

УДК 621.396.677

Е.А. Литинская, С.В. Поленга, Ю.П. Саломатов

## Разработка и исследование отражательной антенной решетки для сетей дуплексной спутниковой связи

Рассматривается влияние параметров излучающих структур на характеристики отражательной антенной решетки (ОАР). Приводятся результаты экспериментального исследования разработанного макета ОАР.

**Ключевые слова:** отражательная антенная решетка, ячейка Флоке, *VSAT*.

В настоящее время все большее распространение получают сети беспроводной передачи данных, системы спутниковой связи и телевидения. Для их реализации необходимы антенны с высоким коэффициентом усиления (КУ), с диаграммой направленности (ДН) специальной формы или контурной. При этом они должны быть компактными, легкими и не выделяться на фоне сооружений.

Целью работы являлось исследование излучающих структур, оптимизация параметров элементов и ОАР в целом, разработка уменьшенного варианта антенны для систем спутниковой связи на основе *VSAT*-технологии для проверки результатов проведенных теоретических исследований.

Отражательные антенные решетки (ОАР), являющиеся аналогом зеркальных антенн, удовлетворяют этим требованиям. Производство ОАР с большими апертурами экономически выгодно, т.к. выполняется по недорогой и точной технологии, а антенны при установке не требуют применения дорогостоящего опорного устройства.

ОАР преобразует сферический фазовый фронт облучателя в плоский или фронт специальной формы для получения желаемой ДН. Достигается это внесением фазовых задержек на элементах решетки [1].

Выбор элемента, его конфигурации является самым важным и критичным шагом в построении ОАР. Можно выделить три главных критерия, которые влияют на выбор конфигурации элемента: фаза коэффициента отражения, ширина ДН и рабочая полоса частот.

Зависимость фазы отраженной волны от изменения геометрического параметра элемента должна быть вычислена максимально точно [2, 3]. Использование ячейки Флоке является самым распространенным методом расчета [4], он имитирует расчет бесконечной антенной 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  $f/D$  [1], чтобы в достаточной мере принимать сигнал облучателя под всеми углами облучения.

У всех элементов в ОАР должен быть надлежащий интервал между соседними элементами, чтобы избежать дифракционных лепестков. В случае облучения элемента по нормали шаг может быть относительно большим. Для отдаленных элементов угол падения становится большим, соответственно шаг решетки должен быть уменьшен. Требования к шагу определяется следующим выражением [1]:

$$\frac{d}{\lambda_0} \leq \frac{1}{1 + \sin \theta}, \quad (1)$$

где  $d$  – шаг решетки;  $\theta$  – угол облучения элемента.

В ходе выполнения работы были промоделированы элементы ОАР различной конфигурации, исследовано влияние параметров элементов на фазовую зависимость отраженной волны.

Элементом для синтеза ОАР был выбран мальтийский крест (рис. 1). Такой элемент позволяет проектировать ОАР с круговой или двумя ортогональными линейными поляризациями.

Данная излучающая структура описывается следующими параметрами: изменяемым геометрическим размером  $L$ , коэффициентом  $k$ , соотносящим длину нижнего элемента к длине верхнего, толщины подложки  $S$ . Расчет производился методом ячейки Флоке [5]. На рис. 2 показаны фазовые кривые для трех значений толщины подложки.

Диапазон регулировки фазы достигает  $800^\circ$  при  $S/\lambda = 0,08$ . В таком случае может быть выбран удобный, наиболее линейный участок кривой для построения ОАР, для уменьшения влияния погрешностей при производстве [3]. Шаг решетки может быть уменьшен до  $0,5\lambda$  с сохранением диапазона регулировки  $360^\circ$ , что позволит повысить эффективность короткофокусных или офсетных систем, где часть элементов облучается под большим углом [1].

На основе рассмотренного выше элемента был изготовлен экспериментальный образец ОАР для спутниковой связи на основе VSAT-технологии (Very Small Aperture Terminal). Система VSAT является дуплексной, соответственно имеется диапазон частот для приема сигнала (11–12,5 ГГц) и диапазон для передачи (14–14,5 ГГц), общий диапазон составляет более 30%. В то же время диапазоны приема и передачи развязаны по поляризации, следовательно, ОАР может быть построена для работы в независимых диапазонах частот на каждой из поляризаций. Выполненные исследования по изучению элемента ОАР в форме мальтийского креста показывают возможность создания таких решеток.

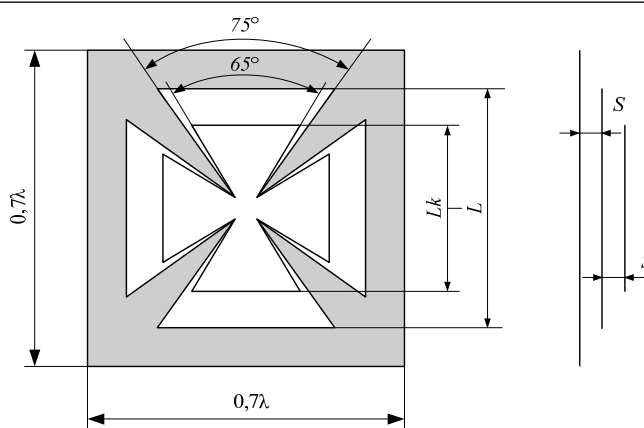


Рис. 1. Двухслойный элемент на основе двух микрополосковых резонаторов в форме мальтийского креста

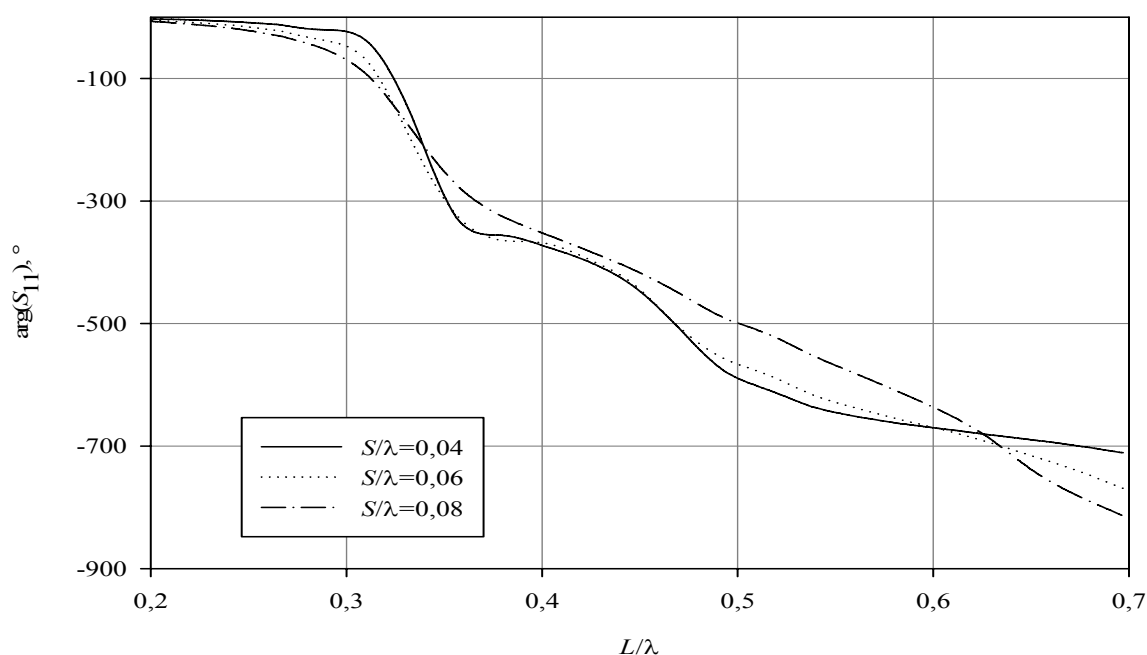


Рис. 2. Зависимость фазы отраженной волны от  $L$  для различных значений толщины подложки

Синтезированный макет ОАР состоял из 20 элементов в горизонтальной плоскости и 24 в вертикальной, размеры ОАР  $240 \times 288$  мм. Для реализации антенны была выбрана офсетная конфигурация, где исключено затенение решетки облучателем. Угол подъема луча составил  $25^\circ$  и равен углу поворота облучателя, что ведет к сложению излученной и отраженной составляющих, что несколько увеличивает КУ. Фокусное расстояние составило 225 мм. В роли облучателя могут быть использованы стандартные конвертеры Ку-диапазона.

На рис. 3 представлена фотография изготовленного макета ОАР.

Несущим слоем ОАР является листовая вспененный ПВХ толщиной 8 мм. Топология макета ОАР выполнена на металлизированном лавсане методом химического травления. Подложка выполнена из вспененного полиэтилена. Предусмотрен держатель, который позволяет использовать стандартные облучатели Ку-диапазона.

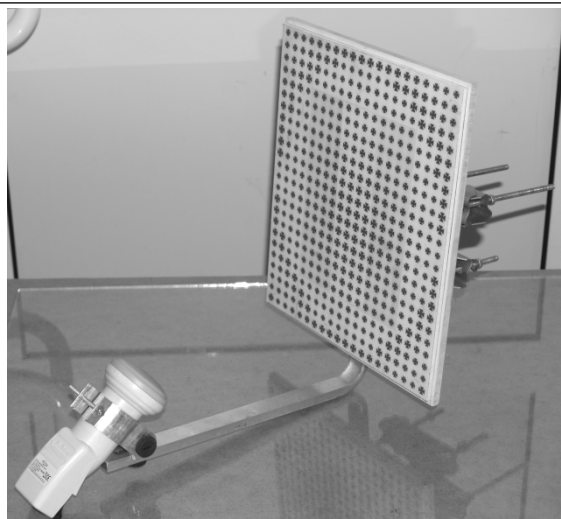
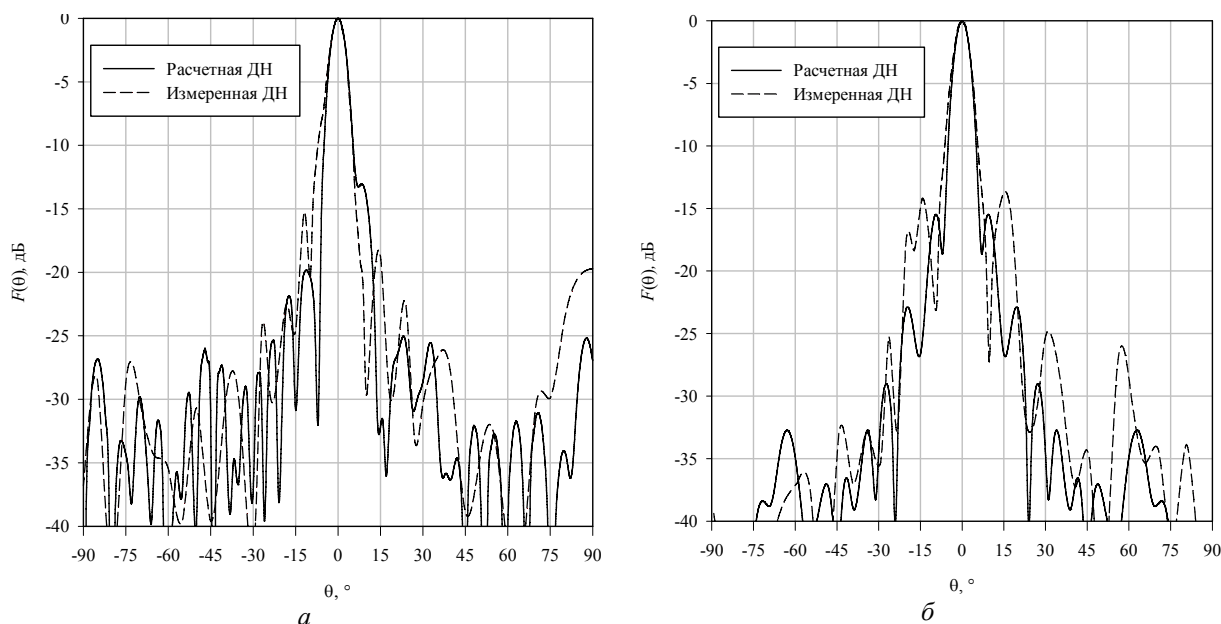


Рис. 3. Фотография макета ОАР

На рис. 4 представлены ДН расчетной модели ОАР и ДН экспериментального образца на частоте 12 ГГц в двух плоскостях.

Рис. 4. ДН ОАР на частоте 12 ГГц: *a* – Е-плоскость; *б* – Н-плоскость

Измеренная ширина ДН (ШДН) соответствует расчетной, однако наблюдается повышенный уровень боковых лепестков (УБЛ). Следует отметить, что на представленной ДН в Е-плоскости произведена привязка максимума главного лепестка к нулю, фактическое положение максимума составило  $25^\circ$ .

На рис. 5 представлены ДН расчетной модели ОАР и ДН экспериментального образца на частоте 14 ГГц в двух плоскостях.

В верхней части диапазона наблюдается значительное расширение измеренной ШДН относительно расчетной, а также значительный рост УБЛ.

На рис. 6, *a* представлены ширины ДН (ШДН) модели ОАР и экспериментального макета. На рис. 6, *б* – расчетный и измеренный УБЛ исследуемой ОАР.

Из приведенных данных видно, что измеренная ширина ДН в начале диапазона меньше расчетной. С увеличением частоты измеренная ширина ДН постепенно увеличивается относительно расчетных значений. В конце диапазона наблюдается противоположный начальному случаю, измеренные значения ширины ДН значительно больше расчетных. Следует отметить, что описанная

ситуация повторяется для двух плоскостей и изменение кривых имеет плавный характер, соответственно это указывает на смещение рабочего диапазона в низкочастотную область.

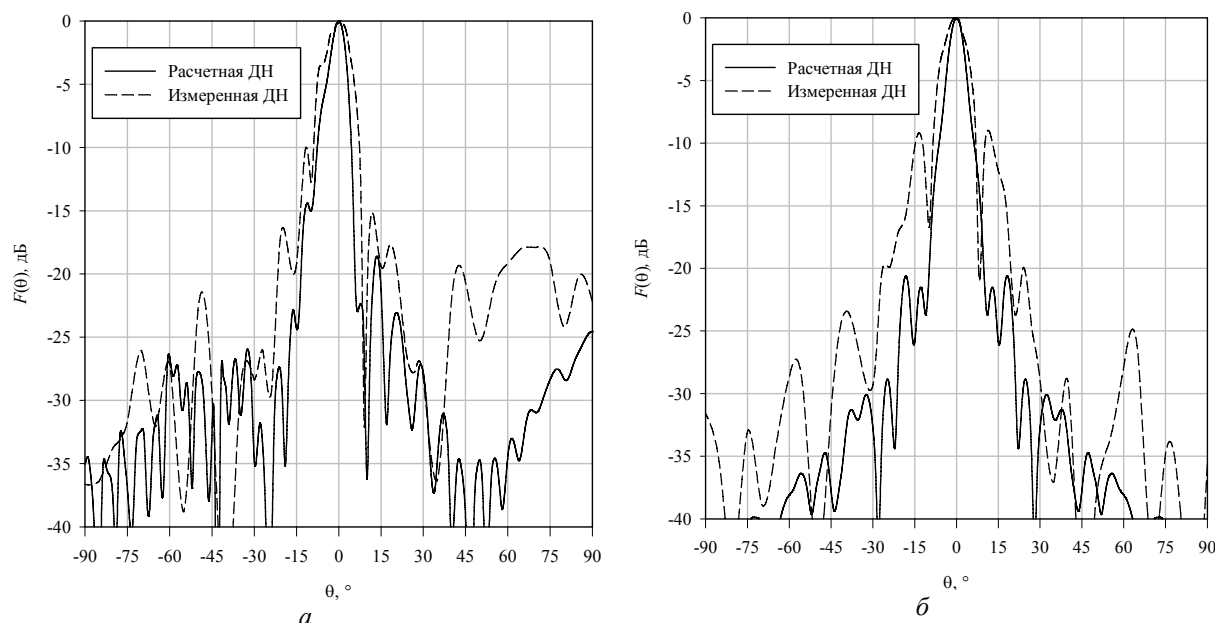


Рис. 5. ДН ОАР на частоте 14 ГГц: а – Е-плоскость; б – Н-плоскость

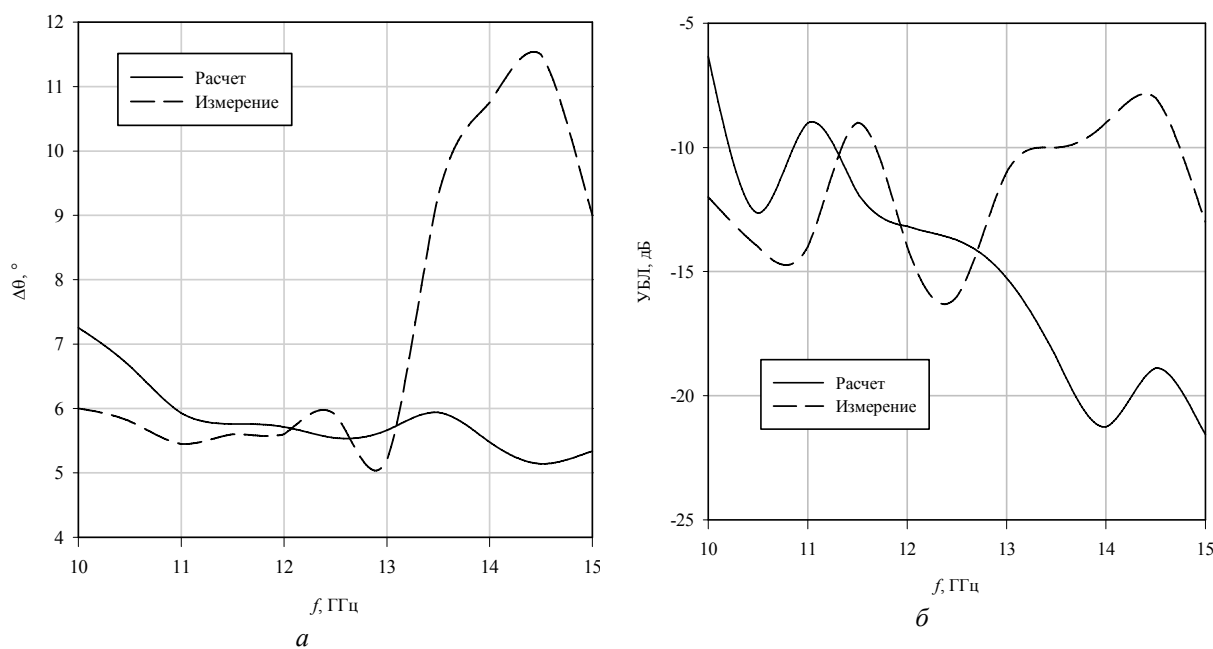


Рис. 6. Расчетные и измеренные: а – ШДН; б – УБЛ

В низкочастотной (НЧ) области диапазона расчетный УБЛ больше измеренного, в высокочастотной области (ВЧ) наблюдается обратная ситуация, что еще раз подтверждает значительный уход рабочей частоты. Нежелательное влияние на характеристики ОАР оказали неточность маски для химического травления и неполный учет диэлектрических материалов конструкции – рабочий диапазон сместился в область низких частот. Повышенный УБЛ макета ОАР по сравнению с расчетными данными связан также с переотражениями от стен и потолка при измерении в помещении. На основной лепесток эти переотражения оказывают меньшее влияние, хотя их влияние было минимизировано путем временной фильтрации запаздывающих составляющих сигнала. Следует отметить, что у ОАР с увеличением размера апертуры УБЛ будет снижаться (в случае идентичных размеров ячеек), так как относительный шаг дискретизации фазы на поверхности решетки будет меньше, соответственно аппроксимация фазового распределения – точнее.

Поставленный эксперимент показал возможность создания эффективных широкополосных микрополосковых отражательных антенных решеток, обладающих плоской конструкцией, имеющих низкую стоимость и массу. Выбранная двухслойная ячейка ОАР на основе элементов в виде мальтийского креста обладает наибольшей полосой рабочих частот среди исследованных структур. Созданный макет обладает смещенной в НЧ область рабочей полосой частот. Нижнюю границу полосы частот определить не удалось, так как нижняя граница рабочих частот облучателя составляет 10 ГГц. Однако полоса частот по уровню ШДН не более  $6^\circ$  составила более 25%, захватив неиспользуемый в технологии VSAT диапазон.

Работа выполнена при поддержке краевого государственного автономного учреждения «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности».

#### *Литература*

1. Reflectarray antennas [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=5067566](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=5067566), платный (дата обращения: 15.03.2010).
2. Tsai F.-C.E. Designing a 161-element ku-Band microstrip reflectarray of variable size patches using an equivalent unit cell waveguide approach/ F.-C.E. Tsai, M.E. Bialkowski // IEEE transactions on antennas and propagation. – 2003. – Vol. 51, № 10. – P. 2953–2962.
3. Inaccuracy estimation of microwave microstrip reflectarray implementation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=4676438](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4676438), платный (дата обращения: 26.03.2010).
4. Поленга С.В. Оптимизация характеристик микрополосковых отражательных антенных решеток / С.В. Поленга, Ю.П. Саломатов // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – С. 152–156.
5. Опыт разработки антенных решёток с квазиоптическим типом питания / С.В. Поленга, Р.О. Рязанцев, Ю.П. Саломатов и др. // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии (Красноярск). – 2011. – № 1. – С. 40–50.

---

#### **Литинская Елена Алексеевна**

Аспирант ИИФиРЭ СФУ, г. Красноярск  
Тел.: +7-923-202-94-61  
Эл. почта: [ilanaLitinska@mail.ru](mailto:ilanaLitinska@mail.ru)

#### **Поленга Станислав Владимирович**

Аспирант ИИФиРЭ СФУ  
Тел.: +7-923-280-29-70  
Эл. почта: [twinlive@gmail.com](mailto:twinlive@gmail.com)

#### **Саломатов Юрий Петрович**

Канд. техн. наук, заместитель директора, зав. каф. радиотехники ИИФиРЭ  
Тел.: +7-319-291-22-78  
Эл. почта: [YSalomatov@sfu-kras.ru](mailto:YSalomatov@sfu-kras.ru)

Litinskaya E.A., Polenga S.V., Salomatov Y.P.

#### **Influence of cells parameters on the characteristics of reflect array**

In the article the influence of cells parameters on the characteristics of reflect array is considered. There are given the experimental research results of designed prototype of an reflect array.

**Keywords:** reflect array, Floquet's unit cell, VSAT.