

В. А. Вечтомов, В. Н. Зимин, А. Н. Кузенков,
Д. В. Дронов, А. А. Козлов

БОРТОВАЯ МНОГОЛУЧЕВАЯ АНТЕННА Ka-ДИАПАЗОНА ДЛЯ ЗОНИРОВАННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ РФ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗЬЮ С ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ДОСТУПОМ

Рассмотрены основные вопросы проектирования многолучевой антенны Ka-диапазона для космических аппаратов на геостационарной орбите, предназначенной для космического сегмента спутниковой системы высокоскоростного доступа. Описаны зоны обслуживания территории РФ остронаправленными лучами многолучевой антенны, сформулированы требования к конструктивному исполнению бортовой антенны космического базирования, приведен математический аппарат расчета электрических характеристик.

Описанная отечественная разработка МЛА для ретранслятора на геостационарной орбите была представлена на авиакосмическом салоне МАКС-2009.

E-mail: vechtomov@bmstu.ru

Ключевые слова: *высокоскоростной доступ, диаграмма направленности, зонированное обслуживание, космический аппарат, многолучевая антенна, ретранслятор.*

Предполагается [1, 2], что к 2017 г. общее количество потенциальных абонентов Российской спутниковой системы высокоскоростного доступа (РСС—ВСД) к информационным сетям достигнет порядка 2 млн. В европейской зоне РФ насчитывается порядка 1,5 млн потенциальных абонентов, а в восточных областях — 0,5 млн. Каждому абоненту РСС-ВСД, создаваемой в интересах широких слоев населения, будут оказываться высококачественные информационные услуги «прямо в дом»: цифровая телефонная связь, широкополосный доступ в Интернет, передача каналов спутникового телевидения, приложения «Телездоровье», «Телеобучение» и др.

В Ka-диапазоне атмосферные затухания сильно зависят от погодных условий, поэтому абонентские терминалы должны работать с углами направления на космические аппараты (КА) не менее 10° . Обслуживание северо-западного региона, особенно Мурманской области, возможно только при размещении КА в точках геостационарной орбиты (ГСО) с восточной долготой $40\dots 65^\circ$. Обслуживание дальневосточных районов РФ и северо-восточных районов Сибири возможно только при расположении КА на ГСО в районе $100\dots 140^\circ$ в. д. По-

этому для работы спутниковой системы целесообразно использование двух КА, один из которых располагается на ГСО в районе 60° в. д., второй — в районе 130° в. д.

Примерное расположение зон обслуживания (ЗО) территории РФ с КА, базирующихся на ГСО в точках 60° в. д. и 130° в. д. приведено на рис. 1.

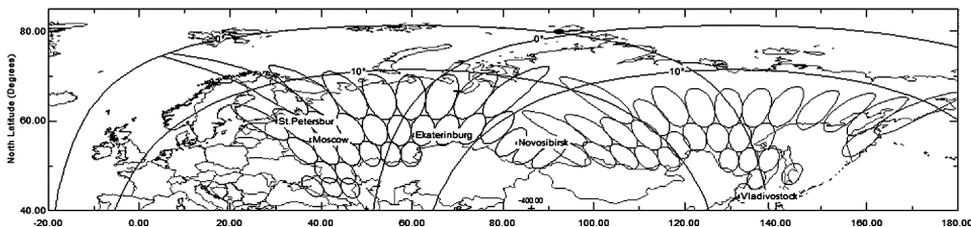


Рис. 1. Зона покрытия территории РФ 64 лучами $0,45^\circ \times 0,45^\circ$ с КА на ГСО 60° в. д. и 130° в. д.

Решение задачи обеспечения населения широкополосной высокоскоростной связью имеет не только экономическое, но и социальное значение. С учетом площади РФ только системы спутниковой связи (ССС) могут обеспечить максимальный охват территории РФ зонами обслуживания (ЗО) с космических ретрансляторов, базирующихся на ГСО. Формирование ЗО территории РФ возложено на многолучевые антенны (МЛА), формирующие десятки и сотни остронаправленных высокоэнергетических лучей.

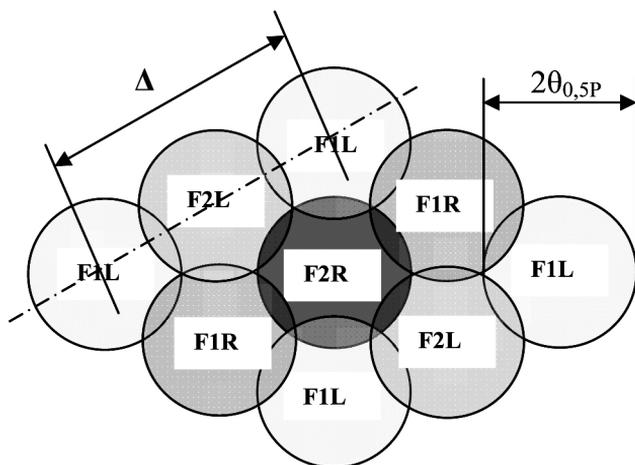
В многолучевой системе возможно многократное использование выделенного частотного ресурса [3]. В проектируемой спутниковой системе связи (ССС) частотный ресурс, согласно решению ГКРЧ, документам МСЭ и СЕРТ выделен в диапазоне $29,5 \dots 30$ ГГц / $19,7 \dots 20,2$ ГГц (полоса частот 500 МГц), используемой для свободного применения VSAT-станций (рис. 2).

Передача ЦЗС	Передача VSAT
27,5 – 29,5 ГГц	29,5–30 ГГц
Прием ЦЗС	Прием VSAT
17,7 – 19,7 ГГц	19,7–20,2 ГГц

Рис. 2. Потенциальный частотный план РСС-ВсД

Двукратное повторное использование выделенной полосы частот и применение двух направлений вектора поляризации позволяет получить частотно-поляризационный план с 4-кратным выигрышем ис-

пользования частотного ресурса. Распределение частот и поляриза-
ций в гексагональной решетке центров лучей приведено на рис. 3.
В качестве исходных данных принято, что в полосе 500 МГц диапа-
зона 29,5...30 ГГц/19,7...20,2 ГГц полоса частот абонентского луча
составляет 250 МГц, а поляризация применяется либо левая (L), либо
правая (R).



**Рис. 3. Четырехцветный частотно-поляризационный план многолучевой ан-
тенны на четыре литеры (две частоты и две поляризации):**

2θ — диаграмма направленности (ДН) луча по заданному уровню мощности; Δ —
минимальный угловой разнос соседних лучей с одинаковой частотой и поляриза-
цией, $\Delta = 1,73 \times 2\theta$

Минимизация уровня суммарных помех, возникающих вслед-
ствие взаимного влияния соседних лучей, возможна при уровне раз-
вязки между лучами по кроссполяризации не менее 25 дБ.

Основными требованиями к антенным системам бортовых ре-
трансляционных комплексов (БРТК) КА, базирующихся на ГСО яв-
ляются:

- обеспечение плотного покрытия заданных ЗО;
- обеспечение высокого коэффициента усиления (КУ) МЛА как в
центральных ЗО, так и в периферийных, с минимальной потерей в КУ;
- обеспечение высокой надежности и работоспособности МЛА в
экстремальных условиях окружающей среды;
- срок активного существования (САС) на ГСО не менее 15 лет;
- неразрушение МЛА при выводе на ГСО при перегрузках: $2g$ —
боковой и $9g$ — осевой и обеспечения ее надежного функциониро-
вания в течение всего САС;
- трансформируемость конструкции МЛА в транспортном и ра-
бочем положениях для размещения ее в пределах зоны полезной
нагрузки ракеты-носителя (РН) под обтекателем.

За рубежом МЛА широко используются в БРТК как с бортовой цифровой платформой, в режиме с бортовой обработкой сигнала, так и при работе в режиме прямой ретрансляции [3, 4].

Примером таких БРТК являются КА Anik-F2 и Thaicom-4, которые базируются на ГСО и предназначены для обеспечения населения широкополосным доступом в Интернет, передачи каналов спутникового телевидения, предоставления услуг отдаленным населенным пунктам через приложения «Телездоровье», «Телеобучение» и др. КА Anik-F2 обслуживает территорию Северной Америки, предоставляя услуги 1 млн пользователей. КА Thaicom-4 обслуживает узкими и контурными лучами Азиатско-Тихоокеанский регион, формируя с помощью семи МЛА 94 луча в Ku диапазоне и 18 лучей в Ka диапазоне. Прием осуществляется на земные станции с антеннами диаметром 1,2 м и 1,8 м. Максимальная пропускная способность ретранслятора КА составляет 45 Гбит/с.

Опытный образец бортовой МЛА [11] (рис. 4), разработанный в рамках реализации российской части научно-технической программы Союзного государства РФ и БР (шифр «Функциональная СВЧ-электроника-2»), позволит обеспечить обслуживание территории РФ спутниковой связью остронаправленными лучами $0,45^\circ \times 0,45^\circ$, реализуя высокоскоростной доступ к интерактивным услугам населению. Опытный образец бортовой МЛА демонстрировался на авиакосмическом салоне МАКС-2009.

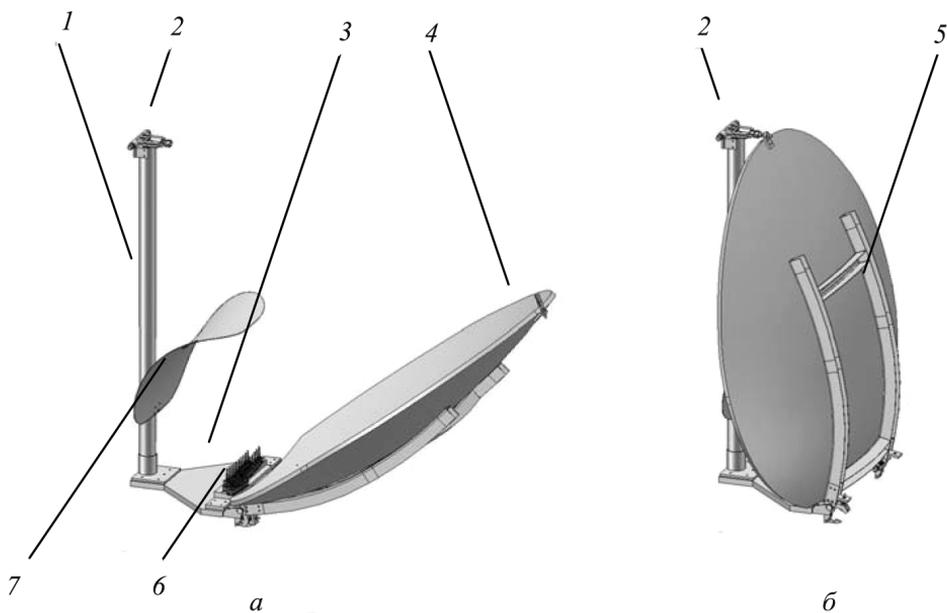


Рис. 4. 3D-модель проектируемой МЛА для РСС-ВСД:

а — рабочее положение МЛА; *б* — транспортное положение МЛА

Бортовая МЛА должна работать в более высоком частотном диапазоне [1], что требует более жестких допусков на воспроизведение расчетного профиля поверхности зеркал, допусков на установку облучателей в решетке и изготовления других элементов конструкции МЛА (устройства разворачивания и фиксации большого зеркала в рабочем положении и т. п.). Кроме того, необходима запрессовка в конструкцию зеркал тонкой сетки из серебра или позолоченной вольфрамовой проволоки для повышения коэффициента отражения от поверхности зеркала из композиционного материала.

Исходными данными для проектирования бортовой МЛА космического сегмента ССС были приняты следующие:

1) рабочая частота:

на передачу — 19,7 ... 20,2 ГГц,

на прием — 29,5 ... 30,0 ГГц;

2) ширина парциального луча: $0,45^\circ \times 0,45^\circ$;

3) уровень боковых лепестков $-24 \dots -28$ дБ;

4) поляризация приемной антенны — левая круговая,
поляризация передающей антенны — правая круговая;

5) максимальный диаметр большого зеркала, помещающийся под облучателем:

перпендикулярно оси РН — 2500 мм,

по оси РН — не более 3 300 мм;

6) конструкция МЛА должна быть трансформируема для размещения под обтекателем РН;

7) масса образца МЛА — не более 40 кг.

Для проектирования МЛА за основу принята [7, 8] двухзеркальная антенная система с многоэлементным облучателем. Каждой ЗО соответствует излучатель, нацеленный на центр этой зоны.

В ретрансляторе КА предполагается применить отдельные приемную и передающую МЛА. Учитывая значительное отличие рабочих частот, их отдельное выполнение позволит оптимизировать антенны по максимуму КУ, снизить уровень боковых лепестков (УБЛ) и уменьшить кроссполяризационное излучение, а также точнее выдержать взаимное соответствие ЗО на прием и передачу.

Как приемная, так и передающая МЛА состоит из следующих узлов (см. рис. 4): стойка крепления малого зеркала (1); зачековка большого зеркала (2); платформа с механизмом раскрытия и фиксации большого зеркала в рабочем положении (3); большое зеркало (4); рама крепления большого зеркала (5); неэквидистантная решетка излучателей (6); малое зеркало (7).

Кроме того, разделение приемной и передающей МЛА позволит расположить их по разные стороны от корпуса приборного отсека модуля полезной нагрузки КА, что удобно при компоновке ретранс-

лятора КА (рис. 5). В этом случае элементы конструкции КА не «затеняют» формируемые МЛА лучи. Вариант компоновки антенн на КА проектируемой ССС РСС-ВСД показан на рис. 5.

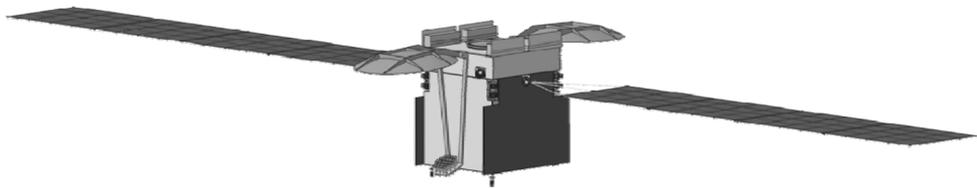


Рис. 5. Вариант компоновки КА с отдельными приемной и передающей МЛА

Основные трудности при выборе схемы построения антенной системы МЛА связаны с формированием большого числа парциальных лучей и отклонением их значительной части от оси системы на угол, превышающий в 7—9 раз ширину центрального парциального луча. Устранение aberrаций для отклоненных лучей в них достигается применением специальной формы одного или двух зеркал.

Для зеркальных систем, у которых сектор сканирования вытянут в одной плоскости (территория РФ вытянута в меридиональной плоскости примерно в 5 раз), хорошие характеристики можно получить, применяя зеркала тороидального типа. У двухзеркальной антенны с зеркалами тороидального типа сектор сканирования вытянут в плоскости, ортогональной оси тороида, а вспомогательное зеркало в этой плоскости близко по форме зеркалу типа Кассегрена. Поскольку в плоскости оси тороида требуемая ширина сектора сканирования существенно меньше, в этой плоскости форма зеркала не обязательно будет кассегреновская.

Главное зеркало в плоскости оси тороида описывается кривой четвертого порядка, мало отличаясь по форме от параболы, а сечение малого зеркала в этой плоскости близко по форме к эллипсу, один из фокусов которого находится рядом с фокусом параболы сечения главного зеркала. В целом, малое зеркало имеет отрицательную гауссову кривизну, а характеристики такой антенны сочетают в себе свойства как антенны Кассегрена, так и антенны Грегори. Малое зеркало не затеняет апертуру главного зеркала, а решетка облучателей, формирующих многолучевую диаграмму направленности (ДН), размещена вблизи края главного зеркала, ближайшего к вспомогательному. Главное зеркало представляет собой тороид, ограниченный плоскостью апертуры. Оси тороидальных главного и вспомогательного зеркал предполагаются параллельными. Размеры, форма и расположение зеркал и решетки облучателей оптимизируются по минимуму aberrаций и кроссполяризации в секторе сканирования. Многопараметрическая максимизация эффективной площади антенны проводилась с использованием функционала следующего вида [8]:

$$S_{\text{eff}} = \frac{\left| \iint_A f(\vartheta(x, y), \varphi(x, y)) \exp(i(\varepsilon(x, y) - kH_f(x, y))) \sqrt{\left(\mathbf{V}, \left[\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial x}, \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial y} \right] \right)} dx dy \right|^2}{\iint_{\Omega} |f(\vartheta, \varphi)|^2 \sin \vartheta d\vartheta d\varphi}, \quad (1)$$

где $f(\vartheta, \varphi)$ — ДН облучателя; $H_f(x, y)$ — длина оптического пути от фазового центра облучателя до плоскости апертуры главного зеркала (точечная функция Гамильтона двухзеркальной антенны); $\mathbf{V}(\vartheta, \varphi)$ — единичный вектор с началом в фазовом центре облучателя и ориентированный по направлению рассматриваемого луча, приходящего после отражения от малого и главного зеркал в точку с координатами $\{x, y\}$ в плоскости апертуры главного зеркала; $\varepsilon(x, y)$ — угол наклона вектора кроссполяризации рассматриваемого луча в плоскости апертуры главного зеркала.

Проектирование антенной системы проводилось с помощью комплексов компьютерного моделирования HFSS, FEKO и специально разработанных пакетов прикладных программ, позволяющих (с учетом возможностей доступных вычислительных средств) проводить оптимизацию принятых технических решений.

Результаты предварительных расчетов параметров антенн (габариты, вес и некоторые электрические характеристики) сведены в таблицу.

Основные параметры антенн КА

Тип антенны	Ширина ДН по уровню половинной мощности, град	Диаметр, мм	УБЛ, дБ	КУ, дБ	Масса, кг
Передающая	0,45×0,45	2500	-26,6	53	35
Приемная	0,45×0,45	2200	-30,6	53	30

В многоэлементном облучателе МЛА предполагается использовать волноводный излучатель с ребристо-стержневой структурой [7].

По мере увеличения размеров бортовых антенн КА серьезным конструктивным ограничением становится возможность их размещения под обтекателем РН. В связи с этим проектируемые МЛА для КА имеют различные конфигурации в транспортном и рабочем состоянии на орбите (см. рис. 4). Для размещения МЛА под обтекателем РН трансформируемые элементы антенны должны быть определенным образом уложены в компактное транспортное положение [6, 9]. По-

сле вывода КА на ГСО все трансформируемые элементы конструкций антенн раскрываются по заданной программе.

Кинематическая схема раскрытия элементов конструкций антенн должна обеспечить надежное раскрытие и фиксацию элементов конструкции МЛА в рабочем положении с обеспечением заданных требований по надежности, прочности и точности положения.

Надежность процесса раскрытия и фиксации элементов конструкций МЛА зависит, во-первых, от сложности движения элементов конструкции и возможности обеспечения резервирования исполнительных элементов (приводов) и, во-вторых, от возможности конструкции достигать высокой позиционной стабильности.

Жесткость и прочность элементов антенны на участке ее выведения на ГСО в составе КА, когда действуют максимальные механические нагрузки, обеспечивают также замки зачековки, входящие в устройства фиксации.

Величины инерционных нагрузок определяются осевой и боковой перегрузками. Учитывая, что для вывода космического ретранслятора на ГСО могут быть использованы космические ракетные комплексы «Днепр-1», «Стрела», либо РН «Протон» и «Союз», при прочностных расчетах конструкций элементов МЛА предельные перегрузки приняты равными: осевая перегрузка $9g$; боковая — $2g$.

В транспортном положении большее зеркало антенны находится в пределах зоны полезной нагрузки РН под обтекателем (рис. 4, б). После выведения КА на ГСО трансформируемый элемент конструкции МЛА (большое зеркало антенны) раскрывается по заданной программе. Малое зеркало антенны неподвижно и закреплено на стойке 1, рис. 4, а в своем рабочем положении. В процессе движения элемента трансформируемой конструкции МЛА происходит его фиксация в рабочем положении, при этом раскрытие может выполняться как принудительно с помощью электропривода, так и за счет потенциальной энергии, запасаемой в специальных пружинах.

Программа приведения МЛА из транспортного положения в рабочее состоит из следующих этапов. Сначала срабатывает пиромеханизм замка зачековки устройства фиксации большого зеркала антенны. Толкатель устройства фиксации страгивает большое зеркало вместе с рамой. Далее происходит разворот большого зеркала на соответствующий угол с помощью механизма раскрытия. Зеркало принимает рабочее положение с заданной точностью по координатам и углам с помощью устройств фиксации. Выведение зеркала в рабочее положение осуществляется поворотным механизмом (узел раскрытия), закрепленным на станине.

Основные требования к материалу зеркал МЛА:

- стабильность размеров зеркала и точность ее рабочей поверхности при изготовлении и эксплуатации;
- прочность элементов конструкции МЛА;
- жесткость и отсутствие собственных частот колебаний в заданной рабочей полосе.

Конструкция и материал зеркал МЛА должны удовлетворять всем этим требованиям и при этом иметь минимальную массу [7].

При проработке конструкции аналога бортовой МЛА РСС-ВСД был выбран материал для изготовления элементов МЛА, проведены расчеты прочностных характеристик зеркал, размеростабильности в полосе рабочих температур выбранного материала, из которого изготовлена МЛА, на модели определены собственные частоты и рассчитаны формы ее собственных колебаний [7, 10, 11].

Важнейшим требованием, определяющим работоспособность таких конструкций, является сохранение заданных размеров при воздействии радиации и других факторов космического пространства и, в первую очередь, температуры.

Прочностные расчеты выполнены с использованием конечно-элементной модели, конструкции МЛА, на которой проведен анализ деформирования и разрушения многослойных композитов, построены диаграммы деформирования и поверхности прочности при одно- и двухосном нагружении [7]. Максимальные напряжения в обшивках большого зеркала появляются при действии осевой перегрузки, равной $9g$ и боковой — $2g$.

Кроме того, рассчитывались первые 10 частот и форм собственных колебаний модели МЛА в транспортном положении. Установлено, что формы собственных колебаний обусловлены, в основном, колебаниями большого зеркала [7].

Материал зеркал, рамы крепления, станины и стойки выполнены из композитного материала на основе углепластика. В качестве композиционной структуры использовалась углеродная лента ЛУ-П/0.1А ГОСТ 28006–88 и модифицированный эпоксидный связующий клей ЭНФБ ТУ 1-596-36–98 с толщиной монослоя 0,11...0,13 мм.

При больших температурных интервалах учитывались как температурные зависимости КЛТР, так и прочностные характеристики композита. Расчет прочности и КТЛР конструкций МЛА проводился с использованием пошаговых процедур с кусочно-линейной аппроксимацией температурных деформаций на каждом шаге по температуре.

В качестве композиционной структуры использовалась углеродная лента ЛУ-П/0.1А ГОСТ 28006–88 и модифицированный эпоксидный связующий клей ЭНФБ ТУ 1-596-36–98 с толщиной монослоя 0,11...0,13 мм.

При больших температурных интервалах учитывались как температурные зависимости КЛТР, так и жесткостные (прочностные) ха-

рактические характеристики композита. В этом случае расчет МЛА аналога проводился с использованием пошаговых процедур с кусочно-линейной аппроксимацией температурных деформаций на каждом шаге по температуре. При этом задача поиска оптимальных сочетаний свойств композитной конструкции принципиально не усложняется; необходимо лишь использовать вместо текущих значений КЛТР соответствующие интегральные характеристики для данного температурного диапазона.

Для прочностных расчетов конструкций МЛА была разработана теоретическая конечно-элементная модель конструкции МЛА с использованием которой проведен анализ процессов деформирования и разрушения многослойных композитов, построены диаграммы деформирования и поверхности прочности при одно- и двухосном нагружении.

Экспериментальный образец МЛА, демонстрировавшийся на авиакосмическом салоне «МАКС-2009», представлен на рис. 6.



а



б

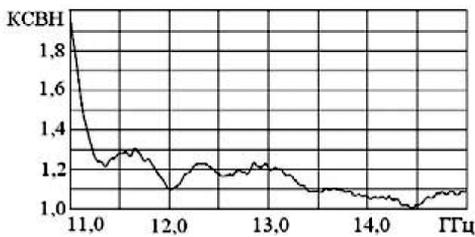
Рис. 6. Экспериментальный образец МЛА:

а — сборка; *б* — экспонат авиакосмического салона «МАКС-2009» (павильон С)

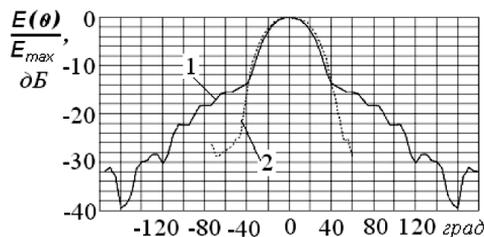
В соответствии с программой испытаний проводились измерения коэффициентов отражения от поверхности зеркал, характеристики излучателей, ДН и КУ парциальных лучей МЛА.

Результаты испытаний излучателя приведены на рис. 7. При достаточно высокой развязке между парциальными лучами в многолучевом режиме возможен частотно-поляризационный план с 4-кратным использованием частот, что к настоящему времени не достигнуто ни на одном из отечественных КА.

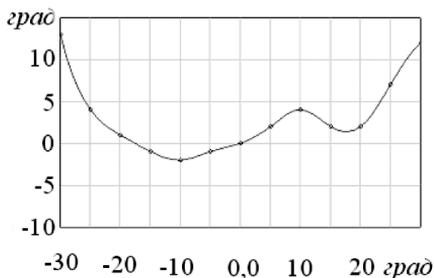
МЛА позволяет формировать контурные лучи для создания прозрачных стволов (каналов прямой ретрансляции) для работы с уже существующей сетью наземных станций, что обеспечит преемственность частотных планов с уже действующими спутниками (например,



a



б



в

Рис. 7. Результаты испытаний излучателя:

a — зависимость КСВН на входе излучателя от частоты; *б* — амплитудная ДН излучателя; *в* — фазовая ДН излучателя

переход от частотного плана Intelsat («Экспресс-А») к частотному плану Eutelsat, который принят на новых спутниках «Экспресс-АМ»). МЛА практически полностью изготавливается из углепластика с использованием самых современных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обеспечение высокоскоростного доступа к информационным сетям через системы спутниковой связи. В 7 кн. Кн. 3. Системный проект. — М.: ОАО «РКС», 2010. — 244 стр.
2. Анпилогов В. Р. Современные спутники связи и вещания. Какой спутник нужен России // Приложение к журналу «Технологии и средства связи». Спец. вып. — 2006. — № 5 (50). — С. 16–22.
3. Аносов А. М., Бей Н. А., Вечтомов В. А. Некоторые вопросы реализации бортовых многоручевых антенн // Антенны. — 2005. — Вып. 10 (101). — С. 19—23.
4. Верзунов Г. В. Бортовая обработка сигналов: перспективы и проблемы // Технологии и средства связи. Спец. вып. — 2007. — С. 52–58.
5. Симонов М. М. Спутники — новые возможности в Азии // Приложение к журналу «Технологии и средства связи». Спец. вып. — 2006 — № 5 (50). — С. 28–33.
6. Chu Ta-shing, Iannone P. P. Radiation Properties of a Parabolic Torus Reflector // IEEE Tr. on Antennas and Propagation, July 1989. — Vol. 37. No. 7. — P. 865–873.

7. Бортовая многолучевая антенна космического ретранслятора / Н.А. Бей, В.А. Вечтомов, Е.Н. Гуркин и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. Спец. вып. Антенны и устройства радио- и оптического диапазонов. – 2009. – С. 8–17.
8. Гуркин Е. Н., Коган Б. Л. Двухзеркальная система для антенны с широким сектором формирования лучей в одной плоскости / Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. Спец. вып. Антенны и устройства радио- и оптического диапазонов. – 2009. – С. 23–28.
9. Баслых К. П., Бей Н. А., Вечтомов В. А., Зимин В. Н. Особенности реализации раскрывающейся бортовой многолучевой антенны // Решетневские чтения: материалы XIII Междунар. науч. конф., посвящ. 50-летию Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. академика М.Ф. Решетнева. – Красноярск, 2009. – Ч. I. – 384 с.
10. Алфутов Н. А., Зиновьев П. А., Попов Б. Г. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
11. Зиновьев П. А. Прочностные, термоупругие и диссипативные характеристики композитов // Композиционные материалы: Справочник / Под ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – С. 232–267.
12. Зиновьев П. А. Термостабильные структуры многослойных композитов // Механика конструкций из композиционных материалов: Сб. науч. статей / Под ред. В.Д. Протасова. – М.: Машиностроение, 1992. – С. 193–207.
13. Многолучевая антенна геостационарного космического ретранслятора системы спутниковой связи / Н.А. Бей, В.А. Вечтомов, В.Н. Зимин и др. // Материалы XVI Междунар. Научно-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж, 2010. – Т. 2.

Статья поступила в редакцию 17.09.2012