

УДК 621.396.67 (621.37)

DOI: 10.17277/voprosy.2015.04.pp.107-113

СИНТЕЗ ГИБРИДНОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ ДЛЯ СИСТЕМ НАЗЕМНОЙ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

**А. А. Летунов, О. А. Белоусов, Р. Ю. Колмыков,
А. С. Колмыкова, Р. Ю. Курнос**

*ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический
университет», г. Тамбов*

Рецензент д-р техн. наук, профессор А. В. Иванов

Ключевые слова: антенная решетка; гибридная антенна; зеркальная антенна; коэффициент направленного действия; компьютерная модель излучателя; коэффициент стоячей волны; коэффициент усиления; рупорный облучатель; системы наземной спутниковой связи.

Аннотация: Рассмотрены вопросы построения гибридной зеркальной антенны на основе облучателя в виде линейной синфазной эквидистантной антенной решетки для систем наземной спутниковой связи. Отражены важные аспекты синтеза гибридных зеркальных антенн для систем наземной спутниковой связи, разработана компьютерная модель антенной системы, позволяющая существенно расширить полосу пропускания канала связи, с возможностью балансировки трафиком в зависимости от нагрузки канала связи и формирования многолучевых диаграмм направленности.

Современное развитие телекоммуникационных технологий в настоящее время, в частности развитие систем спутниковой связи на основе технологии малой спутниковой земной станции (Very Small Aperture Terminal VSAT), предполагает использование энергоэффективных оконечных терминалов и базовых станций. Для реализации такого типа станции особое внимание уделяется антенным системам. Системы спутниковой связи, как

Летунов Андрей Александрович – магистрант; Белоусов Олег Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», e-mail: jfour314@gmail.com; Колмыков Роман Юрьевич – магистрант; Колмыкова Анастасия Сергеевна – магистрант; Курнос Роман Юрьевич – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; ТамбГТУ, г. Тамбов.

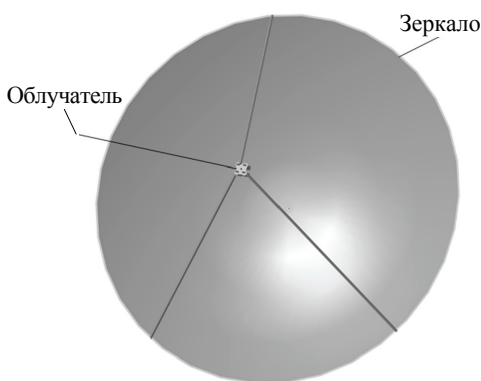


Рис. 1. Гибридная зеркальная антенна

правило, проектируются для применения традиционных антенных систем этого диапазона, а именно – параболических зеркальных антенн с рупорным облучателем. Для решения поставленной задачи в полном объеме необходимо иметь: широкую полосу пропускания, возможность балансировки трафика в зависимости от загрузки канала связи, формирование многолучевых диаграмм. Поэтому для решения вышеизложенных требований для данного типа частотного диапазона

могут быть использованы гибридные зеркальные антенны [1, 2]. Таким образом, цель данной работы заключается в непосредственном синтезе облучателя и гибридной зеркальной антенны (ГЗА) для систем наземной спутниковой связи.

Научная новизна состоит в разработке математических моделей облучателя и ГЗА, которые могут быть пригодны не только для данного диапазона частот, но и других диапазонов спутниковой связи.

Гибридная зеркальная антенна состоит из облучателя (рис. 1), представляющего собой активную адаптивную антенную решетку (АР) или плоскую фазированную антенную решетку и самого зеркала.

В качестве облучателей зеркальных антенн широкое распространение получили различные виды решеток на базе рупорных антенн. Одним из вариантов для построения облучающей антенной решетки может являться применение элемента облучателя в виде пирамидального рупора [1, 3], диаграмма направленности которого имеет вид:

– в плоскости H

$$F_{1,H} = F_{э,г} \frac{\cos u}{1 - \left(\frac{2u}{\pi}\right)^2}, \quad (1)$$

где $u = \frac{ka}{2} \sin \theta$; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число;

– в плоскости E

$$F_{1,E} = F_{э,г} \frac{\sin u}{u}, \quad (2)$$

где $u = \frac{kb}{2} \sin \theta$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Ширина главного лепестка диаграммы рассчитывается по уровню половины мощности

$$2\Delta\theta_{0,5} = \frac{80\lambda}{a_p} = 7,04^\circ. \quad (3)$$

Ширина главного лепестка диаграммы по нулевому уровню определяется в MathCad

$$2\Delta\theta_{10} = 16,949^\circ.$$

Компьютерная модель рупорного излучателя представлена на рис. 2.

Исследования антенны проведены в полосе частот от 10 до 14 ГГц. Результаты моделирования представлены на рис. 3, 4.

Получены значения коэффициента стоячей волны (**КСВ**) антенны во всей полосе частот (10...14 ГГц). Уровень КСВ не превышает значения 2, что является приемлемым значением степени согласования фидера и антенны. Анализ данных (см. рис. 2–4), полученных в ходе математического расчета и моделирования, позволяет судить о достаточном коэффициенте усиления (**КУ**) излучателя и незначительном уровне боковых лепестков, что дает возможность применять данный излучатель АР в составе линейной синфазной эквидистантной антенной решетке, которая в последствии будет непосредственным облучателем гибридной зеркальной антенны.

На основе представленного излучателя синтезируем синфазную, эквидистантную плоскую решетку.

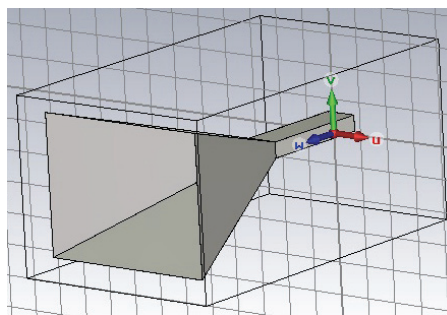


Рис. 2. Модель рупорного излучателя

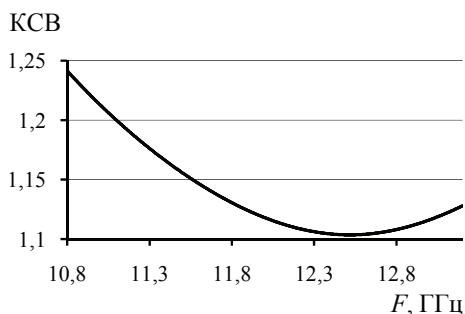


Рис. 3. График КСВ антенны

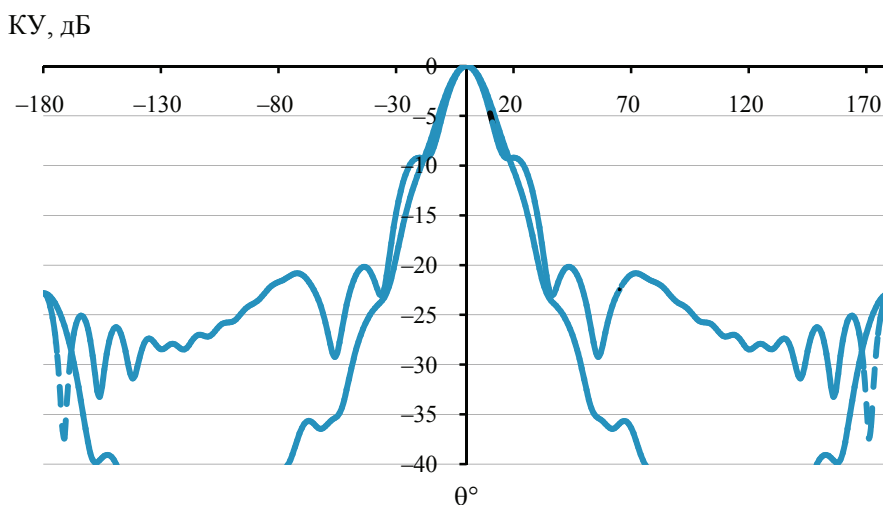


Рис. 4. График коэффициента усиления антенны

Для решетки, состоящей из одинаковых излучателей, диаграмма направленности имеет вид [1]

$$F(\theta, \varphi) = f(\theta, \varphi) f_{\varepsilon}(\theta, \varphi), \quad (4)$$

где $f(\theta, \varphi)$ – диаграмма направленности изолированного излучателя; $f_{\varepsilon}(\theta, \varphi)$ – множитель АР, определяемый по формуле

$$f_{\varepsilon}(\theta, \varphi) = \sum_{m,n=1}^{M,N} A_{mn} \exp \left[i \left(\Phi_{mn} + \Phi_{mn}^{\Pi} \right) \right], \quad (5)$$

где A_{mn} – амплитуда возбуждения элемента решетки; $\Phi_{mn}^{\Pi} = k(x_{mn} \cos \varphi + y_{mn} \sin \varphi) \sin \theta$ – пространственный фазовый сдвиг для направления наблюдения (θ, φ) .

Для построения математической модели АР (рис. 5) используем данные полученные при моделировании одного рупора. Используя вышеприведенные формулы, получим диаграмму направленности (ДН) всей антенной решеткой (рис. 6).

Диаграмма направленности решетки записывается по формулам:

$$\begin{aligned} F_E &= F_{1E} F_{NE}; \\ F_H &= F_{1H} F_{NH}, \end{aligned} \quad (6)$$

где F_{1E} и F_{1H} – диаграммы направленности одиночного излучателя; F_{NE} и F_{NH} – множители системы в плоскостях E и H соответственно.

Множитель АР для обеих плоскостей может быть записан в виде

$$F_N(\theta) = \frac{\sin \left(\frac{n_1}{2} kd \sin(\theta) \right)}{n \sin \left(\frac{1}{2} kd \sin(\theta) \right)}.$$

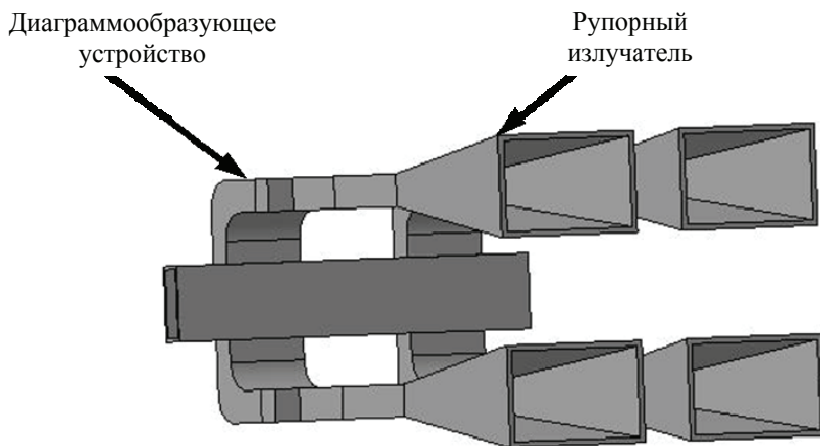


Рис. 5. Внешний вид облучателя антенной решетки для ГЗА

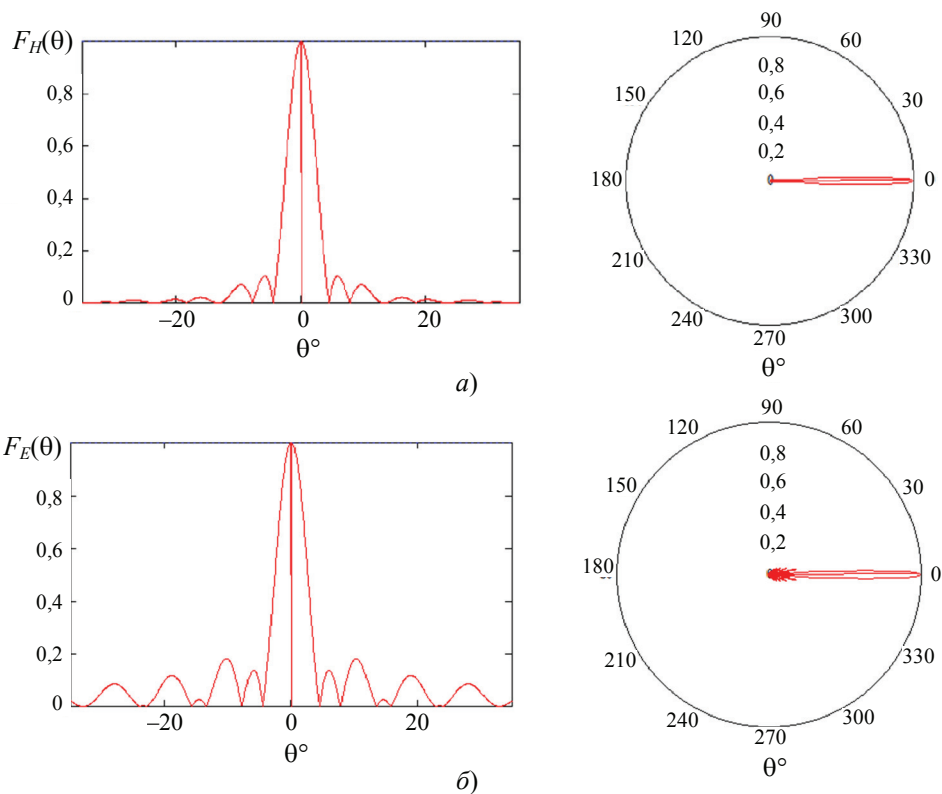


Рис. 6. Диаграмма направленности антенной решетки на частоте 12 ГГц в плоскостях H (а) и E (б)

Анализируя полученные диаграммы направленности АР, можно судить, что данная решетка может использоваться в качестве облучателя ГЗА. Используя выражения, представленные выше, построим диаграмму направленности гибридной зеркальной антенны (см. рис. 1) апертурным методом [1, 2], в качестве облучателя используем синфазную, линейную, эквидистантную АР из рупорных облучателей, входящую в состав ГЗА и представленную на рис. 5.

Из теории антенных систем, расчет ДН гибридной антенны можно провести по общей формуле для прямолинейной дискретной эквидистантной синфазной АР с известным амплитудным распределением. При этом вид и параметры ДН определяются размерами зеркала и видом амплитудного распределения в нем [1, 4, 5].

Нормированная ДН зеркальной антенны определяется на основании теоремы перемножения диаграмм направленности [1, 4]:

$$F(\theta) = F_0(\theta)F_c(\theta), \quad (7)$$

где $F_0(\theta)$ – диаграмма направленности одиночного элемента Гюйенса,

$$F_0(\theta) = \frac{1 + \cos \theta}{2}; \quad (8)$$

$F_c(\theta)$ – множитель АР.

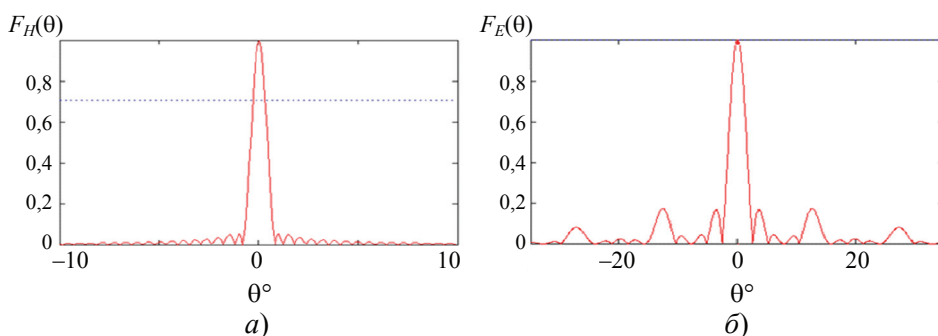


Рис. 7. Диаграмма направленности в линейном масштабе:
a – горизонтальная плоскость; *б* – вертикальная плоскость

Множитель системы должен рассчитываться по общему выражению с учетом амплитуды поля в каждой расчетной точке и ее координаты. Данное выражение известно из теории АР и имеет вид

$$f_c(\theta) = \left| \sum_{n=1}^N E_n \exp[jkx_n \cos \Phi] \right|, \quad (9)$$

где E_n – амплитуда поля; Φ – угол раскрытия между фокальной осью и главным лепестком, град.; x_n – реальная координата по раскрытию n -й расчетной точки, которую можно определить по формуле

$$x'_n = d \left(n - \frac{2\Phi_0 + 1}{2} \right). \quad (10)$$

Подбирая в последнем выражении расстояние между соседними расчетными точками d , необходимо добиться, чтобы первая расчетная точка ($n = 0$) находилась на левом краю зеркала (при этом ее реальная координата по раскрытию $x'_0 = -R_0$, а последняя расчетная точка ($N = 2\Phi_0$) находилась бы на правом краю зеркала (при этом ее реальная координата по раскрытию $x'_N = R_0$).

Рассчитав множитель системы, необходимо произвести нормировку результата и вычислить ДН антенны с помощью теоремы перемножения ДН. После расчета ДН строится ее график, по которому определяются параметры ДН (ширина и уровень боковых лепестков). Нормированная ДН ГЗА в линейном масштабе в горизонтальной и вертикальной плоскостях представлена на рис. 7. Результаты синтеза говорят о хороших направленных свойствах ГЗА, малом уровне боковых лепестков. Построенная ГЗА имеет максимальное усиление порядка 65 дБ на частоте 12 ГГц.

Таким образом, применение ГЗА для системы наземной спутниковой связи позволит существенно расширить пропускной канал связи с возможностью балансировки трафика в зависимости от пропускной способности канала связи; сформировать многолучевые ДН в пределах зоны обслуживания спутника и повысить помехоустойчивость канала связи в целом при воздействии различного рода помех; выработать предпосылки на освоение новых СВЧ-диапазонов и повысить энергоэффективность данных систем в целом.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 14-08-00198, РФФИ 14-08-00489.

Список литературы

1. Воскресенский, Д. И. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток : учеб. пособие для вузов / Д. И. Воскресенский, В. И. Степаненко. – М. : Радиотехника, 2003. – 632 с.
2. Фролов, О. П. Зеркальные антенны для земных станций спутниковой связи / О. П. Фролов, В. П. Вальд. – М. : Горячая линия–Телеком, 2008. – 496 с.
3. Сомов, А. М. Расчет антенн земных станций спутниковой связи : учеб. пособие для вузов / А. М. Сомов. – М. : Горячая линия–Телеком, 2012. – 304 с.
4. Фролов, А. А. Моделирование характеристик антенн СВЧ-диапазона / А. А. Фролов, С. В. Гирич, В. П. Заярный // Изв. ВолгГТУ. – 2008. – С. 112 – 114.
5. Сысов, А. Н. Математическая модель передающей КФАР / А. Н. Сысов // Антенны. – 2010. – № 11. – С. 28–29.

References

1. Voskresenskii D.I., Stepanenko V.I. *Ustroistva SVCh i anteny. Proek-tirovanie fazirovannykh antennykh reshetok* (Microwave devices and antennas. Design phased arrays), Moscow: Radiotekhnika, 2003, 632 p.
2. Frolov O.P., Val'd V.P. *Zerkal'nye anteny dlya zemnykh stantsii sputnikovoi svyazi* (Reflector antenna for satellite earth stations), Moscow: Goryachaya liniya–Telekom, 2008, 496 p.
3. Somov A.M. *Raschet antenn zemnykh stantsii sputnikovoi svyazi* (Calculation of antennas satellite earth stations), Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2012, 304 p.
4. Frolov A.A., Girich S.V., Zayarnyi V.P. *Izvestia VSTU*, 2008, pp. 112-114.
5. Sysoev A.N. *Antenny*, 2010, no. 11, pp. 28-29.

Synthesis of Hybrid Reflector Antenna for Terrestrial Satellite Communication System

A. A. Letunov, O. A. Belousov, R. Yu. Kolmykov,
A. S. Kolmykova, R. Yu. Kurnosov

Tambov State Technical University, Tambov

Keywords: antenna array; directional factor; gain computer model of radiator; hybrid antenna feed horn; reflector antenna; standing wave ratio; terrestrial satellite communication system.

Abstract: This article describes how to build a hybrid reflector antenna based on the feed in the form of a linear-phase equidistant array antenna for terrestrial satellite communication system. We describe important aspects of the synthesis of hybrid reflector antennas for terrestrial satellite communication systems, developed a computer model of such antenna systems, can significantly extend the bandwidth of the communication channel with the ability to balance the traffic load, depending on the communication channel and the formation of multi-beam patterns.

© А. А. Летунов, О. А. Белоусов, Р. Ю. Колмыков,
А. С. Колмыкова, Р. Ю. Курносов, 2015