{\cos^2 q + 1}{2}}. \quad (6)$$

К общему решению уравнения для  $\dot{\mathbf{A}}$  прибавляется экранный множитель. Окончательно получаем

$$|F(q, j)| = \frac{|f(q) f_0(q)|}{f_{\max} f_{0\max}} = \sqrt{\frac{\cos^2 q + 1}{2}}, \quad (7)$$

где  $f_{0\max} = \frac{a^2}{2}$ .

### Анализ полученных результатов и выводы

Результаты расчётов приведены на рис. 3–6.

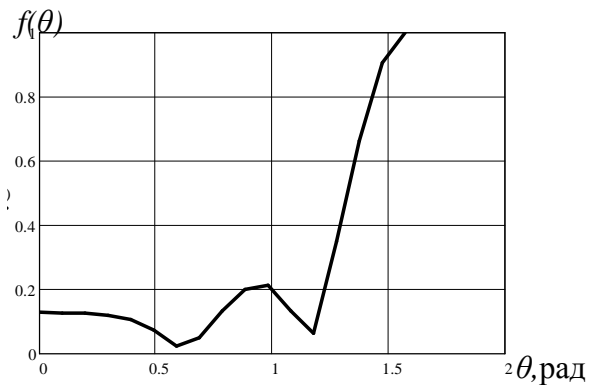


Рис. 3. Зависимость экранного множителя от угла  $\theta$  в декартовой системе координат

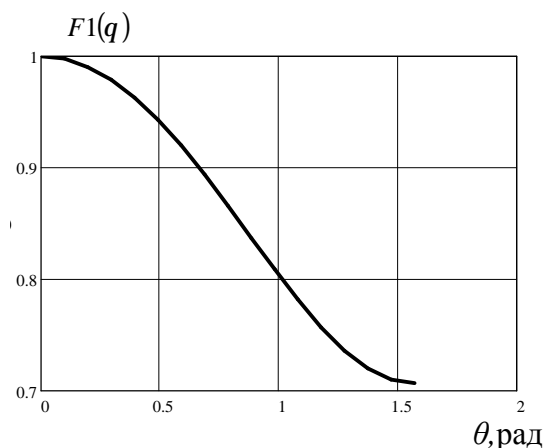


Рис. 4. Зависимость множителя

$F1(q) = \sqrt{\frac{1 + \cos^2 q}{2}}$  от угла  $\theta$  в декартовой системе координат

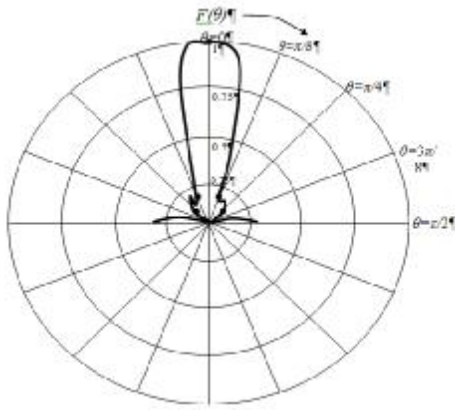
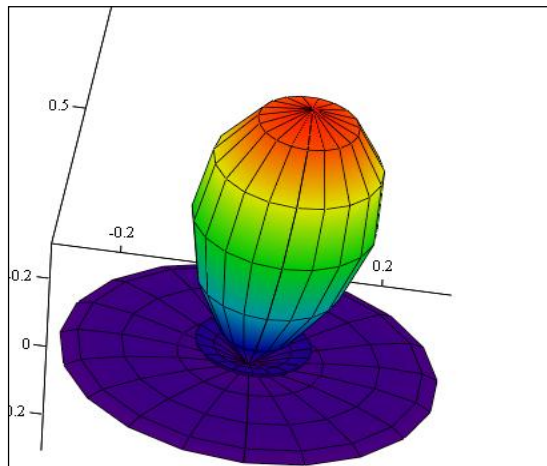


Рис. 5. ДН рупорной антенны на основе подмагниченного ГР с экраном в полярной системе координат



N1

Рис. 6. Трехмерная ДН рупорной антенны на основе подмагниченного ГР с экраном в полярной системе координат

Как видно из рис. 4–6, ДН рупорной антенны на ГР с экраном близка к ДН рупорной антенны [4] и несколько уже, чем ДН рупора с ГР без экрана. В ДН появились боковые лепестки, интенсивность которых максимальна в направлении  $q = \frac{p}{2}$  и меньше трети главного лепестка.

Появление боковых лепестков обусловлено вкладом экранного множителя (рис. 3). Коэффициент эллиптичности – порядка 0,8. Коэффициент усиления существенно больше, чем антенны без экрана [2], и составляет порядка 30.

### Библиографический список

1. Осипов, О.В. Использование эффекта азимутального рассеяния электромагнитных волн метаструктурой на основе элементов Телледжена в прикладных задачах электродинамики [Текст] / О.В. Осипов, А.М. Плотников, Н.Р. Салимова // Инфокоммуникационные технологии. – 2012. – Т.10. – №1. – С. 8-15.

2. Сазонов, Д. М. Антенны и устройства СВЧ [Текст]: учеб. для радиотехнич. спец. вузов / Д.М. Сазонов. – М.: Высшая шк., 1988. – 432 с.

3. А.с. Антенна / А.А. Солдатов (Россия). – №1818647 А1, класс Н 01 Q 1/38, Оpub. 30.05.1993.

4. Солдатов, А.А. Рупорная коническая антенна с подмагниченным гироманнитным резонатором [Текст] / А.А. Солдатов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2006. – Т.4. – №9. – С.70-72.

5. Анго, А. Математика для электро- и радиоинженеров [Текст] / А. Анго; пер. с фран. – М.: Наука, 1967. – 780 с.

## CONICAL HORN ANTENNA ON A METAL SCREEN WITH A BIAS GYROMAGNETIC RESONATOR FOR THE MEASUREMENT OF CHARACTERISTICS OF AN ELECTROMAGNETIC MICROWAVE CONCENTRATOR

2013 © A. A. Soldatov<sup>1</sup>, A. M. Plotnikov<sup>1</sup>, N. R. Salimova<sup>1</sup>, Sh. R. Salimov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Povolzhsky State University of Telecommunications and Informatics

<sup>2</sup>Samara State Technical University

The paper describes an antenna based on a conical horn and magnetized gyromagnetic resonator (GR) on a metal screen which is used to measure electrical characteristics of an electromagnetic microwave concentrator. The antenna under study has improved characteristics as compared with a similar structure without a GR: significantly higher gain at low weight and overall dimensions, circular polarization field radiation with high selectivity, electrical switching of the field rotation direction and virtually inertia-free electrical tuning of radiation frequency.

*Microwave concentrator, conical horn, gyromagnetic resonator, ellipticity ratio.*

### Информация об авторах

**Солдатов Александр Анатольевич**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры основ конструирования и технологий радиотехнических систем, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики. E-mail: [ssolger541952@yandex.ru](mailto:ssolger541952@yandex.ru). Область научных интересов: радиофизика, антенны, устройства СВЧ.

**Плотников Александр Михайлович**, заведующий лабораторией кафедры основ конструирования и технологий радиотехнических систем, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики. E-mail: [pam@psati.ru](mailto:pam@psati.ru). Область научных интересов: радиофизика.

**Салимова Назиля Раисовна**, инженер кафедры основ конструирования и технологий радиотехнических систем, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики. E-mail: [azisa86@mail.ru](mailto:azisa86@mail.ru). Область научных интересов: радиофизика.

**Салимов Шамиль Раисович**, студент, Самарский государственный технический университет. E-mail: [shamil.salimov@mail.ru](mailto:shamil.salimov@mail.ru). Область научных интересов: нелинейный спектральный анализ.

**Soldatov Alexander Anatolievich**, candidate of physics and mathematics, assistant professor, department of design principles and technologies of radio engineering systems, Povolzhsky State University of Telecommunications and Informatics. E-mail: [ssolger541952@yandex.ru](mailto:ssolger541952@yandex.ru). Area of research: radiophysics, aerials, microwave devices.

**Plotnikov Alexander Mikhailovich**, head of laboratory, department of design principles and technologies of radio engineering systems, Povolzhsky State University of Telecommunications and informatics. E-mail: [pam@psati.ru](mailto:pam@psati.ru). Area of research: radio physics.

**Salimova Nazilja Raisovna**, engineer, Povolzhsky State University of Telecommunications and Informatics. Area of research: radio physics. E-mail: [azisa86@mail.ru](mailto:azisa86@mail.ru).

**Salimov Shamil Raisovich**, undergraduate student, Samara State Technical University. Area of research: nonlinear spectral analysis. E-mail: [shamil.salimov@mail.ru](mailto:shamil.salimov@mail.ru).