

Исследование характеристик излучения антенны на основе подмагниченного гиромагнитного резонатора при различных типах излучателей в виде объемных резонаторов разных конструкций

Л.Д. Ложкин, А.А. Солдатов, А.А. Вороной, С.Ю. Ситников

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, Российская Федерация, г. Самара
ул. Л. Толстого, 23

В предлагаемой работе рассматриваются антенны на основе подмагниченного гиромагнитного резонатора с различными типами объемных резонаторов. Подмагниченный гиромагнитный резонатор возбуждается через фидерную линию СВЧ-полем, он в свою очередь возбуждает объемный резонатор ОР или рупорную антенну, которые излучают в пространство электромагнитное поле вращающейся поляризации. Такие излучатели обладают рядом уникальных свойств, которые обеспечиваются подмагниченным гиромагнитным резонатором: излучение поля круговой поляризации; электрическая коммутация направления вращения, высокая частотная избирательность и магнитная перестройка центральной частоты излучения. Изменение направления вращения векторов поля происходит за счет переключения тока в электромагните. Смещение центральной частоты излучения можно произвести путем изменения тока в подмагничивающей катушке с проводом. В осевом направлении коэффициент эллиптичности поля излучения близок к единице. В работе экспериментально исследуются пять типов объемных резонаторов и рупорный излучатель. Проводится сравнение характеристик излучения исследуемых резонаторов.

Ключевые слова: гиромагнитный резонатор, открытый объемный резонатор, конический рупор, поляризационная характеристика, коэффициент эллиптичности, кольцо магнитного тока.

Введение

Для создания отдельных излучателей или решеток с различными характеристиками, требуется менять конструкцию излучателя. Для различных задач требуются, например, больший коэффициент усиления, больший коэффициент эллиптичности или меньшие размеры ОР для создания антенных решеток, например.

Классические (в понимании теории антенн [5]) апертурные (и в некоторых случаях линейные) излучатели зачастую не способны дать нужную комбинацию характеристик, и в этом случае перед разработчиком встает задача спроектировать специальную антенную структуру, характеристики излучения которой удовлетворяют предъявляемым требованиям.

Для решения этих задач экспериментально исследуются несколько типов ОР, показанных на рис. 7. Для этого рассмотрим два метода расчета диаграммы направленности излучателей на основе ГР.

1. Модель кольца магнитного тока.

Как уже сказано выше, на основе подмагниченного гиромагнитного резонатора (ГР) воз-

можно создание управляемых частотно-независимых СВЧ-антенн [1]. Несмотря на то что ГР в таких антеннах является промежуточным звеном между возбуждающим СВЧ-полем и открытым резонатором (ОР), основные свойства таких излучателей определяются подмагниченным ГР, а именно: создание вращающегося поля с эллиптической (а в осевом направлении с круговой) поляризацией; электрическая коммутация направления вращения поля; высокая частотная избирательность; магнитная перестройка частоты поля излучения. Наиболее компактная конструкция излучателя на основе ГР показана на рис. 1.

Принцип действия излучателей на основе подмагниченного ГР основан на следующих физических процессах: возбуждением полем фидерной линии процессии намагниченности сферического ГР; возбуждением в открытом резонаторе колебания квази E_{110} -типа с вращающейся поляризацией через боковую поверхность ОР; излучение ОР во внешнее пространство электромагнитного поля с вращающейся поляризацией через боковую поверхность ОР.

Математическую модель расчета поля излучения в дальней зоне излучателей с ОР на

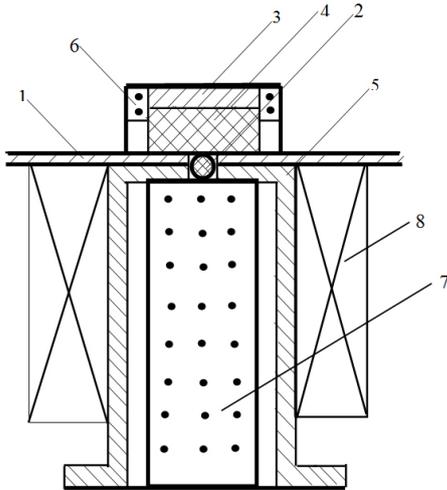


Рис. 1. Антенна на основе подмагниченного ГР: 1 – экран; 2 – ГР; 3 – стальной диск; 4 – плоский диэлектрический цилиндрический резонатор; 6 – магнитопровод; 7 – вкладыш из магнитодиэлектрика; 8 – подмагничивающая катушка с проводом

рис. 7, а, б, г можно представить в виде кольца магнитного тока по боковой кромке ОР с плотностью:

$$\vec{\eta}^M = h^{-1} I^M(\varphi) \delta(\rho - a) \delta(z - 0) \vec{\varphi}_0,$$

где

$$I^M(\varphi) = 2hE_0^w \Phi(\varphi) = I_0^M \Phi(\varphi).$$

Исходным уравнением для нахождения поля излучения является уравнение Гельмгольца для магнитного потенциала:

$$\nabla^2 \vec{A}^M + k^2 \vec{A}^M = -\vec{\eta}^M,$$

решением которого будет следующее выражение:

$$\vec{A}^M(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_{V_0} \frac{e^{-ikR(\vec{r}, \vec{r}')}}{R(\vec{r}, \vec{r}')} \vec{\eta}^M(\vec{r}') dV, \tag{1}$$

выражения для составляющих электрического поля, найденные по формуле (1) [1; 2], записываются в виде:

$$\begin{aligned} E_\theta &= -i \frac{kaI_0^M}{|\vec{r}|} J_1'(w) e^{-i(k|\vec{r}|+\varphi)}, \\ E_\varphi &= -\frac{kaI_0^M}{|\vec{r}|} \frac{J_1(w)}{w} e^{-i(k|\vec{r}|+\varphi)} \cos \theta, \end{aligned} \tag{2}$$

откуда амплитудную характеристику диаграммы направленности можно представить следующей формулой:

$$\begin{aligned} |\vec{F}(\theta, \varphi)| &= \frac{|\vec{E}|}{|\vec{E}|_{\theta=0}} = \\ &= \sqrt{2 \left\{ [J_1'(w)]^2 + \left[\frac{J_1(w)}{w} \right]^2 \cos^2 \theta \right\}}. \end{aligned} \tag{3}$$

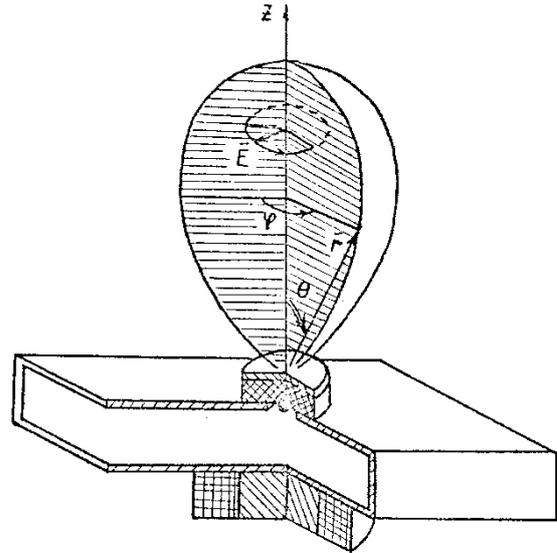


Рис. 2. Объемный вид амплитудной характеристики направленности

В формуле (3) введены следующие обозначения: $|E| = \sqrt{E_\theta^2 + E_\varphi^2}$, $F(\theta, \varphi)$ – амплитудная диаграмма направленности; $w = ka \sin \theta$; $J_1(w)$ – функция Бесселя первого рода, первого порядка.

Диаграмма направленности антенны, рассчитанная по формуле (3), в пространстве имеет вид, показанный на рис. 2.

Предлагаемая антенна представляет большой интерес с точки зрения поляризационных характеристик, которые описываются нормированным вектором поляризации или векторной поляризационной характеристикой $\vec{h}(\theta, \varphi)$:

$$\vec{h}(\theta, \varphi) = \vec{\theta}_0 h_\theta + \vec{\varphi}_0 h_\varphi,$$

где h_θ и h_φ – поперечные составляющие вектора поляризации $\vec{h}(\theta, \varphi)$ в дальней зоне. Эллипс поляризации, измеренный в дальней зоне, на конструкции антенны, изображенной на рис. 1, показан на рис. 3.

Составляющие вектора поляризации находятся по следующим формулам:

$$h_\theta = \frac{\chi}{\sqrt{|\chi|^2 + 1}}, \quad h_\varphi = \frac{\chi}{\sqrt{|\chi|^2 + 1}}.$$

Здесь введен коэффициент эллиптичности

$$\chi = \chi + i\chi'' = \frac{E_\varphi}{E_\theta},$$

подставляя значения составляющих электрического поля по формулам (2), получим

$$\chi = i \frac{wJ_1'(w) \cos \theta}{J_1(w)}.$$

Зависимость модуля коэффициента эллиптичности от угла наблюдения θ в радианах представлена на рис. 4. Видно, что коэффициент эл-

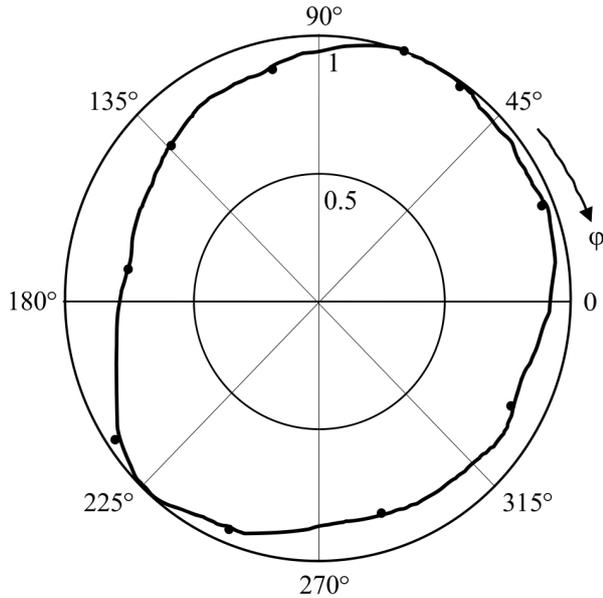


Рис. 3. Экспериментальная поляризационная характеристика антенны на основе ГР

липтичности достигает максимального значения в осевом направлении. Экспериментально показано, что коэффициент усиления максимален тоже в осевом направлении ($\theta = 0$).

На рис. 5 видно, как меняется коэффициент эллиптичности в пространстве от точки приема сигнала.

2. Модель антенны как излучение вращающегося магнитного тока

Для излучателей типа *в*, *г*, *е* на рис. 7 примем за модель излучателя вращающийся ток в раскрыве антенны, как показано на рис. 6.

В дальней зоне антенну можно представить как вращающийся ток с постоянной плотностью j_m . В правовращающейся системе ток можно представить в виде [1; 2]

$$\vec{j}^m = (\vec{x}_0 - i\vec{y}_0) \cdot j_n^m,$$

где j_n^m – плотность магнитного тока.

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

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

решение, которого определяется выражением [1; 2]

$$\vec{A}^m(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_{V_0} \frac{e^{-ik|r-r'|}}{|r-r'|} \vec{j}^m(\vec{r}') dV, \tag{3}$$

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

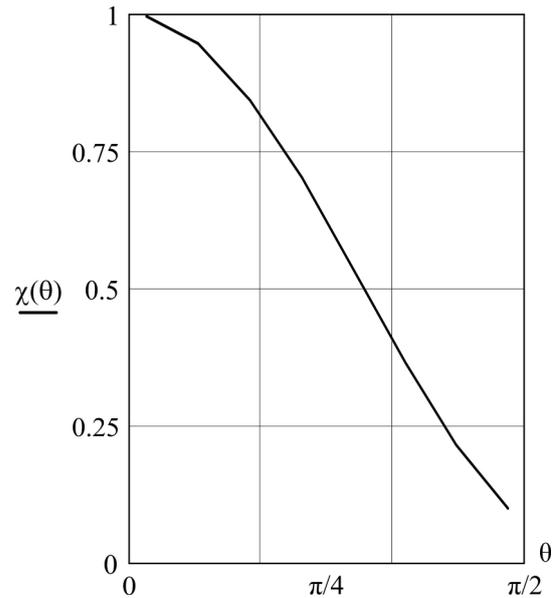


Рис. 4. Зависимость модуля коэффициента χ от угла наблюдения θ

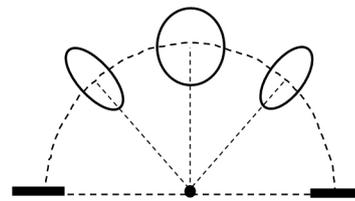


Рис. 5. Изменения эллипса излучения от угла наблюдения

Будем рассматривать дальнюю зону измерения, в этой зоне:

$$|r - r'| = R + \rho' \cos \Delta\varphi \sin \theta + z' \cos \theta,$$

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi',$$

где R – расстояние от начала координат до точки наблюдения.

Тогда формула (3) запишется в виде

$$\vec{A}^m(\vec{r}) = \frac{e^{-ikR}}{4\pi R} \iint_{\rho' \varphi'} e^{-ik\rho' \cos \Delta\varphi \sin \theta} \vec{j}^m \rho' d\rho' d\varphi' \times \\ \times \frac{1}{h} \int_{z'=-h}^{z'=h} e^{-ikz' \cos \theta} dz',$$

или

$$\vec{A}^m(\vec{r}) = \vec{A}_0^m(\vec{r}) \cdot f(\theta),$$

где

$$\vec{A}_0^m(\vec{r}) = \frac{e^{-ikR}}{4\pi R} \iint_{\rho' \varphi'} e^{-ik\rho' \cos \Delta\varphi \sin \theta} \vec{j}^m \rho' d\rho' d\varphi',$$

$f(\theta)$ – экраный множитель, учитывающий влияние металлического экрана, который находится по формуле

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

Найдем потенциал $\bar{A}_0^M(\vec{r})$:

$$\bar{A}_0^M(\vec{r}) = \frac{e^{-ikR}}{4\pi R} \bar{j}^M \int_0^a \int_0^{2\pi} e^{-ik\rho' \cos \Delta\varphi \sin \theta} \rho' d\rho' d\varphi'. \quad (4)$$

Так как \bar{j}^M постоянно, мы его вынесли за знак интеграла (4). Учитывая формулы [3], возьмем интеграл (4)

$$\int_0^{2\pi} e^{-ik\rho' \cos(\varphi-\varphi') \sin \theta} d\varphi' = 2\pi J_0(k\rho' \sin \theta),$$

$$\int_0^a J_0(k\rho' \sin \theta) \rho' d\rho' = a^2 \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta}.$$

Введем обозначения экранного множителя:

$$f(\theta) = \frac{1}{h} \int_{z'=-h}^{z'=h} e^{ikz' \cos \theta} dz' = 2 \frac{\sin(kh \cos \theta)}{kh \cos \theta},$$

$$f_0(\theta) = a^2 \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta}.$$

В цилиндрической системе координат

$$\bar{A}^M = \frac{1}{2R} |\bar{j}_n^M| (\bar{r}_0 - i\bar{\varphi}_0) e^{-i(kR+\varphi)} f(\theta) f_0(\theta).$$

Нетрудно записать выражения для составляющих магнитного потенциала в цилиндрической системе координат:

$$A_\rho^M = \frac{1}{2R} |\bar{j}_n^M| e^{-i(kR+\varphi)} f(\theta) f_0(\theta),$$

$$A_\varphi^M = -\frac{i}{2R} |\bar{j}_n^M| e^{-i(kR+\varphi)} f(\theta) f_0(\theta).$$

Поскольку характеристики антенн, как правило, определяются в сферической системе координат, то запишем в этой системе выражение для вектора потенциала \bar{A}_1^M . При переходе к сферической системе координат от полярной будут справедливы следующие формулы [3]:

$$A_r = A_\rho \sin \theta, \quad A_\theta = A_\rho \cos \theta, \quad A_\varphi = A_\varphi.$$

И решение нашей задачи для вектора \bar{A}^M в сферической системе координат запишется в следующем виде:

$$\bar{A}^M = A_r \bar{r}_0 + A_\theta \bar{\theta}_0 + A_\varphi \bar{\varphi}_0,$$

где

$$A_r^M = A_0 \frac{e^{-i(k|\vec{r}|+\varphi)}}{|\vec{r}|} \sin \theta,$$

$$A_\theta^M = A_\rho^M \cos \theta =$$

$$= \frac{1}{2R} |\bar{j}_n^M| e^{-i(kR+\varphi)} \cos \theta f(\theta) f_0(\theta),$$

$$A_\varphi^M = -\frac{i}{2R} |\bar{j}_n^M| e^{-i(kR+\varphi)} f(\theta) f_0(\theta).$$

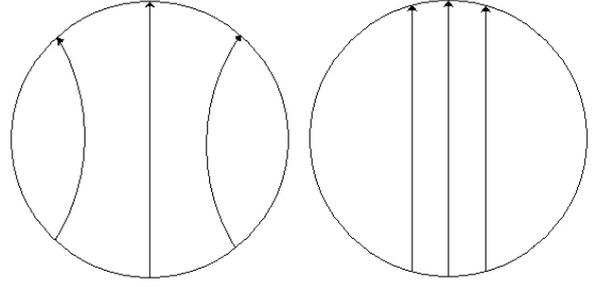


Рис. 6. Вращающиеся токи в раскрые излучателя

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

$$E_r = 0, \quad H_r = 0,$$

$$E_\phi = kA_0 \frac{e^{-i(k|\vec{r}|+\varphi)}}{|\vec{r}|} \cos \theta,$$

$$H_\phi = -\frac{ikA_0}{2} \frac{e^{-i(k|\vec{r}|+\varphi)}}{|\vec{r}|},$$

$$E_\theta = -kA_0 \frac{e^{-i(k|\vec{r}|+\varphi)}}{|\vec{r}|},$$

$$H_\theta = \frac{ikA_0}{2} \frac{e^{-i(k|\vec{r}|+\varphi)}}{|\vec{r}|}.$$

При нахождении этих формул использовались известные соотношения:

$$\vec{E} = -\text{rot } \bar{A}^M, \quad \vec{H} = \frac{1}{ik} \text{grad div } \bar{A}^M - ik\bar{A}^M.$$

Рассмотрим амплитудную характеристику диаграммы направленности в дальней зоне:

$$|\vec{E}| = \sqrt{|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2} =$$

$$= \frac{kA_0 e^{-i(kR+\varphi)}}{|\vec{r}|} \sqrt{1 + \cos^2 \theta} |f(\theta) f_0(\theta)|.$$

Максимальное значение $|\vec{E}|$ имеет место при $\theta = 0$:

$$|\vec{E}|_{\max} = |\vec{E}|_{\theta=0} = \frac{kA_0 e^{-i(kR+\varphi)}}{R} \sqrt{2}.$$

Амплитудная диаграмма направленности $F1(\theta)$ находится по простой формуле:

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

И тогда к общему решению уравнения для \bar{A} прибавляется экранный множитель, и окончательно получаем

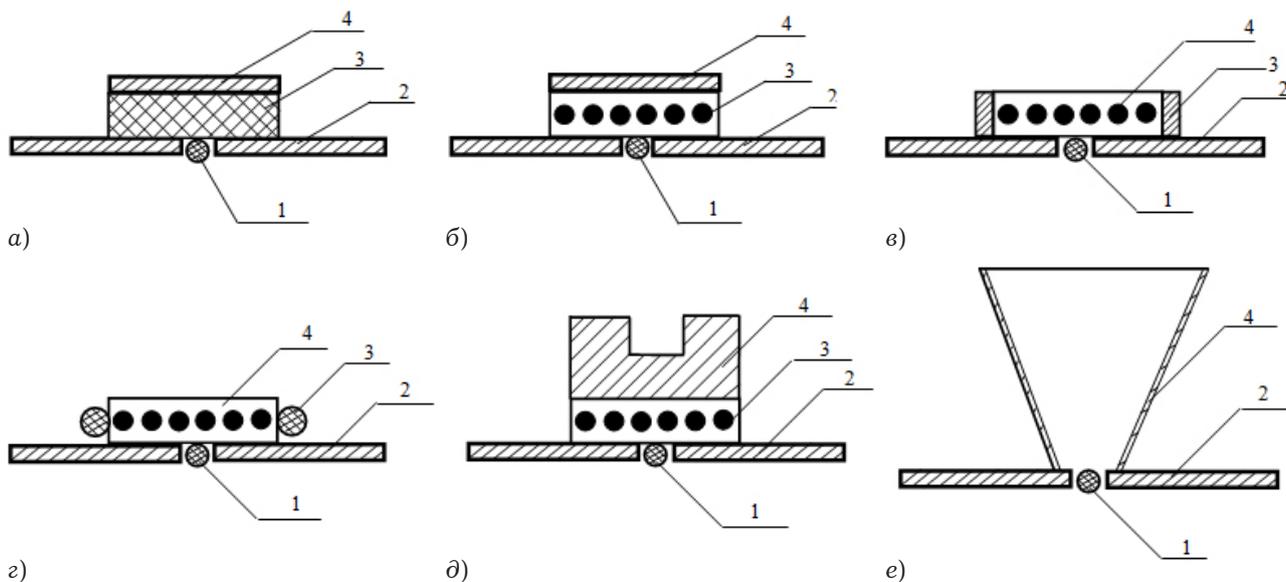


Рис. 7. Различные типы объемных резонаторов: а, б, д) расчет на основе кольца магнитного тока; в, г, е) расчет на основе вращающегося тока: 1 – ферритовый ГР; 2 – металлический экран; 3 – диэлектрический или ферритовый диск (а, б, д); плоское и круглое металлическое кольцо (в, г); 4 – излучатель. а) стальной диск на цилиндрическом диэлектрическом основании; б) стальной диск на цилиндрическом ферритовом основании; в) стальное плоское кольцо на цилиндрическом ферритовом основании; г) стальное круглое кольцо на цилиндрическом ферритовом основании; д) стальной излучатель типа «стакан» на цилиндрическом диэлектрическом основании; е) излучатель в виде конического рупора

$$|F(\theta, \varphi)| = \frac{|f(\theta)f_0(\theta)|}{f_{\max}f_{0\max}} \sqrt{\frac{1 + \cos^2 \theta}{2}}, \quad (5)$$

где

$$f_{0\max} = \frac{a^2}{2}.$$

3. Экспериментальное измерение различных типов ОР на основе излучателя на подмагниченном ГР

На рис. 7 показаны различные типы ОР, характеристики которых измерялись на установке, схема которой показана на рис. 8.

Экспериментальные измерения излучателя на основе ферритового подмагниченного ГР с различными типами ОР (рис. 7), проведенные по схеме рис. 8, дали следующие результаты: коэффициент усиления: а, б) 1,5; в, г) 1,7; д) 2,5; е) 5; коэффициент эллиптичности: а, б) 0,8–0,9; в, г) 0,85–0,95; д, е) 0,7–0,8; полоса магнитной перестройки: а) 250–270 МГц; б, в, г, д) 250–400 МГц; е) 2 ГГц; коэффициент полезного действия всех излучателей – порядка 0,55–0,65.

Таким образом, исходя из поставленных задач, можно выбрать антенну с тем или иным ОР. Так, например, излучатель с коническим рупором имеет наибольший коэффициент усиления и наибольшую полосу магнитной перестройки. Типы ОР а, б, в, г удобно использовать в антенных решетках.

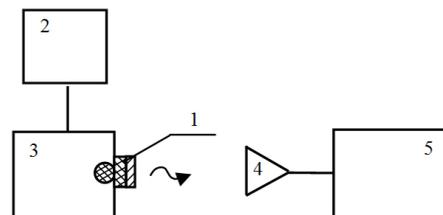


Рис. 8. Схема измерения характеристик излучателя с различными ОР: 1 – исследуемый ОР с ГР; 2 – короткозамкнутый прямоугольный волновод с ГР; 3 – генератор СВЧ; 4 – приемная рупорная антенна; 5 – измерительный усилитель У2-8

Список литературы

1. Солдатов А.А. Антенна // А.С. РФ, № 1818647 А1, класс Н01 Q 1/38. Оpub. 30.05.1993.
2. Солдатов А.А. Рупорная коническая антенна с подмагниченным гиромагнитным резонатором // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2006. Т. 4. № 9. С. 70–72.
3. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров; пер. с франц. М.: Наука, 1967. 780 с.
4. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ: учеб. для радиотехнич. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1988. 432 с.

References

1. Soldatov A.A. Antenna [Antenna]. A.S. RF, № 1818647 A1, class H01 Q 1/38. Opub. 30.05.1993 [in Russian].
2. Soldatov A.A. Rupornaja konicheseskaja antenna s podmagnichennym giromagnitnym rezonatorom [Horn conical antenna with magnetised gyromagnetic resonator]. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy* [Wave process physics and radio systems], 2006, no. 9, pp. 70–72 [in Russian].

3. Ango A. Matematika dlja elektro- i radioinzhenerov; per. s franc. [Mathematics for electrical and radio engineers; trans. from French]. M.: Nauka, 1967, 780 p. [in Russian].
4. Sazonov D.M. Antenny i ustrojstva SVCh: ucheb. dlja radiotekhnich. spets. vuzov [Antennas and microwave devices]. M.: Vysshaja shkola, 1988, 432 p. [in Russian].

Investigation of the radiation characteristics of the antenna based on a magnetized gyromagnetic resonator with different types of emitters in the form of three-dimensional resonators of different designs

L.D. Lozhkin, A.A. Soldatov, A.A. Voronoy, S.Yu. Sitnikov

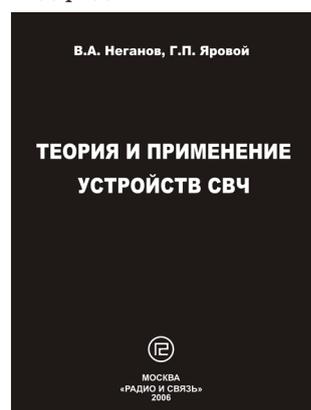
Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
23, L. Tolstoy Street
Samara, 443010, Russian Federation

In this paper we consider the antenna based on the magnetic gyromagnetic resonator with different types of bulk resonators. The magnetized gyromagnetic resonator is excited through the feeder line by the microwave field and then, in turn, excites the volumetric resonator or the reactor antenna, which radiate an electromagnetic field of rotating polarization into space. Such emitters have a number of unique properties that are provided by the magnetic gyromagnetic resonator: radiation of the circular polarization field; electrical switching of the direction of rotation, high frequency selection and magnetic tuning of the central frequency of radiation. Changing the direction of rotation of the field vector occurs by switching the current in the electromagnet. The shift of the central frequency of radiation can be made by changing the current in the field coil with a wire. In the axial direction, the ellipticity coefficient of the radiation field is close to one. Five types of volumetric resonators and a horn radiator are experimentally investigated. The characteristics of the radiation of the investigated resonators are compared.

Keywords: gyromagnetic resonator, open volume resonator, conical horn, polarization characteristic, coefficient of ellipticity, ring of magnetic current.

Неганов, В.А.

Теория и применение устройств СВЧ: учебн. пособие для вузов / В.А. Неганов, Г.П. Яровой;
под ред. В.А. Неганова. – М.: Радио и связь, 2006. – 720 с.



ISBN 5-256-01812-4

УДК 621.396.67

ББК 32.840

Н 41

В учебном пособии рассматриваются методы проектирования и конструктивной реализации устройств СВЧ: линий передачи различных видов, резонаторов, согласующих и трансформирующих устройств, фильтров, фазовращателей, аттенуаторов, тройниковых соединений, направленных ответвителей, различных мостовых соединений, ферритовых устройств (вентилей, циркуляторов, фазовращателей) и СВЧ-устройств на полупроводниковых диодах (умножителей, смесителей, переключателей, выключателей). Приводятся примеры применения устройств СВЧ в радиосвязи, радиолокации, измерительной аппаратуре и т. д. В книгу вошел оригинальный материал, полученный авторами. Учебное пособие может использоваться как справочник по устройствам СВЧ.

Для специалистов в области теории и техники СВЧ, преподавателей вузов, докторантов, аспирантов, студентов старших курсов радиотехнического и радиофизического профиля.