

УДК 621.396.676 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.1.30.35

## Построение многолучевых антенн абонентской радиолинии в *S*- и *Ka*-диапазонах частот

А. А. Аджибеков, [contact@spacecorp.ru](mailto:contact@spacecorp.ru)

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** Работа посвящена разработке концепции построения многолучевых антенно-фидерных устройств абонентской радиолинии в *S* и *Ka*-диапазонах частот. Путем построения многолучевой антенны в виде цифровой антенной решетки обеспечивается формирование множества лучей и достигается плотное покрытие подспутниковой зоны в секторе углов  $\pm 50^\circ$ . Диаграммообразование осуществляется цифровыми методами, что обеспечивает возможность гибкого оперативного изменения формы и направления главного максимума ДН каждого луча без изменения архитектуры антенной решетки.

В статье показано, что для удовлетворения заданным исходным данным, антенны целесообразно построить в виде цифровых антенных решеток: приемопередающей со 108 элементами в *S*-диапазоне частот, приемной и передающей со 108 элементами в *Ka*-диапазоне частот. При этом каждая антенная решетка формирует 61 луч в секторе  $\pm 50^\circ$  с коэффициентом усиления 25,5 дБ и уровнем боковых лепестков менее  $-20$  дБ.

**Ключевые слова:** антенно-фидерное устройство, многолучевая антенна, диаграммообразующая схема, антенная решетка, диаграмма направленности, коэффициент усиления

## Building of Multibeam Antennas of a Subscriber Radio Link in *S*- and *Ka*-Frequency Bands

А. А. Adzhibekov, [contact@spacecorp.ru](mailto:contact@spacecorp.ru)

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The paper is devoted to the development of the concept for building multibeam antenna-feeder devices of a subscriber radio link in *S*- and *Ka*-frequency bands. By building a multibeam antenna in the form of a digital antenna array, multiple beams are formed and tight coverage of a subsatellite zone is achieved in the angle sector  $\pm 50^\circ$ . Beam formation is performed by digital methods, which provides possibility of flexible operational change of shape and direction of the principal maximum of radiation pattern of each beam without change in antenna array architecture.

The article shows that to meet the specified initial data, antennas are advisable to build in the form of digital antenna arrays: transceiver with 108 elements in the *S*-band, receiving and transmitting with 108 elements in the *Ka*-band. Each antenna array forms 61 beams in the sector  $\pm 50^\circ$  with the 25.5 dB gain and the side lobe level not less than  $-20$  dB.

**Keywords:** antenna-feeder device, multibeam antenna, beam-forming network, antenna array, radiation pattern, antenna gain

В настоящее время в наиболее развитых странах мира активизировались работы по созданию глобальных спутниковых систем связи на основе низкоорбитальных космических аппаратов (КА). Использование спутниковых группировок в низкоорбитальном сегменте для построения систем передачи данных имеет ряд преимуществ по сравнению с аналогичными системами на основе КА, размещенных на геостационарных орбитах, в том числе низкие задержки, возможность обеспечить устойчивую работу в области полюсов, менее жесткие требования к энергетическому потенциалу аппаратуры потребителя [1–3]. Тем не менее построение таких систем требует создание антенно-фидерных устройств (АФУ) абонентской радиолинии, обеспечивающих формирование нескольких десятков (сотен) лучей, обеспечивающих плотное покрытие в секторе углов до  $\pm 50\text{--}60^\circ$ . Многолучевые зеркальные антенны, широко применяемые при построении спутниковых систем связи в высокоорбитальном и среднеорбитальном сегментах, затруднительно применять на низких орбитах ввиду зависимости сектора сканирования от ширины диаграммы направленности (ДН) [4–6]. Согласно [6] при применении таких антенн может быть достигнут сектор сканирования до 10–20 ширин ДН, однако для обеспечения широкого сектора обзора вспомогательный рефлектор двухзеркальной антенны должен быть увеличен практически до размера основного зеркала, что приведет к увеличению массогабаритных параметров. Кроме того, в этом случае ширина луча по уровню  $-3$  дБ на краю сектора обзора увеличивается практически в два раза.

Целью работы являлась разработка концепции построения бортовых многолучевых антенн абонентской радиолинии, работающих как на прием, так и на передачу, формирующих 61 луч в секторе  $\pm 50^\circ$  в *S* и *Ka*-диапазонах частот.

## Синтез пассивной многолучевой антенной решетки

Рассмотрим возможности построения бортовой многолучевой антенны, удовлетворяющей приведенным выше исходным данным. Для этого исследуем возможности ее построения в виде много-

лучевой антенной решетки (АР) с пассивной диаграммообразующей схемой (ДОС) без потерь [7, 8]. Известно, что АР с пассивной ДОС без потерь может сформировать несколько лучей одновременно, если диаграммы направленности (ДН) этих лучей удовлетворяют условию ортогональности [7, 8]:

$$\int F_i(\theta) \cdot F_j(\theta) d\theta = \delta_{ij}, \quad (1)$$

где  $F_i(\theta)$ ,  $F_j(\theta)$  — нормированные ДН лучей;  $\delta_{ij}$  — символ Кронекера.

Таким образом, в многолучевой АР с пассивной ДОС без потерь ДН лучей не могут иметь произвольную форму. Каждому ортогональному лучу при этом соответствует свое ортогональное амплитудно-фазовое распределение полей и, соответственно, направление главного максимума ДН, а также уровень боковых лепестков (УБЛ). Среди ортогональных амплитудных распределений есть как равномерное распределение, так и распределения, спадающие к краям. Для линейных и квадратных АР, к примеру, семейство ортогональных распределений имеет вид косинуса целой неотрицательной степени. При этом наибольший уровень пересечения соседних лучей составляет около  $-4$  дБ при УБЛ около  $-13$  дБ, что не всегда является приемлемым с точки зрения электромагнитной совместимости [9]. Использование косинусного распределения позволяет снизить УБЛ до величины  $-23$  дБ, однако при этом уровень пересечения соседних лучей снижается до величины  $-9$  дБ [8].

Снижение УБЛ с сохранением (или минимальным снижением) уровня пересечения соседних лучей возможно при построении АР с контуром апертуры, отличным от квадратного [10–13]. Для определения вида контура апертуры и шага излучателей решетки, формирующих ортогональные лучи с заданным набором направлений, воспользуемся методикой, изложенной в работах [10–13]. Суть этой методики в том, что в пространстве направляющих косинусов  $u$ ,  $v$  ( $u = \cos(\theta) \sin(\varphi)$ ,  $v = \sin(\theta) \sin(\varphi)$ , где  $\theta$  и  $\varphi$  — полярный и азимутальный углы сферической системы координат) определяется область, которую необходимо покрыть лучами. В этом пространстве выбирается сетка, в узлах которой будут расположены направления лучей, а также, исходя из их необходимого количества,

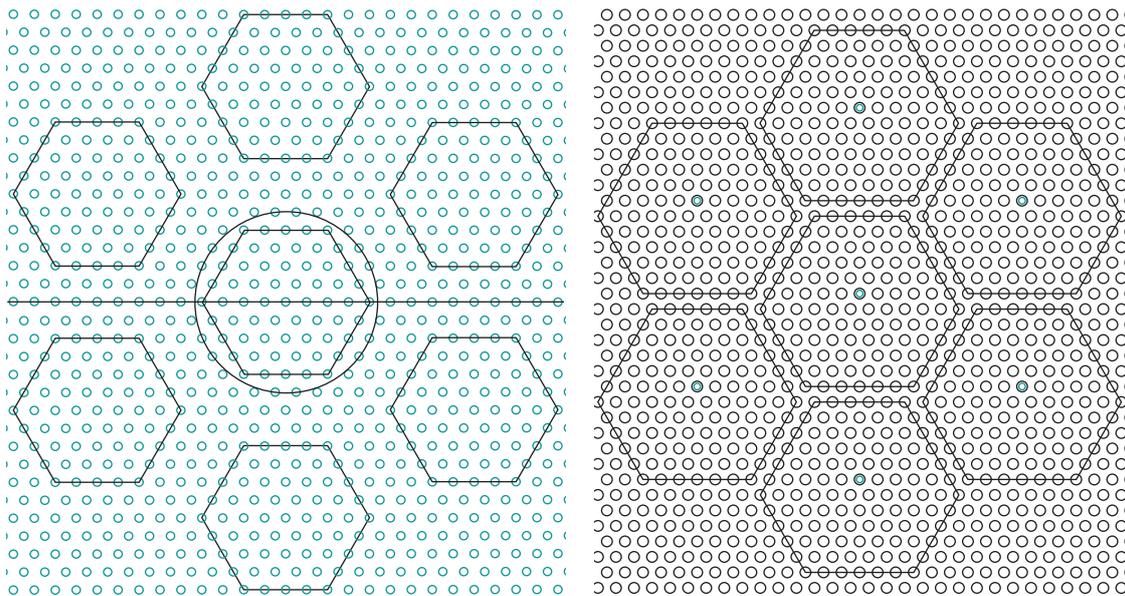


Рис. 1. Расположение лучей в пространстве направляющих косинусов (слева) и расположение излучателей (справа)

Таблица. Характеристики бортовых антенн S- и Ka-диапазонов частот

	S-диапазон. Прием, передача	Ka-диапазон	
		передача	прием
Количество лучей	61	61	61
Количество элементов АР	108	108	108
Расстояние между элементами, мм	93	9,3	6,2
Тип сетки	Треугольная	Треугольная	Треугольная
Поперечные габаритные размеры АР, мм	1116 × 966	111,2 × 96,6	74,4 × 64,4

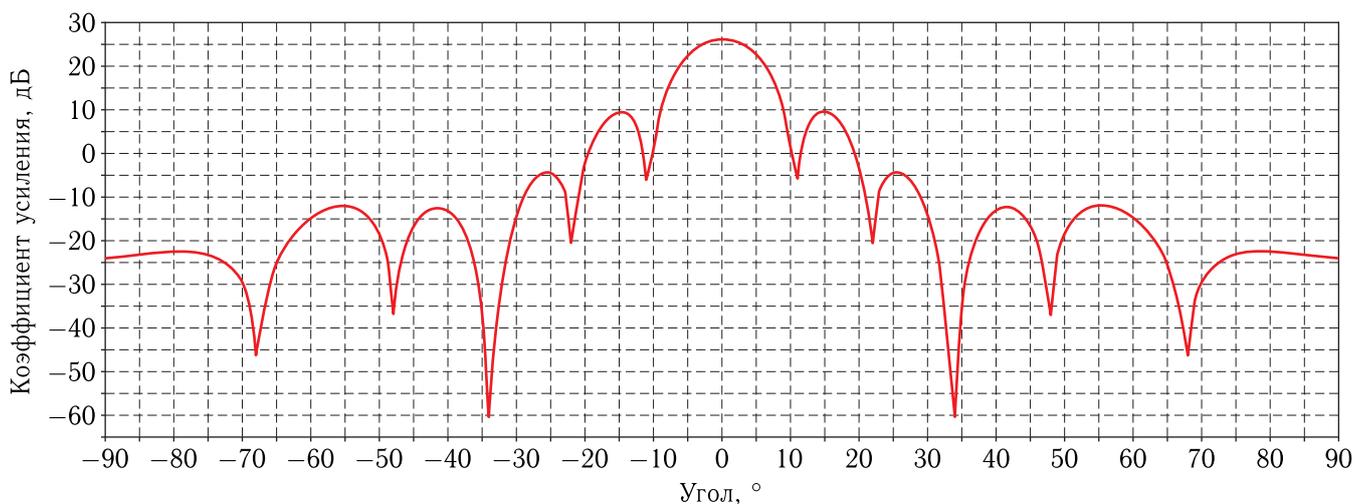


Рис. 2. Рассчитанная диаграмма направленности центрального луча антенных решеток S- и Ka-диапазонов частот

определяются угловые расстояния между соседними лучами. С использованием следующих ниже соотношений определяются: линейные размеры апертуры в плоскости  $xy$ ; параметры сетки, в узлах которых располагаются излучатели антенной решетки; расстояния между ними:

$$D_x = \frac{\lambda}{\delta_u}, \quad (2)$$

$$D_y = \frac{\lambda}{\delta_v}, \quad (3)$$

$$d_x = \frac{\lambda}{\Delta_u}, \quad (4)$$

$$d_y = \frac{\lambda}{\Delta_v}, \quad (5)$$

где  $D_x$  — линейный размер апертуры по оси  $x$ ;  
 $D_y$  — линейный размер апертуры по оси  $y$ ;  
 $d_x$  — шаг решетки вдоль оси  $x$ ;  
 $d_y$  — шаг решетки вдоль оси  $y$ ;  
 $\delta_u, \delta_v$  — расстояния между соседними лучами по осям  $u$  и  $v$  в пространстве направляющих косинусов;

$\Delta_u, \Delta_v$  — параметры определяющие угловые направления дифракционных максимумов антенной решетки.

Геометрия контура апертуры выбирается из следующего правила: при многократной трансляции в плоскости  $xy$  этот контур может покрыть всю эту плоскость без пустот и пересечений. На рис. 1 проиллюстрированы положения максимумов ДН АР в пространстве направляющих косинусов (круг на рисунке слева соответствует области углов  $\pm 50^\circ$ ), формирующей 61 ортогональный луч; а также расположение излучателей в плоскости  $xy$  и контур апертуры АР.

В таблице приведены рассчитанные по методике [10–13] характеристики АР в Си Ка-диапазонах частот.

Рассчитанная диаграмма направленности центрального луча антенной решетки представлена на рис. 2.

Коэффициент усиления (КУ) антенной решетки составил 26,2 дБ, ширина ДН по уровню  $-3$  дБ —  $8,9^\circ$ .

Как видно из рис. 2, УБЛ составляет  $-16$ – $-17$  дБ при уровне пересечения соседних лучей  $-4,5$  дБ [10–13]. При этом, согласно известной

теореме из теории многолучевых антенн [7, 8], снижение УБЛ в АР с пассивной ДОС без потерь (при неизменной конфигурации АР) возможно только при соответствующем снижении уровня пересечения соседних лучей. Таким образом, возникает противоречие: невозможно одновременно получить плотное покрытие заданной области лучами при низком УБЛ.

### Построение облика многолучевой антенной решетки с цифровым диаграммообразованием

Разрешить возникшее противоречие возможно путем использования цифровых методов диаграммообразования [14, 15]. Сформулированная для многолучевых антенн с пассивными ДОС без потерь теорема к АР с цифровым диаграммообразованием неприменима [8, 14, 15] (ввиду того, что цифровые ДОС пассивными не являются), так что при использовании цифровых методов диаграммообразования возможно формирование лучей практически с любым сочетанием уровней пересечения соседних лучей и УБЛ. Функциональные схемы приемного и передающего модулей АР с цифровым диаграммообразованием представлена на рис. 3. Приемный модуль состоит из маломощного усилителя МШУ, преобразователя частоты ПЧ, квадратурного демодулятора КДМ и аналого-цифровых преобразователей АЦП. Передающий модуль состоит из усилителя мощности УМ, квадратурного модулятора КМ и цифро-аналогового преобразователя ЦАП.

Рассмотрим возможности формирования ДН с пониженным УБЛ в АР с параметрами, приведенными в таблице 1. Для этого аналитически построим ДН АР с помощью следующего соотношения [7]:

$$f(\theta, \varphi) = f_0(\theta, \varphi) \cdot \sum A_i \times e^{j \cdot k \cdot (x_i \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\varphi) + y_i \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\varphi)) - j \cdot \psi_i}, \quad (6)$$

где  $\theta$  — полярный угол сферической системы координат;

$\varphi$  — азимутальный угол сферической системы координат;

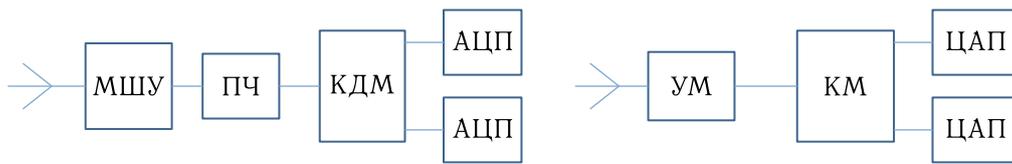


Рис. 3. Функциональные схемы приемного (слева) и передающего (справа) модулей антенной решетки с цифровым диаграммообразованием [14]

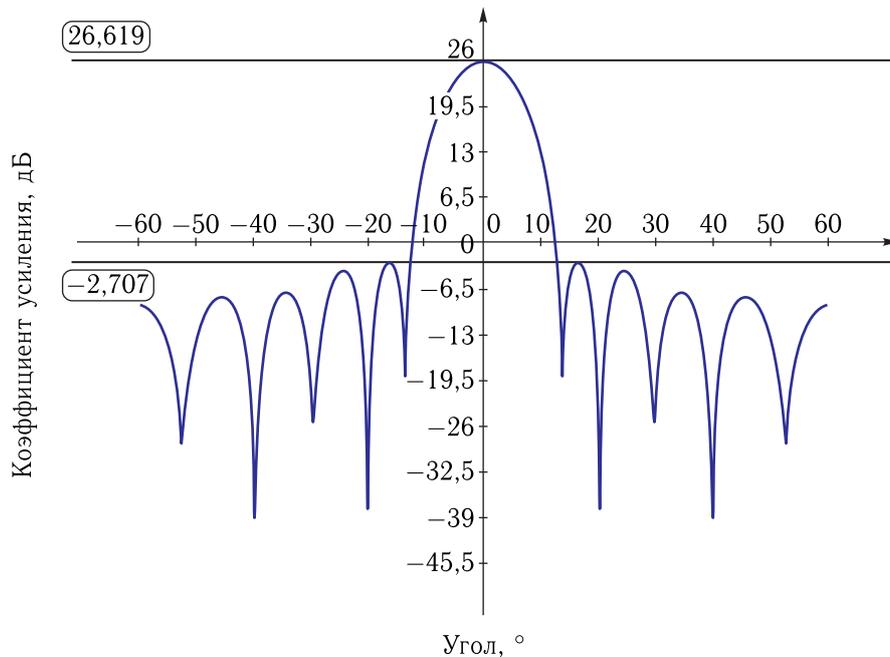


Рис. 4. Рассчитанная диаграммы направленности центрального луча антенной решетки с распределением Хансена

$f_0(\theta, \varphi)$  — ДН слабонаправленного излучателя;

$A_i$  — амплитуда возбуждения  $i$ -го излучателя;

$\psi_i$  — фаза возбуждения  $i$ -го излучателя;

$x, y$  — координаты  $i$ -го излучателя;

$k$  — волновое число;

$j$  — мнимая единица.

В качестве амплитудного распределения выберем однопараметрическое распределение Хансена [8]. На рис. 4 представлено сечение рассчитанной с помощью (6) ДН АР. Как видно из рисунка, КУ составляет 25,6 дБ, при УБЛ  $-28$  дБ и ширине ДН по уровню  $-3$  дБ  $9-10^\circ$ . При этом могут быть обеспечены направления лучей, определенные ранее при синтезе АР, представленные на рис. 1, что позволяет сохранить уровень пересечения лучей, полученный для АР с пассивной ДОС.

## Выводы

В статье дано обоснование способа формирования облика бортовых антенн абонентской радиолинии в  $S$  и  $Ka$ -диапазонах частот. Показано, что для удовлетворения заданным исходным данным эти антенны целесообразно построить в виде цифровых антенных решеток: приемопередающей со 108 элементами в  $S$ -диапазоне частот; приемной и передающей со 108 элементами в  $Ka$ -диапазоне частот. При этом каждая АР формирует 61 луч в секторе  $\pm 50^\circ$  с коэффициентом усиления 25,5 дБ и УБЛ менее  $-20$  дБ.

## Список литературы

1. Томаси У. Электронные системы связи. М.: Техносфера, 2007. 1360 с.

2. Бертенев В.А., Болотов Г.В., Быков В.Л. и др. Под ред. Л.Я. Кантора. Спутниковая связь и вещание: Справочник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1997. 528 с.
3. Наблюдение искусственных спутников Земли. Гл. 2: Какие орбиты и ИСЗ бывают. <http://www.sat.belastro.net/glava2/glava2.php> (Дата обращения 15.04.18).
4. Калошин В.А., Фролова Е.В. Моделирование офсетной двухзеркальной апланатической антенны типа Грегори // Журнал радиоэлектроники, 2007, вып. 6.
5. Калошин В.А., Фролова Е.В. Моделирование офсетной двухзеркальной апланатической антенны типа Кассегрена // Журнал радиоэлектроники, 2007, вып. 7.
6. Бахрах Л.Д., Галимов Г.К. Зеркальные сканирующие антенны. М.: Наука, 1981. 293 с.
7. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны. М.: Радиотехника, 2006. 376 с.
8. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. Пер. с англ. под ред. А.И. Синани. М.: Техносфера, 2012. 560 с.
9. Пономарев Л.И., Вечтомов В.А., Милосердов А.С. Под редакцией Л.И. Пономарева. Бортовые цифровые многолучевые антенные решетки для систем спутниковой связи. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 197 с.
10. Skobelev S.P. A general approach to the design of planar array antennas for forming of multiple orthogonal beams, in Proc. Int. Conf. Electromagn. Adv. Appl. (ICEAA), Cape Town, South Africa, Sep. 2–7, 2012. P. 454–457.
11. Skobelev S.P. Determination of dimensions and shape of a planar aperture for forming of orthogonal beams // IEEE Trans. Antennas Propag., Aug. 2008, vol. 56, no. 8. P. 2755–2757.
12. Skobelev S.P. On one more property of the ideal array element patterns // IEEE Trans. Antennas Propag., Mar. 2009, vol. 57, no. 3. P. 631–637.
13. Skobelev S.P. On the Forming of Orthogonal Beams by Planar Array Antennas // IEEE transactions on antennas and propagation, Apr. 2014, vol. 62, no. 4.
14. Григорьев Л.Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках. М.: Радиотехника, 2010. 144 с.
15. Воскресенский Д.И., Овчинников Е.В., Шмачилин П.А. Бортовые цифровые антенные решетки и их элементы. М.: Радиотехника, 2013. 208 с.