P. I. Melnikov, V. S. Kudryashov, V. I. Kuzoro, E. A. Shangina

SOLAR BATTERIES EXPERIMENTAL UNIT WITH CONCENTRATOR: IDEA, CONSTRUCTION, METHODOLOGY OF FLIGHT TESTS

In the article we describe experimental unit of solar battery with plane concentrator of sun light, and give description of methodology of flight tests on spacecraft «Jubilee-2».

Keywords: spacecraft, solar battery.

© Мельников П. И., Кудряшов В. С., Кузоро В. И., Шангина Е. А., 2010

УДК 621.396.677

С. В. Поленга, Ю. П. Саломатов

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ДЛЯ СЕТЕЙ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ*

Рассматриваются принципы создания отражательных антенных решеток на основе микрополосковых элементов. Приводятся результаты экспериментального исследования созданного прототипа ОАР.

Ключевые слова: отражательная антенная решетка, ячейка Флоке, Ku-диапазон.

В спутниковых системах связи необходимо использовать антенные системы с высоким коэффициентом усиления. Традиционно в таких случаях используются зеркальные антенны (ЗА) или антенные решетки. Применение ЗА в ряде случаев затруднено или невозможно из-за громоздкой формы рефлектора, также ЗА является сложной в производстве, особенно в области высоких частот и специальных форм диаграмм направленности (ДН). В результате развился новый тип антенн, который лишен некоторых недостатков параболических зеркальных антенных систем – отражательных антенных решеток (ОАР)

Подобно параболическому рефлектору, ОАР могут достигать очень высокой эффективности (> 50 %) для больших апертур [1], так как нет необходимости использовать делители мощности, подводящие цепи и другие элементы с возможными потерями. С другой стороны, возможна реализация ОАР с отклонением главного лепестка на большой угол от перпендикулярного направления, а также с диаграммой направленности (ДН) специальной формы.

Направление на спутник может быть задано на стадии проектирования антенны, таким образом ОАР могут крепиться непосредственно на выбранную стену здания. В таком случае снижаются затраты на поддерживающие конструкции, уменьшаются ветровые нагрузки на плоскость антенны, уменьшается влияние осадков, возможно использование обтекателя, имитирующего стену здания или рекламный плакат, таким образом ОАР не портит эстетический вид города.

Возможно сегментирование плоскости ОАР на отдельные подрешетки. Данная особенность позволяет значительно облегчить транспортировку антенн с большими размерами. Транспортировка ЗА с размерами более 2 м затруднительна в регионы с ограниченной транспортной сетью, где потребность в антенных системах с высоким коэффициентом усиления особенно высока. Также возможно создание разворачиваемых конструкций для мобильного применения.

Благодаря малой толщине рабочего слоя ОАР, она может быть установлена на имеющуюся поверхность без значительного увеличения габаритов и веса общей системы.

ОАР с сотнями или тысячами микрополосковых элементов могут производиться по имеющейся дешевой и точной технологии химического травления, что экономически целесообразно для ОАР с большими апертурами.

Другой важной особенностью данного типа антенн является возможность формирования ДН специальной формы, а также контурных диаграмм, используя известные техники фазового синтеза. Подобно параболическому рефлектору могут быть построены антенные системы с несколькими лучами, соответственно с несколькими облучателями, расположенными в фокальной области.

Для реализации электронного сканирования луча в элементы ОАР могут быть включены электронные фазовращатели. С такими возможностями ОАР нет необходимости в использовании сложных диаграммообразующих схем с высокими потерями и дорогостоящих усилителей в традиционных фазированных антенных решетках.

В настоящее время все большее распространение получают системы спутниковой связи и телевидения. Со-

*Работа выполнена при поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности».

временный город уже нельзя представить без множества параболических спутниковых антенн. В данной работе поставлена задача разработки и экспериментального исследования ОАР для сетей спутниковой связи.

В общем случае ОАР преобразует сферический фазовый фронт облучателя в плоский или фронт специальной формы для получения желаемой ДН. Достигается это путем внесения фазовых задержек на элементах решетки.

Самый важный и критичный шаг в построении ОАР – выбор элемента. Можно выделить три главных критерия, которые влияют на выбор конфигурации элемента: фаза коэффициента отражения, ширина ДН и рабочая полоса.

Зависимость фазы отраженной волны от изменения геометрического параметра элемента (размеров, длины линии задержки и т. п.) должна быть вычислена максимально точно [2; 3]. Использование ячейки Флоке является самым распространенным методом расчета [4], он имитирует расчет бесконечной антеной периодической структуры, состоящей из одинаковых элементарных ячеек, с падением на нее плоской волны.

Ширина ДН элемента должна корректно соответствовать отношению фокусного расстояния к диаметру решетки *f/D* [5], чтобы в достаточной мере принимать сигнал облучателя под всеми углами облучения. Например, если элемент имеет достаточно узкую ДН, а антенна – небольшое значение *f/D*, элемент, расположенный на краю решетки, будет принимать лишь малую часть пришедшего излучения, соответственно будет неэффективен.

У всех элементов ОАР должен быть надлежащий интервал между соседними элементами, чтобы избежать появления дифракционных лепестков в диаграмме направленности. В случае облучения элемента по нормали, шаг может быть относительно большим (> 0,9). Для отдаленных элементов угол падения становится большим, соответственно шаг решетки должен быть уменьшен. Требование к шагу определяется следующим выражением:

$$\frac{d}{\lambda_0} \le \frac{1}{1+\sin\theta},$$

где d – шаг решетки; θ – угол облучения решетки или угол между направлением главного лепестка и нормалью к плоскости антенны. Например, в случае решетки с *f/D* = 0,5 угол облучения крайних элементов достигает $45°$, соответственно шаг должен быть меньше $0,6\lambda$. При использовании большего шага неизбежно появление дифракционных лепестков в диаграмме направленности.

Для создания ОАР необходим алгоритм синтеза. Значение фазы в любой точке пространства, при использовании источника со сферическим фазовым фронтом может быть найдено из уравнения сферической волны

$$\dot{E}(r) = \frac{E_0}{|\vec{r}|} e^{-ik|\vec{r}|},$$

где E_0 – амплитуда электрического поля; $|\vec{r}| = \sqrt{x^2+y^2+z^2}$ – расстояние между фокусом антенны и элементом; x, y, z – координаты элемента в антенне; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число свободного пространства. Предполагается, что центр системы координат находится в фокусе. Фаза волны в выбранной точке имеет вид

$$\psi(\vec{r}) = \arg\left(\dot{E}(\vec{r})\right).$$

При построении АР необходимо определить фазу на плоскости, отстоящей на некотором расстоянии F от источника волны с определенным шагом. Тогда значение длин радиус-вектора может быть записано следующим образом:

$$|\vec{r}| = \sqrt{x^2+y^2+F^2},$$

где F – фокусное расстояние (константа).

Таким образом может быть получена матрица значений фазы в центральной точке каждого элемента решетки. Значения такой матрицы соответствуют необходимой фазовой задержке на элементах решетки для получения плоского фазового фронта, параллельного плоскости решетки, в случае синтезирования синфазной АР.

Заключительным шагом в синтезе АР является сопоставление значений фаз с варьируемым параметром элемента решетки.

Элементом для синтеза ОАР был выбран мальтийский крест (рис. 1).

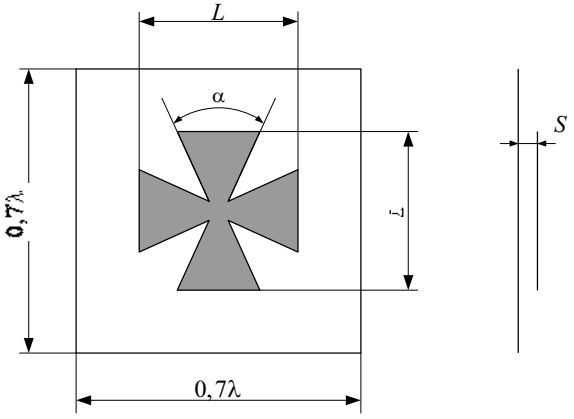

Рис. 1. Ячейка на основе резонатора в форме мальтийского креста

Структура описывается двумя параметрами: длиной креста L и углом расширения его луча. Расчет элемента ОАР производился методом ячейки Флоке.

При малых α элемент ведет себя идентично элементу без расширения. При увеличении α до $45°$ наблюдается движение фазовой кривой в конце рабочего участка. Фазовые кривые для четырех значений толщины подложки при $\alpha = 45°$ показаны на рис. 2.

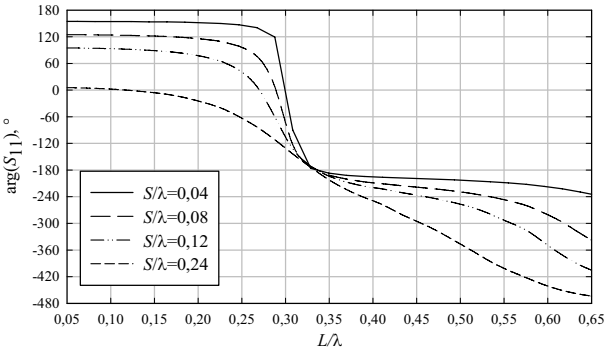

Рис. 2. Зависимость фазы отраженной волны от L для различных толщин подложек при $\alpha = 45°$

Диапазон регулировки фазы достигает 500° при $\frac{S}{\lambda} = 0{,}12$. В таком случае может быть выбран удобный, наиболее линейный участок кривой для построения ОАР, для уменьшения влияния погрешностей при производстве [2; 3]. Шаг решетки может быть уменьшен до $0{,}55\lambda$ с сохранением диапазона регулировки равным $360°$, что позволит повысить эффективность короткофокусных или офсетных систем, где часть элементов облучается под большим углом.

Такой элемент позволяет работать с круговой или двумя ортогональными линейными поляризациями, что является обязательным условием для функционирования в системе спутниковой связи.

Эскиз синтезированной ОАР на основе элемента в форме мальтийского креста представлен на рис. 3.

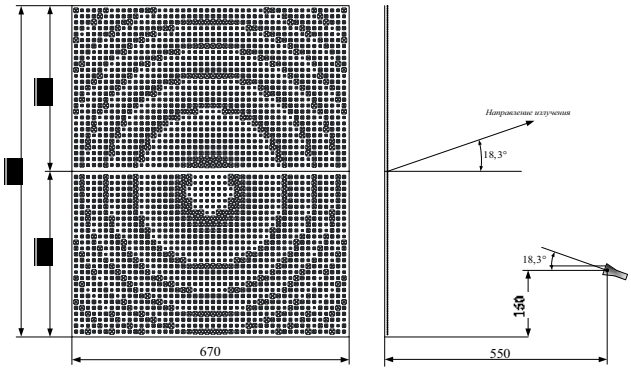

Рис. 3. Эскиз ОАР

ОАР разрабатывалась для работы в Ku-диапазоне (10,7–12,75 ГГц) [6]. Однако центральная частота была выбрана равной 12,3 ГГц, для повышения КУ в интересуемом поддиапазоне спутника Bonum 1 (12,1–12,5 ГГц). Синтезированная ОАР состоит из 46 элементов в горизонтальной плоскости и 54 – в вертикальной. В вертикальной плоскости решетка представлена в виде 2 подрешеток, что позволяет транспортировать антенну в таре с внутренними размерами 400 × 670 × 50 мм. Для реализации антенны была выбрана офсетная конфигурация, где исключено затенение решетки облучателем. Угол подъема луча составляет 18,3° и равен углу поворота облучателя, что ведет к сложению переизлученной и переотраженной составляющих, что несколько увеличивает КУ.

Представленная ОАР разработана для приема спутникового телевидения со спутника Bonum 1 в Красноярском крае, где угол подъема на спутник составляет 18,3°, как и в изготовленной антенне. Таким образом антенна может крепиться непосредственно на стену здания, настройка на спутник в горизонтальной плоскости в пределах ±20° может производиться только перемещением облучателя. Отношение *F*/*D* антенной системы составило 0,8. В роли облучателя могут быть использованы стандартные конвертеры Ku-диапазона, имеющиеся на рынке.

Полное электродинамическое моделирование данной ОАР не проводилось из-за отсутствия необходимых вычислительных ресурсов. Расчетный максимальный КУ составляет 37 дБ, рабочая полоса частот по уровню –3 дБ составляет не менее 17 %.

Фотография изготовленной ОАР представлена на рис. 4.

Рис. 4. Фотография ОАР

ОАР реализована в виде двух отдельных подрешеток. Несущим слоем ОАР является листовой вспененный ПВХ толщиной 10 мм. Топология ОАР выполнена на металлизированном лавсане методом химического травления. Подложка выполнена из вспененного полиэтилена. Каждая из подрешеток закрыта ударопрочным обтекателем. Подрешетки прикрепляются к общему алюминиевому основанию. Предусмотрен держатель, который позволяет использовать стандартные облучатели Ku-диапазона.

Измеренные ДН исследуемой ОАР для трех частот в двух плоскостях представлены на рис. 5, 6.

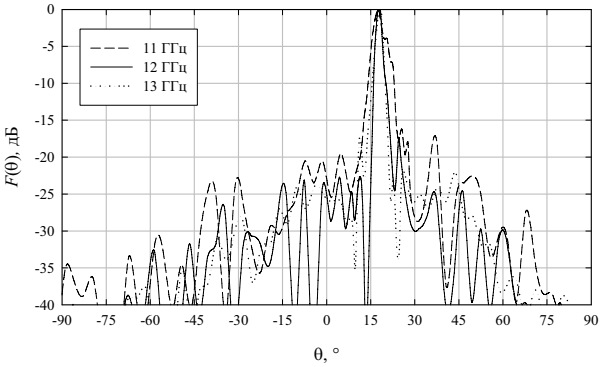

Рис. 5. Измеренные ДН в вертикальной плоскости для трех частот

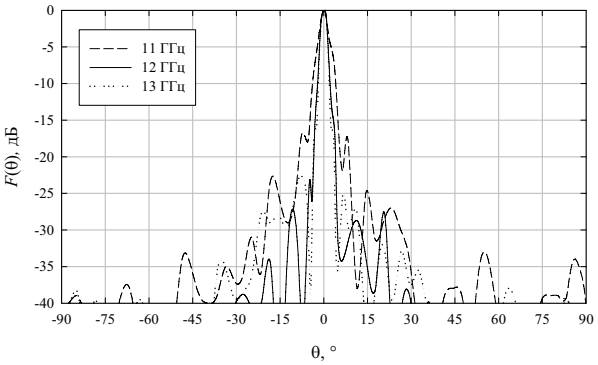

Рис. 6. Измеренные ДН в горизонтальной плоскости для трех частот

Измерения проводились в уличных условиях. Измерительная антенна с подключенным анализатором спектра размещалась в окне здания на достаточной высоте. Измеряемая антенна, подключенная к генератору, располагалась на улице. Таким образом, было минимизировано влияние земли на измеряемые характеристики антенны.

Измеренные ширины ДН исследуемой ОАР в двух плоскостях представлены на рис. 7.

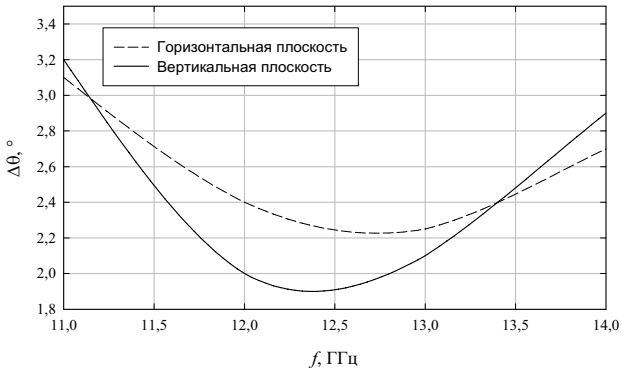

Рис. 7. Ширина ДН в горизонтальной и вертикальной плоскостях

Измеренный уровень боковых лепестков (УБЛ) исследуемой ОАР в двух плоскостях представлен на рис. 8.

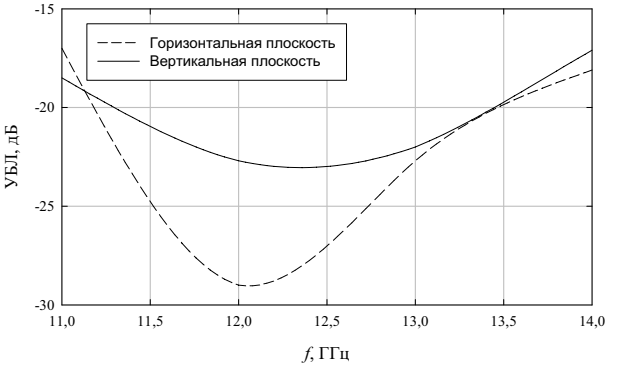

Рис. 8. УБЛ в горизонтальной и вертикальной плоскостях

Минимальные УБЛ и ширина ДН наблюдаются в диапазоне частот 12–12,5 ГГц, что соответствует расчетной центральной частоте ОАР 12,3 ГГц.

Следует отметить, что наблюдается частотное сканирование ДН в вертикальной плоскости (рис. 9).

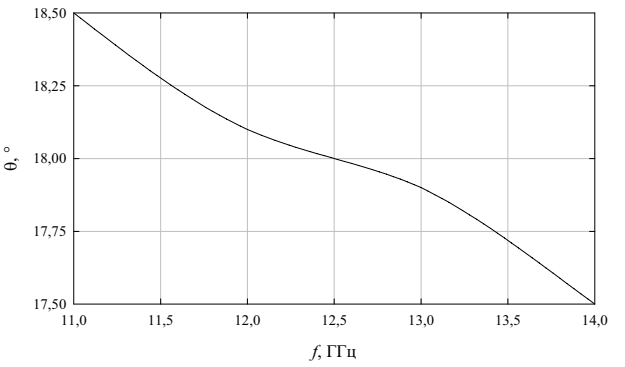

Рис. 9. Направление максимума ДН в вертикальной плоскости

Сканирование ДН в полосе частот 11–14 ГГц достигает 1°, что соразмерно с ШДН. Однако вещание со спутника ведется в более узкой полосе частот. Например, вещание со спутника Bonum-1 E56 ведется в диапазоне 12,168–12,476 ГГц, для которого сканирование составляет менее 0,1°. Частотное сканирование ДН присуще офсетной конфигурации, для прямофокусной конфигурации сканирования не будет.

Следует отметить, что производилось тестирование антенны на реальном сигнале с вышеупомянутого спутника. Антенная система оказалась способна принимать сигнал со спутника только на одну из панелей ОАР. Запас по КУ может быть использован для возможности применения антенны непосредственно на стенах зданий, неперпендикулярных направлению на спутник в горизонтальной плоскости. Направление может быть скорректировано смещением облучателя.

Заключение. Описанная конструкция ОАР показывает возможность создания эффективных антенных систем с высоким КУ для массовых телекоммуникационных систем, обладающих плоской, удобной в расположении конструкцией. Возможность использования обтекателя, имитирующего стену здания, особенно актуальна в городских условиях. ОАР имеют низкую стоимость изготовления, благодаря применению распространенной технологии изготовления печатных плат, и могут составить конкуренцию традиционным зеркальным антеннам, особенно в случае реализации антенн с большими апертурами.

Библиографические ссылки

1. Huang J., Encinar J. A. Reflectarray antennas / IEEE Press. 2007.

2. Оценка допустимой неточности выполнения СВЧ микрополосковых отражательных антенных решеток / Ю. П. Саломатов, С. В. Поленга, Р. О. Рязанцев и др. // 18th int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo‘2008). Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2008. С. 417–418.

3. Поленга С. В., Саломатов Ю. П. Влияние неточности изготовления микрополосковых отражательных антенных решеток на их характеристики // Современные проблемы радиоэлектроники : сб. науч. тр. / ИПК СФУ. Красноярск, 2008. С. 110–113.

4. Feng-Chi E. Tsai, Bialkowski M. E. Designing a 161-element Ku-Band microstrip reflectarray of variable size patches using an equivalent unit cell waveguide approach // IEEE transactions on antennas and propagation. 2003. Vol. 51. № 10. P. 2953–2962.

5. Поленга, С. В., Саломатов Ю. П. Оптимизация характеристик микрополосковых отражательных антенных решеток // Современные проблемы радиоэлектроники : сб. науч. тр. / ИПК СФУ. Красноярск, 2009. С. 152–156.

6. Фронтов В. В., Тихвинский В. О. Регулирование телекоммуникаций в России и странах СНГ. М. : Горячая Линия – Телеком, 2006.