

РАЗРАБОТКА МНОГОЛУЧЕВЫХ ДВУХЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН С ШИРОКИМ СЕКТОРОМ ОБЗОРА ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И ЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Пластиков А. Н.

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия

Среди различных типов антенных систем (АС) повышенной эффективности можно выделить класс многолучевых антенн – антенн с несколькими независимыми входами, каждому из которых соответствует своя пространственная диаграмма направленности (ДН), которую принято называть лучом АС. Очевидным преимуществом многолучевых антенн перед антеннами, работающими по одному лучу, является использование одной апертуры для формирования нескольких лучей, что позволяет одной подобной антенне заменить определенное число «обычных» однолучевых антенн.

На практике значительный интерес могут представлять многолучевые зеркальные антенны (МЗА), имеющие простейшую диаграммообразующую схему облучающей решетки, когда каждый луч АС формируется отдельным облучателем. Вследствие этого основная проблематика разработки МЗА связана непосредственно с проектированием самой системы зеркал. Достоинствами МЗА являются потенциальная широкополосность и большая энергетическая эффективность.

Сегодня разработка МЗА **актуальна** как для наземных, так и для бортовых радиотехнических систем. При этом в зависимости от решаемых задач, от таких АС может требоваться обеспечивать одномерный или двумерный сектор обзора. Так, АС земных станций спутниковой связи имеют веер лучей, направленных на спутники, размещенные на дуге геостационарной орбиты, причем каждый луч АС может наводиться на свой спутник независимо от других лучей; сектор обзора таких систем близок к одномерному и может достигать нескольких десятков градусов. Бортовые спутниковые МЗА, находящиеся на геостационарной или высокоэллиптической орбите и обозревающие всю видимую поверхность Земли или ее часть, могут иметь двумерный сектор обзора шириной до 18° и более с произвольной формой внешней границы.

Среди возможных вариантов построения МЗА широкое распространение получили «классические» конструкции на основе однозеркальных параболических антенн, двухзеркальных антенн Кассегрена и Грегори, сферических и тороидально-параболических АС. Однако однозеркальные параболические и двухзеркальные антенны Кассегрена и Грегори обычно, при разумных с практической точки зрения отношениях фокусного расстояния к диаметру апертуры, имеют сектор обзора, не превышающий нескольких градусов или нескольких ширин ДН, что вызвано появлением значительных фазовых искажений (аббераций) при отклонении луча АС от ее оси, вызывающих существенную деградацию вторичного поля излучения АС – уменьшение коэффициента направленного действия (КНД), рост уровней бокового и кроссполаризационного излучения. Сферические и тороидально-параболические МЗА принципиально обладают широкими секторами обзора, однако их эффективность с точки зрения коэффициента использования поверхности (КИП) всего раскрыва главного зеркала достаточно низка.

Таким образом, проблема проектирования МЗА обычно представляет собой задачу оптимизации электрических характеристик АС при ограничениях на допустимые габариты всей АС и отдельных ее элементов – главного зеркала, вспомогательных зеркал, облучателей. Приведенный в работе автора [1] обзор

литературных источников, посвященных вопросам теории и техники МЗА, показал, что перспективными и, одновременно, недостаточно полно исследованными в литературе вариантами построения МЗА являются конструкции двух типов офсетных двухзеркальных антенн – бифокальных антенн и АС с нестандартной (по сравнению с широкоизвестными антеннами Кассегрена и Грегори) оптической схемой с классическими профилями зеркал в виде конических поверхностей второго порядка – антенн Кассегрена с вогнутыми гиперболическими контррефлекторами (АКВК).

Цель настоящей **работы** заключается в исследовании и оптимизации характеристик двух отмеченных типов МЗА и разработке на их основе эффективных зеркальных антенн для бортовых спутниковых систем и наземных станций-телепортов спутниковой связи, предназначенных, прежде всего, для работы в сантиметровом и миллиметровом диапазонах частот. Улучшение характеристик МЗА по сравнению с характеристиками распространенных на сегодняшний день вариантов таких АС позволит создавать более эффективные многолучевые радиотехнические системы, что, в свою очередь, позволит улучшить массо-габаритные показатели бортовых антенн, снизить затраты на изготовление и эксплуатацию наземных систем телепортов спутниковой связи, а, следовательно, делает соответствующие исследования **перспективными**.

В качестве основных электрических характеристик МЗА, характеризующих эффективность таких антенн, рассматриваются величины КИП, также оцениваются уровни бокового и кроссполаризационного излучения. Большая часть исследований проведена для АС с идеализированными моделями облучателей, однако вопросам проектирования облучателей МЗА, в том числе для антенн с высоким уровнем пересечения соседних лучей АС, уделено отдельное внимание. Для проведения исследований использованы асимптотические токовый (программные пакеты Tisra GRASP и ICARA) и апертурный (собственное программное обеспечение для синтеза и оптимизации бифокальных зеркальных антенн (БЗА), написанное в программной среде Mathlab) методы расчета полей излучения зеркальных антенн. При проектировании облучателей использован метод конечного интегрирования (finite integration technique) во временной области расчета, реализованный в программе CST Microwave Studio [2].

На примере антенн с диаметрами апертюры 100 длин волн и одинаковой величиной эквивалентного фокусного расстояния подтверждено преимущество офсетной АКВК и боковым возбуждением перед антенной того же типа, но с фронтальным возбуждением, в части уменьшения габаритных размеров всей АС и увеличения ширины рабочего углового сектора в плоскости симметрии.

Для оценки эффективности двухзеркальных антенн с крупными контррефлекторами введен в рассмотрение критерий коэффициента использования поверхностей зеркал (КИПЗ), равный отношению эффективной площади зеркальной антенны к сумме площадей поверхностей обоих рефлекторов, в дополнение к КИП.

Для работы в качестве многолучевой антенны для геостационарного спутника, покрывающей лучами всю видимую поверхность Земли, спроектирована АКВК с боковым возбуждением с коническим сектором обзора с углом при вершине конуса 18° и шириной ДН около 1° . На ее примере исследованы возможность улучшения эффективности АС на краю сектора обзора посредством увеличения габаритов контррефлектора относительно исходных, определяемых геометрической оптикой, а также влияние ширины ДН облучателя на характеристики АС. Показано, что при использовании упрощенной схемы расположения облучателей в составе «плоской решётки», когда фазовые центры облучателей расположены в одной плоскости с параллельными друг другу направлениями излучения, увеличение размеров контррефлектора антенны позволяет получить существенный прирост КИП и КИПЗ в области лучей вблизи краёв сектора обзора.

Разработана процедура синтеза профилей рефлекторов бифокальных зеркальных антенн (БЗА), позволяющая проектировать такие антенны с широким одномерным сектором обзора шириной до нескольких десятков градусов. Данную процедуру синтеза можно считать частным случаем общей методики проектирования БЗА, предложенной в работах Б. Е. Кинбера и соавторов, в которых, однако, нет конкретных примеров реализации БЗА. Характерными особенностями предлагаемой процедуры являются упрощение методики синтеза БЗА и, как следствие, минимизация числа возможных ограничений, а также повышение КИП главного зеркала. Соответствующие алгоритмы синтеза БЗА реализованы в программном коде в среде математического пакета Matlab. Данный программный код также дополнен подпрограммой оценки и оптимизации эффективности многолучевых БЗА по критерию КИП, использующей апертурный метод расчета, учитывающий геометрический закон преобразования волнового фронта облучателя в волновой фронт АС в плоскости апертуры и поляризационные искажения, вносимые самой зеркальной системой.

Применение предлагаемой процедуры синтеза БЗА позволило спроектировать многолучевые антенны данного класса с наиболее широким сектором обзора (до 50°) при большем коэффициенте направленного действия (более 50 дБ) по сравнению с вариантами БЗА, известными по зарубежным литературным источникам. При сопоставимых отношениях диаметра раскрыва антенны к длине волны характеристики одной из спроектированных БЗА, имеющей сектор обзора 50° и КНД более 52 дБ и разработанной для работы в составе наземного телепорта спутниковой связи, по нескольким показателям качества (ширина сектора обзора, КИП, продольные габариты антенны, угловой разнос соседних лучей, размеры облучателей относительно длины волны) превосходят характеристики известной коммерческой многолучевой зеркальной антенны Ку-диапазона, разработанной в австралийской лаборатории CSIRO.

На основе рассмотрения нескольких различных возможных вариантов построения оптической схемы БЗА впервые предложена классификация данного класса антенн по вариантам взаимного положения рефлекторов и облучателей и картинам хода геометрооптических лучей в двух ортогональных плоскостях, позволяющая на стадии проектирования рассматривать различные варианты компоновки АС БЗА.

По результатам представленной работы автором написана и защищена диссертация [1], а также подготовлен и опубликован ряд работ [2–8]. Получено три акта об использовании результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пластиков А. Н. Проектирование многолучевых офсетных двухзеркальных антенн с однокоординатным и двухкоординатным сканированием: Дис. ... к-та техн. наук. — М., 2013. — 186 с.
- [2] Пластиков А. Н. Моделирование многолучевой зеркальной антенны, построенной по схеме Драгоне // Сборник трудов 5-й Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь», Москва, 2011. — С. 391-395.
- [3] Пластиков А. Н. Исследование возможностей сканирования двух многолучевых зеркальных антенн, построенных по схеме Драгоне // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2012. — № 2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/iso/feb12/14/text.html>.
- [4] Plastikov A. N., Kogan B. L. A novel way for designing bifocal reflector antennas // Proceedings of the Progress in Electromagnetics Research Symposium, Moscow, 2012. — P. 1204-1207.
- [5] Пластиков А. Н., Коган Б. Л. Проектирование многолучевых офсетных

двухзеркальных антенн с однокоординатным и двухкоординатным сканированием // Сборник трудов 6-й Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь», Москва, 2012. – Т.1. – С. 54-57.

[6] Plastikov A. N., Kogan B. L. About a new procedure for offset bifocal reflector antennas synthesis // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013. – Vol. 12. – P. 512-515.

[7] Plastikov A. N., Kogan B. L. Bifocal reflector antenna design procedure for wide-angle multi-beam applications // Proceedings of the 7th European Conference on Antennas and Propagation, Gothenburg, Sweden, 2013. – P. 3246-3250.

[8] Пластиков А. Н. Многолучевые офсетные антенны Кассегрена с нестандартной оптической схемой для космических аппаратов: история, возможности и перспективы // Сборник трудов научно-технического семинара «Перспективы развития антенно-фидерных устройств летательных аппаратов», ОАО «НИИЭМ», г. Истра, 2013. – С. 86-92.