Handwritten signature in cursive script, reading "Милосердов".

МИЛОСЕРДОВ Александр Сергеевич

**Бортовые многолучевые антенные решётки для систем спутниковой связи**

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Диссертационная работа выполнена на кафедре 406 «Радиофизика, антенны и микроволновая техника» Московского Авиационного Института (национального исследовательского университета).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Пономарев Леонид Иванович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Калошин Вадим Анатольевич

доктор технических наук, профессор  
Нечаев Евгений Евгеньевич

Ведущая организация: ОАО «Радиофизика»

Защита диссертации состоится «28» октября 2014 г. в 15:30 на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 в Московском Авиационном Институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте [ma.i.ru](http://ma.i.ru) и в библиотеке Московского Авиационного Института (национального исследовательского университета).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д212.125.03, д.т.н.



М.И. Сычев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы диссертации**

В последние десятилетия наблюдается интенсивное развитие систем спутниковой связи. Спутниковая связь основана на использовании искусственных спутников Земли в качестве ретрансляторов. Подобные системы решают проблему обеспечения связью и других видов мультимедийных услуг с широкополосным доступом (интернет, телевидение и т.д.) для многочисленной группы абонентов в пределах территорий развитых стран и сопредельных государств.

Важнейшим моментом при разработке спутниковых ретрансляторов является создание бортовых многолучевых антенных устройств, обеспечивающих высокий энергетический потенциал для принимаемого и ретранслируемого сигналов в направлениях абонентов, находящихся в любой видимой с геостационарной орбиты точке земной поверхности. Существующие в настоящее время зеркальные и гибридно-зеркальные многолучевые антенны не обеспечивают требуемую эффективность связи. Кроме того, большие габариты гибридно-зеркальных антенн в рабочем положении не позволяют размещать их под обтекателем полезной нагрузки ракетополетителя без трансформации в транспортное положение, что снижает надежность этих устройств. Поэтому построение бортовой многолучевой антенны, имеющей малый вес и продольные размеры и позволяющей осуществить цифровое диаграммообразование в пределах требуемого сектора обзора с возможной адаптацией характеристик направленности к помеховой ситуации, является актуальнейшей задачей дальнейшего развития систем спутниковой связи.

Значительный вклад в развитие многолучевых антенн внесли следующие ученые: В.А. Калошин, А.В. Шишлов, Л.И. Пономарев, Н.А. Бей, В.А. Вечтомов, В.Р. Антипов, С.П. Скобелев, А.П. Дятлов, А.Н. Пластикова, С. Chandler, L. Hoyer, W. Cummings. Также вопросами теории и разработки устройств в этой области занимались такие известные специалисты, как Д.И. Воскресенский, Г.А. Евстропов, Г.К. Галимов, В.И. Джиган, Р.А. Монзинко, Д.М. Сазонов и др.

### **Цель работы**

Целью данной работы является исследование путей построения приемных бортовых многолучевых антенных решеток для систем спутниковой связи (ССС), обоснование наибо-

лее целесообразной схемы построения многолучевой антенной решетки (МАР) для системы глобальной спутниковой связи и исследование предельно достижимых характеристик направленности антенн при ограничениях на массогабаритные и эксплуатационные характеристики, характерные для спутниковых антенн.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие основные задачи:

- проведен аналитический обзор существующих типов спутниковых антенн, и установлены требования предъявляемые к характеристикам и параметрам перспективных многолучевых бортовых антенн для систем спутниковой связи;
- предложена и обоснована двухступенчатая схема построения МАР в виде системы из многолучевых крупноапертурных излучателей (КАИ), позволяющая обеспечить заданный для глобальной космической связи ( $\pm 8,7^\circ$ ) сектор обзора и требуемые характеристики направленности АР при минимальном числе излучателей;
- проведено электродинамическое моделирование различных типов крупноапертурных излучателей с использованием программного комплекса ФЕКО и специально разработанных алгоритмов, позволяющее установить предельные характеристики направленности различных типов крупноапертурных излучателей;
- разработан алгоритм оптимального возбуждения крупноапертурного излучателя бортовой многолучевой антенной решетки системы спутниковой связи, обеспечивающий наиболее высокий и равномерный рельеф КУ в глобальном секторе обзора;
- предложены конфигурации приемных цифровых многолучевых антенных решеток X- и Ka-диапазона и произведено моделирование их характеристик направленности;
- проанализированы возможные методы улучшения характеристик направленности бортовых многолучевых антенных решеток, состоящих из крупноапертурных излучателей, предназначенных для систем глобальной спутниковой связи.

**Методы исследований**, используемые для решения поставленных в диссертации задач, основываются на применении электродинамических методов теории антенн, численных методов решения прикладных задач электродинамики. Результаты электродинамического

моделирования получены с применением метода моментов и методов геометрической и физической оптики, и с использованием компьютерного моделирования.

**Научная новизна работы** заключается в обосновании структуры МАР, обеспечивающей заданный сектор обзора при минимальном числе излучателей. В разработке алгоритма анализа характеристик направленности КАИ и, в частности, в разработке алгоритма оптимального возбуждения КАИ, обеспечивающего максимальный рельеф КУ в глобальном секторе обзора, и использование этого алгоритма для определения предельно достижимых характеристик КАИ и МАР из этих излучателей, а также в исследовании характеристик направленности КАИ в зависимости от их геометрии и структуры.

### **Практическая значимость результатов работы**

Полученные в процессе работы над диссертацией результаты могут стать основой для разработки перспективной бортовой МАР для системы глобальной спутниковой связи. При использовании этой антенны в системе спутниковой связи возможно обеспечение устойчивой связи между абонентами, расположенными в произвольных точках земной поверхности, увеличение абонентской емкости сети связи, повышение пропускной способности каналов связи, обеспечение их высокой надежности и помехозащищенности.

### **Реализация и внедрение результатов работы**

Результаты диссертационной работы нашли практическое применение. В частности, полученные результаты вошли в составную часть эскизного проекта по построению бортовых многолучевых антенн (ОКР «Сфера»).

**Достоверность полученных результатов** обуславливается корректностью исходных положений и математических преобразований при составлении моделей как отдельных КАИ, так и бортовых многолучевых антенных решеток и подтверждается в частных случаях совпадением результатов электродинамического моделирования с результатами, известными из теории антенн, а также с результатами, полученными другими авторами в этой области.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Двухступенчатая схема формирования многолучевой диаграммы направленности бортовой АР ССС (в X-диапазоне) обеспечивает требуемые характеристики направленности в секторе обзора, соответствующем половине поверхности земного шара.
2. Найденный алгоритм возбуждения крупноапертурных излучателей позволяет уменьшить провалы в рельефе КУ КАИ до -1,4 дБ и максимально увеличить коэффициент эффективности (коэффициент усиления) бортовой МАР системы глобальной спутниковой связи.
3. Линзовый крупноапертурный излучатель, выполненный из отрезков квадратных волноводов, в наибольшей степени удовлетворяет совокупным требованиям, предъявляемым к бортовым антенным устройствам систем спутниковой связи.
4. Смоделированный крупноапертурный излучатель имеет характеристики и параметры, в наибольшей степени удовлетворяющие требованиям к антенным устройствам, используемым в системах глобальной спутниковой связи (радиус апертуры крупноапертурного излучателя  $6,04\lambda$ , фокусное расстояние  $14,7\lambda$ , при этом, максимальное значение коэффициента усиления составляет 28,13 дБ, а коэффициент эффективности 0,45).

## **Апробация результатов работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 10-й Междунар. конф. «Авиация и космонавтика – 2011» (Москва, 8 – 10 ноября 2011 г.); Молодёжной науч.-практич. конф. «Инновации в авиации и космонавтике – 2012» (Москва, 17–20 апреля 2012 г.); дважды на Молодёжной науч.-практич. конф. «Инновации в авиации и космонавтике – 2013» (Москва, 16–18 апреля 2013); XIX Междунар. науч.-технич. конф. «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 16–18 апреля 2013 г.); 12-й междунар. конф. «Авиация и космонавтика» (Москва, 12–15 ноября 2013 г.); 11-й междунар. конф. «Радиолокация и связь – перспективные технологии» (Москва, 21 ноября 2013 г.).

## **Публикации**

Результаты исследований, проведенных в процессе выполнения диссертационной работы, опубликованы в 14 печатных работах, из них 1 коллективная монография, 6 научных

статей (4 в журналах, включенных в перечень ВАК), 7 тезисов докладов. На оригинальную разработку многолучевой антенной решетки получен патент РФ.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работы изложена на 157 машинописных страницах и состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений, списка литературы. Иллюстративный материал представлен в виде 97 рисунков и 6 таблиц. Список использованных источников включает 67 наименований.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** приводится обоснование актуальности разработки бортовой MAP системы глобальной спутниковой связи, сформулированы цели и задачи исследований, отмечены научная новизна и практическая значимость работы, описана структура диссертации.

**Первая глава** содержит аналитический обзор антенных устройств отечественных и зарубежных ССС. В данной главе рассматриваются возможности использования многолучевых антенн (МЛА) для глобальной и региональной спутниковой связи на основе зеркальных (ЗА) и гибридно-зеркальных антенн (ГЗА) (линзовых и гибридно-линзовых антенн (ГЛА)), фазированных антенных решеток (ФАР) и MAP. Несмотря на то, что в многочисленных источниках представлено довольно большое количество различных бортовых антенн, предназначенных для систем спутниковой связи, ряд вопросов до сих пор остается недостаточно изученным. К их числу относятся методы снижения массогабаритных характеристик бортовых многолучевых антенн, способы уменьшения количества излучателей в MAP и методы снижения вычислительных мощностей, требуемых для обработки сигнала.

В результате обзора установлено, что существующие многолучевые зеркальные и линзовые антенны не в полной мере удовлетворяют вышеперечисленным требованиям, особенно в плане обеспечения заданного сектора обзора и требуемых массогабаритных параметров.

Проведенные в главе исследования показали, что использование ФАР для формирования узкого сканирующего луча или формирования многолучевой системы в данном случае не целесообразно из-за высокого значения коэффициента избыточности излучателей.

В значительно большей степени требованиям, предъявляемым к системам глобальной спутниковой связи, удовлетворяют МАР, построенные на основе КАИ, с цифровыми методами формирования сигнала. Вопросы разработки КАИ и многолучевых антенн из них недостаточно изучены и требуют дальнейшего развития, особенно в высоких диапазонах частот, таких как  $X$  и  $Ka$ . Решение этих задач рассматривается в следующих главах настоящей работы.

Во второй главе рассмотрено моделирование и оптимизация многолучевого зеркального КАИ. В процессе оптимизации КАИ особое внимание уделялось минимизации количества излучателей в облучателе. Величина минимального количества элементов в облучателе  $n_{min}$  приблизительно определялась из условия равенства или превышения суммарным телесным углом, который занимают  $n$  лучей, заданного телесного угла обзора. В работе получено соотношение для определения  $n_{min}$ .

$$\sum_{m=1}^{n_{min}} \left( 1 - \cos \left( Kq \frac{\lambda}{4R_0} \cdot \frac{\cos(\theta_0^m) + 1}{2 \cos(\theta_0^m)} \right) \right) \geq 1 - \cos(\psi_{обз}), \quad (1)$$

где  $Kq$  – коэффициент пропорциональности между шириной ДН зеркальной антенны и радиусом апертуры зеркала  $R_0$ ,  $\theta_0^m$  – направление максимума  $m$ -той ДН, а  $\psi_{обз}$  – сектор обзора.

С применением (1) рассчитаны зависимости коэффициента  $Kq$  и минимального числа элементов в облучателе  $n_{min}$  от уровня пересечения  $q$  двух соседних лучей (рис. 1).

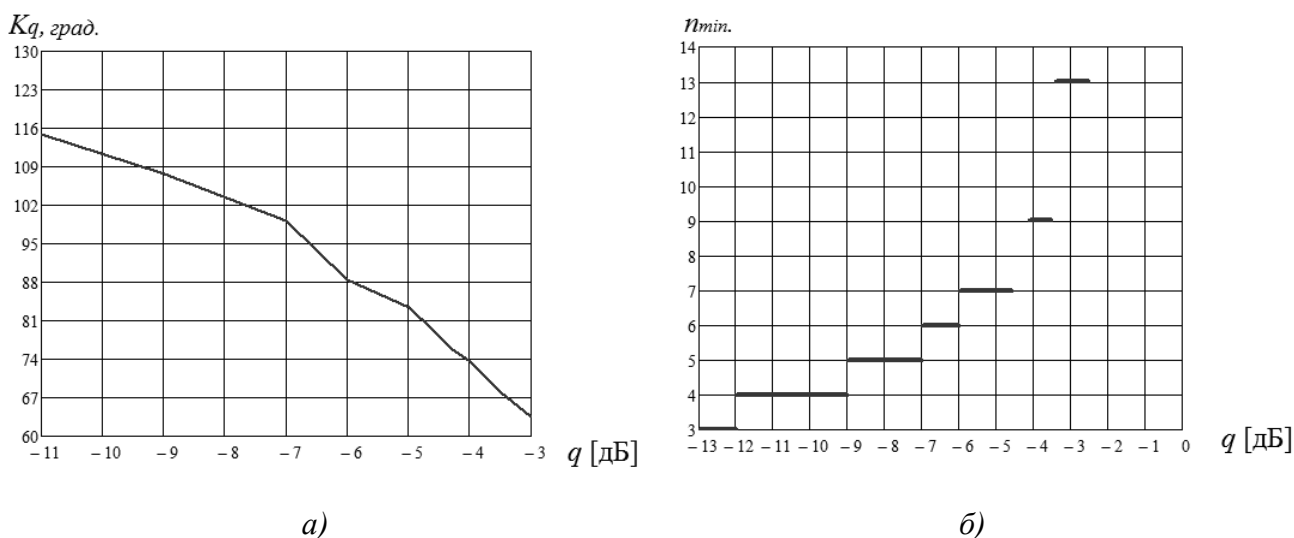


Рис. 1. К определению минимального количества волноводов в облучателе.



Кривые на рис. 1 получены для  $\psi_{обз} = 8,7^\circ$  и параметров ЗА:  $R_0 = 6,04\lambda$ ,  $f = 4,2\lambda$ . На первом этапе эти параметры выбирались из условия выбора 7-и элементного облучателя КАИ и ориентировочного пересечения лучей в 7-и лучевой ДН КАИ на уровне -3 дБ.

Для каждого из элементов облучателей КАИ проводился анализ зависимости КУ рассматриваемого КАИ от размеров апертуры облучателя при выбранном оптимальном фокусном расстоянии  $f_{опт} = 4,48\lambda$  (по максимуму КУ вдоль оси антенны). На рис. 2 показана зависимость КУ ( $G(\theta_0^1)$ ,  $G(\theta_0^2)$ ,  $G(\theta_0^3)$ ) КАИ в направлении максимума излучения ( $\theta_0^1$ ,  $\theta_0^2$ ,  $\theta_0^3$ ) от радиуса раскрыва элемента облучателя для 1, 2, 3 элементов в облучателе, формирующих соответственно центральный и отклоненные лучи. Пунктирной линией на рис. 2 показан радиус волноводного облучателя, при котором формируется максимальный КУ 1-го луча.

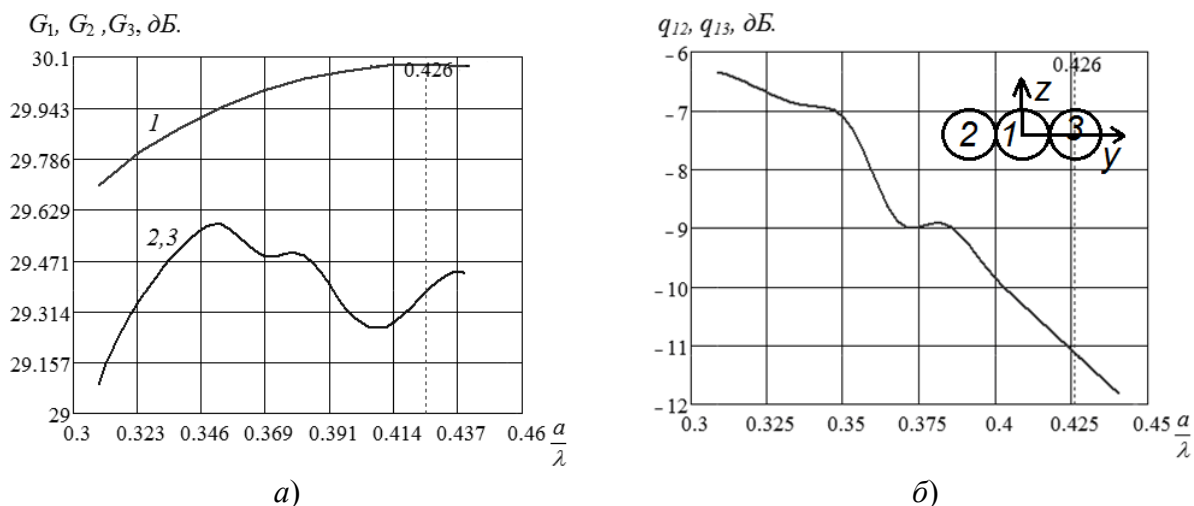


Рис. 2. Характеристики направленности центрального и отклонённых лучей зеркального КАИ в зависимости от радиуса волноводного облучателя.

Из рис. 2а следует, что для рассматриваемой структуры КАИ максимальный КУ центрального луча (кривая 1) составляет порядка 30 дБ, при этом КУ отклоненных лучей падает до 29.4 дБ (кривая 2), а падение усиления в направлении пересечения двух соседних лучей  $q_{12}, q_{13}$  приблизительно равно -11 дБ (рис. 2б). Следовательно, в рельефе КУ в направлении пересечения лучей будет формироваться глубокий провал. Для уменьшения этого провала был разработан алгоритм оптимального возбуждения одновременно нескольких элементов облучателя.

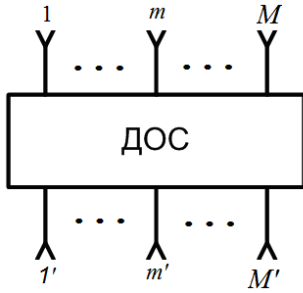


Рис. 3. Структурная схема оптимального возбуждения многоэлементного облучателя.

Структурная схема оптимального возбуждения КАИ приведена на рис. 3, где номерами  $1 \dots m \dots M$  обозначен каждый из  $m$ -х волноводов в  $M$ -элементном облучателе, а номерами  $1' \dots m' \dots M'$  – входы диаграммообразующей схемы (ДОС), обеспечивающей оптимальное возбуждение.

С целью обоснованного выбора оптимальной системы возбуждения многоэлементного облучателя была решена задача максимизации КУ рассматриваемого многолучевого излучателя при одновременном возбуждении всех элементов в облучателе. Показано, что максимальный КУ КАИ в произвольном направлении  $(\theta, \varphi)$  зависит от КУ каждого из лучей  $G_m(\theta, \varphi)$  следующим образом:

$$G_{\max}(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M G_m(\theta, \varphi), \quad (2)$$

и достигается при оптимальном возбуждении каждого элемента в облучателе:

$$U_{\text{над } m \text{ on } m}^H(\theta, \varphi) = c \cdot \overline{F}_m(\theta, \varphi) \cdot \overline{e}(\theta, \varphi)^* \cdot \sqrt{G_m(\theta_0^m, \varphi_0^m)}, \quad m = 1, \dots, M., \quad (3)$$

где  $c$  – произвольная константа,  $\overline{F}_m(\theta, \varphi)$  – нормированная по максимуму векторная комплексная ДН,  $\overline{e}(\theta, \varphi)$  – единичный вектор, выделяющий в общем поле антенны поляризационную составляющую, по которой определяется КУ,  $(\theta_0^m, \varphi_0^m)$  – координаты  $m$ -го луча. Соотношение (3) характеризует рельеф максимально достижимых значений КУ в произвольном направлении для рассматриваемого КАИ с облучателем из  $M$  элементов.

Использование оптимального алгоритма возбуждения позволяет уменьшить падение КУ в направлении пересечения лучей более чем на 3 дБ. Дальнейшее увеличение рельефа КУ связано с увеличением уровня пересечения двух соседних лучей за счет уменьшения расстояния между фазовыми центрами элементов облучателя. Для этого был смоделирован зеркальный КАИ с радиусом апертуры  $R_0 = 5,125\lambda$ , фокусным расстоянием  $f = 3,82\lambda$ , радиусом волноводного облучателя  $a = 0,29\lambda$ , толщиной волновода  $t = 0,036\lambda$  и диэлектрической проницаемостью среды  $\varepsilon$  заполнения круглых волноводов равной  $\varepsilon = 1,6$ . На рис. 4 приведена

ДН такого КАИ в плоскостях  $XOY$  и  $XOZ$ . В правом верхнем углу на рис. 4 схематически показан облучатель из 7-и круглых волноводов. При этом нумерация лучей на рис. 4 соответствует нумерации элементов в облучателе.

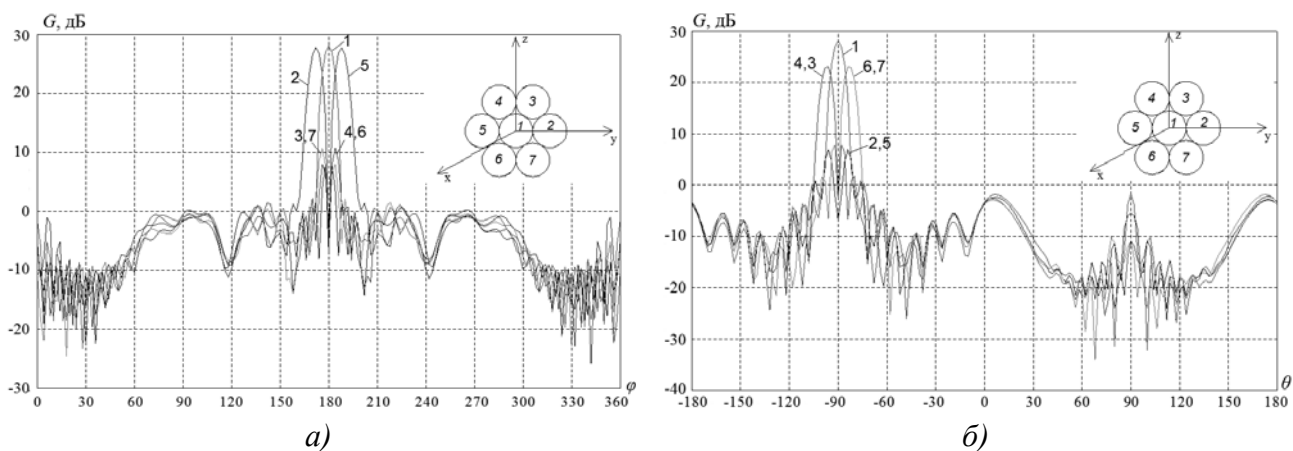


Рис. 4. ДН зеркального КАИ и схема его облучателя (интервал углов  $0 \leq \theta \leq 180^\circ$  соответствует плоскости  $\varphi = 0$ , а интервал углов  $-180^\circ \leq \theta \leq 0$  соответствует плоскости  $\varphi = 180^\circ$ ).

На рис. 5 пунктирной линией показан рельеф КУ этого КАИ при независимом возбуждении элементов в облучателе, а сплошной линией показан рельеф КУ при использовании оптимального алгоритма возбуждения элементов облучателя.

Из рис. 5 следует, что в плоскости  $XOY$  наблюдается сравнительно небольшой провал в КУ на 1,23 дБ в направлении пересечения лучей, а на краю сектора обзора падение КУ составляет около 0,5 дБ. В плоскости  $XOZ$  в направлении пересечения лучей провал в КУ составил 1,28 дБ, а на краю сектора обзора – 2,87 дБ. Отметим, что рельеф КУ в других плоскостях лежит в интервале, границы которого определяются кривыми на рис. 5а и 5б.

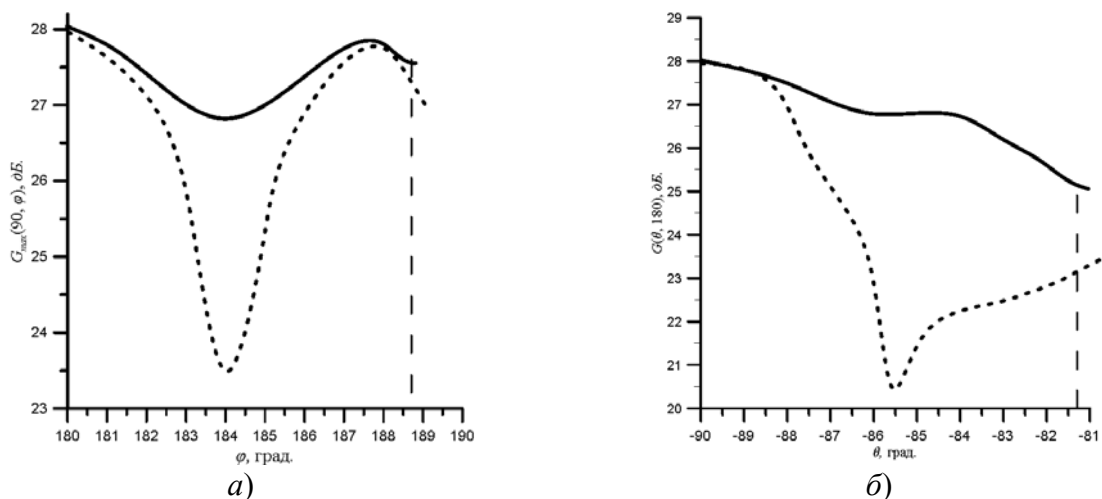


Рис. 5. Зависимость максимального КУ зеркального КАИ с облучателем в секторе обзора.

Таким образом, разработанный КАИ имеет КУ вдоль оси симметрии около 28 дБ и в секторе обзора не ниже 26,77 дБ (за исключением незначительного углового пространства на краю сектора около  $3,5^\circ$  по углу  $\theta$  в сечениях  $\varphi = 0, 180^\circ$ ), что эквивалентно эффективности зеркального излучателя вдоль его оси  $g = 0,616$ , и не ниже 0,46 во всём секторе обзора.

В **третьей главе** приводятся результаты электродинамического моделирования характеристик направленности линзового КАИ.

Важнейшим моментом при выборе профиля линзы является возможность обеспечения наиболее равномерного требуемого КУ в пределах сектора обзора. Как известно, апланатические линзы позволяют получить минимальное снижение КУ при смещении облучателя из фокуса линзы. Как правило, теневая поверхность таких апланатических линз выбирается сферической. Поэтому при дальнейших исследованиях теневой профиль линзы выбирался в виде сферического сегмента, а сама линза выполнялась в виде тела вращения. При этом освещенный профиль линзы определялся в приближении геометрической (физической) оптики:

$$\rho(\psi) = \frac{(n \cdot \cos(\psi) - 1) \cdot (R - f)}{(n \cdot \cos(\psi) - 1)^2 / (n - 1) + (n - 1) \cdot \sin^2(\psi)} \pm \sqrt{\frac{R^2 \cdot (n \cdot \cos(\psi) - 1)^2 + 2f \cdot R \cdot ((n - 1) \cdot \sin(\psi))^2 - (f \cdot (n - 1) \cdot \sin(\psi))^2}{(n \cdot \cos(\psi) - 1)^2 / (n - 1) + (n - 1) \cdot \sin^2(\psi)}}. \quad (4)$$

Отметим, что уравнение (4) в зависимости от знака перед арифметическим квадратным корнем справедливо как для замедляющей (диэлектрической) линзы (знак «-»), так и для ускоряющей (волноводной) линзы (знак «+»).

Было установлено, что диэлектрическая линза ( $f = 8,45\lambda$  и  $R = 12,2\lambda$ ) с облучателем в виде конического рупора радиуса  $a_{\text{опт}} = 1,617\lambda$  позволяет получить КУ в направлении центра сектора обзора равным  $G = 29,4$  дБ. Однако при использовании рупоров с таким радиусом раскрытия уровень пересечения двух соседних лучей приблизительно составит  $q = -19,4$  дБ. Поэтому была поставлена задача смоделировать облучатель с ограниченным раскрытием, характеристики направленности которого были бы близки к характеристикам направленности конического рупора с радиусом  $a_{\text{опт}} = 1,617\lambda$ . В качестве такого облучателя была использо-

вана система из волноводно-стержневых антенн бегущей волны. На рис. 6 схематически показана одиночная волноводно-стержневая антенна на основе круглого волновода.

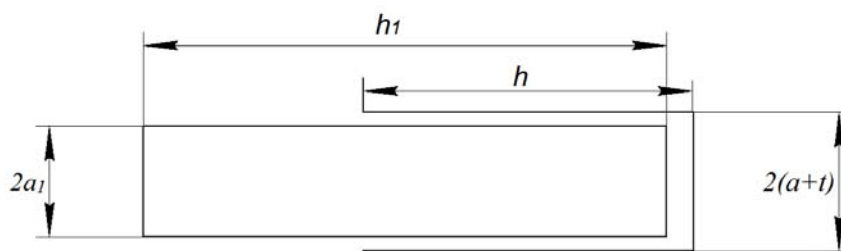
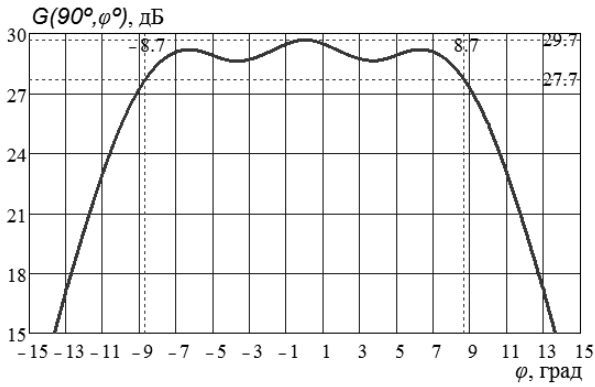


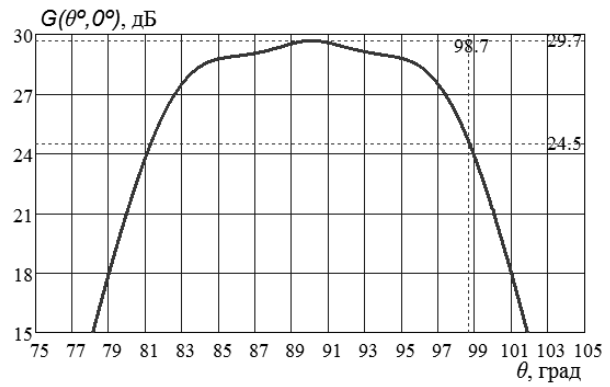
Рис. 6. Схематичное изображение волноводно-стержневой антенны.

В работе установлено, что характеристики направленности волноводно-стержневой антенны близки к характеристикам направленности конического рупора с радиусом  $a_{\text{опт}} = 1,617\lambda$ , если радиус питающего волновода волноводно-стержневой антенны равен  $a = 0,36\lambda$ , толщина питающего волновода –  $t = 0,07\lambda$ , длина волновода –  $h = 1,47\lambda$ , длина диэлектрического стержня –  $h_1 = 2,7\lambda$ , радиус диэлектрического стержня –  $a_1 = \lambda/3$ , диэлектрическая проницаемость материала стержня  $\varepsilon_1 = 2,1$ . При этом КУ диэлектрической линзы за счет дополнительного подбора фокусного расстояния ( $f_{\text{опт}} = 8,45\lambda$ ), радиуса теневой поверхности ( $R_{\text{опт}} = 12,2\lambda$ ) и величины диэлектрической проницаемости ( $\varepsilon_{\text{опт}} = 2,3$ ) линзы удалось увеличить до 29,9 дБ. Однако при этом из-за увеличения фокусного расстояния уменьшился угол раскрытия линзы и, как следствие, амплитудное распределение стало более равномерным. Поэтому лучи ДН такого КАИ сужаются, и в случае сохранения уровня пересечения двух соседних лучей -5 дБ образуется спад КУ на краю сектора обзора. Следовательно, с целью уменьшения падения КУ на краю сектора обзора следует добиться более спадающего по краям амплитудного распределения по линзе путём сужения ДН облучателя.

Был рассчитан линзовый КАИ с измененной структурой облучателя, который позволил, с одной стороны, увеличить КУ на краю сектора обзора, а, с другой стороны, свести к минимуму уменьшение КУ в направлении оси антенны. На рис. 7 приведен рельеф КУ этого КАИ с  $f = 5,8\lambda$  и с 7-и элементным облучателем в плоскостях  $XOY$  (рис. 7а) и  $XOZ$  (рис. 7б) при условии оптимального возбуждения облучателя.



a)

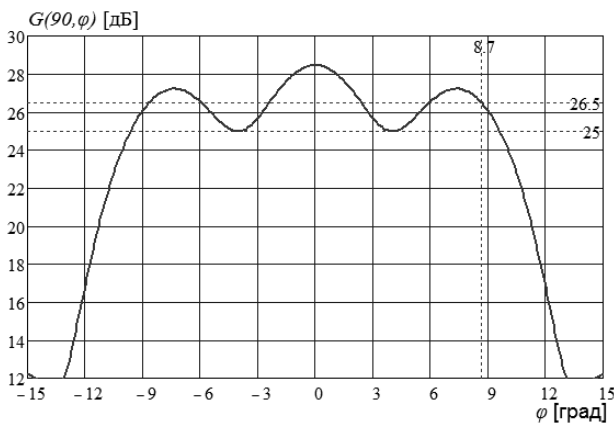


б)

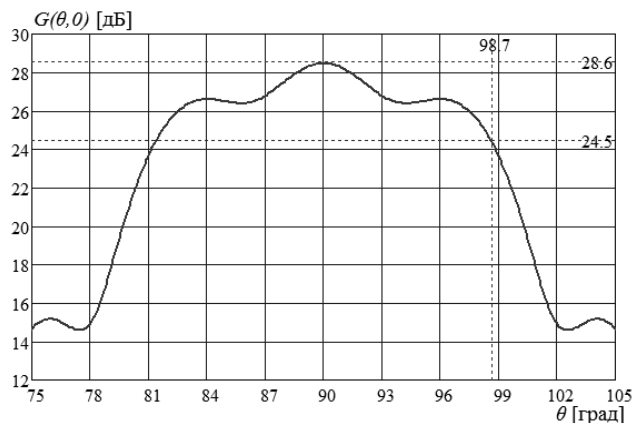
Рис. 7. Рельеф КУ длиннофокусного КАИ: *a* – в плоскости *XOY*; *б* – в плоскости *XOZ*.

К основному недостатку диэлектрического линзового КАИ можно отнести малый срок службы большинства диэлектриков в космическом пространстве, что значительно ограничивает срок активного использования антенны до 3 – 5 лет. В связи с этим был рассмотрен многолучевой линзовый КАИ, выполненный на основе волноводной линзы из отрезков квадратных волноводов.

Моделирование и оптимизация характеристик направленности волноводной линзы осуществлялись аналогично моделированию и оптимизации зеркального и линзового диэлектрического КАИ. В результате был смоделирован КАИ со следующими параметрами ( $f = 14,7\lambda$ ,  $R_0 = 6,04\lambda$ ,  $R = 14,85\lambda$ ,  $n = 0,7$ ). В качестве облучателя этого КАИ использовался кластер из 7-и рупоров с радиусом раскрыва  $a = 2,35\lambda$ . На рис. 8 приведен рельеф КУ в плоскостях *XOY* и *XOZ* с оптимальным возбуждением излучателей в облучателе.



a)



б)

Рис. 8. Рельеф КУ волноводного линзового КАИ: *a* – в плоскости *XOY*; *б* – в плоскости *XOZ*.

Из рис. 8 следует, что при использовании оптимального возбуждения КУ в направлении оси антенны составил 28,6 дБ ( $g = 0,5$ ). При этом максимальное падение усиления в

плоскости  $XOY$  – 3,6 дБ, а в плоскости  $XOZ$  – 4,1 дБ. Дальнейшее повышение КУ в секторе обзора и соответственно уменьшение провалов в рельефе КУ можно обеспечить с применением 13-и и 19-и элементных облучателей КАИ, как показано в настоящей главе.

Таким образом, приведенные результаты моделирования показывают принципиальную возможность построения многолучевого линзового КАИ без использования каких-либо диэлектрических сред с характеристиками, близкими к наилучшим характеристикам диэлектрических многолучевых КАИ, что существенно улучшает перспективы использования таких излучателей в бортовых антеннах ССС.

В четвертой главе рассматриваются схемы построения многолучевых антенных решеток и приводятся результаты электродинамического моделирования их характеристик направленности.

В работе получены ДН МАР, состоящей из 7-и линзовых КАИ, каждый из которых имел 7-и элементный волноводно-стержневой облучатель. ДН рассчитывались в  $X$ -диапазоне в плоскостях  $ZOY$  ( $\varphi_0 = 90^\circ$ ) и  $ZOX$  ( $\varphi_0 = 0^\circ$ ). Луч, сформированный в направлении оси симметрии МАР, соответствует равномерному возбуждению каждого из  $1n$  элементов облучателя. Отклоненные лучи соответствовали равноамплитудному возбуждению соответствующих периферийных элементов облучателя, а фазовое возбуждение соответствовало максимуму множителя направленности МАР в направлениях или  $\theta_0 = 8,7^\circ \varphi_0 = 0^\circ$ , или  $\theta_0 = 8,7^\circ \varphi_0 = 90^\circ$ .

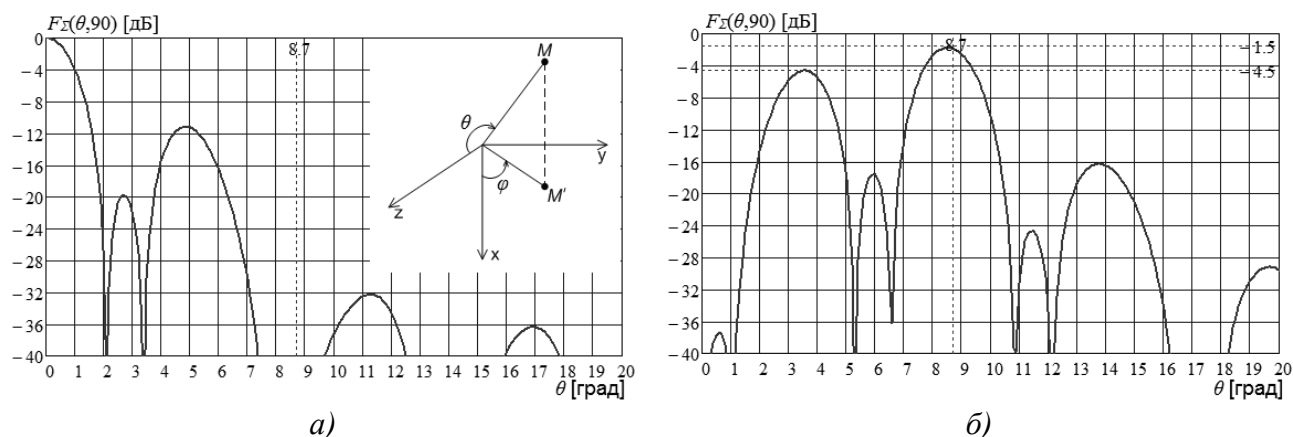


Рис. 9. ДН МАР: *a* – в направлении  $\theta_0 = 0^\circ$  в плоскости  $ZOY$ ; *б* – в направлении  $\theta_0 = 8,7^\circ$  в плоскости  $ZOY$

Как следует из приведенных результатов моделирования, ширина луча МАР в пределах сектора обзора приблизительно равна  $2^\circ$ . При этом абсолютные значения КУ в направле-

нии оси антенны составило 37,48 дБ, а на краю сектора обзора в плоскости  $ZOY$  снизилось до 36,21 дБ и в плоскости  $ZOX$  – до 30,48 дБ.

При отклонении луча на границу сектора обзора в ДН МАР рассматриваемой структуры проявляются побочные главные максимумы. Особенно значительным является побочный главный максимум в плоскости  $ZOY$  (-3 дБ). Уменьшить уровень побочного излучения можно или за счет некоторого управления множителем решетки, или за счет соответствующего возбуждения всей семерки излучателей в облучателе каждого КАИ. Существенного уменьшения уровня интерференционных максимумов (с одновременным выравниванием рельефа КУ в секторе обзора) можно достигнуть за счет увеличения количества излучателей в каждом облучателе КАИ до девятнадцати с последующей оптимизацией облучателя. Соответствующие кривые в плоскости  $ZOY$  ( $\varphi = 90^\circ$ ) приведены на рис. 10.

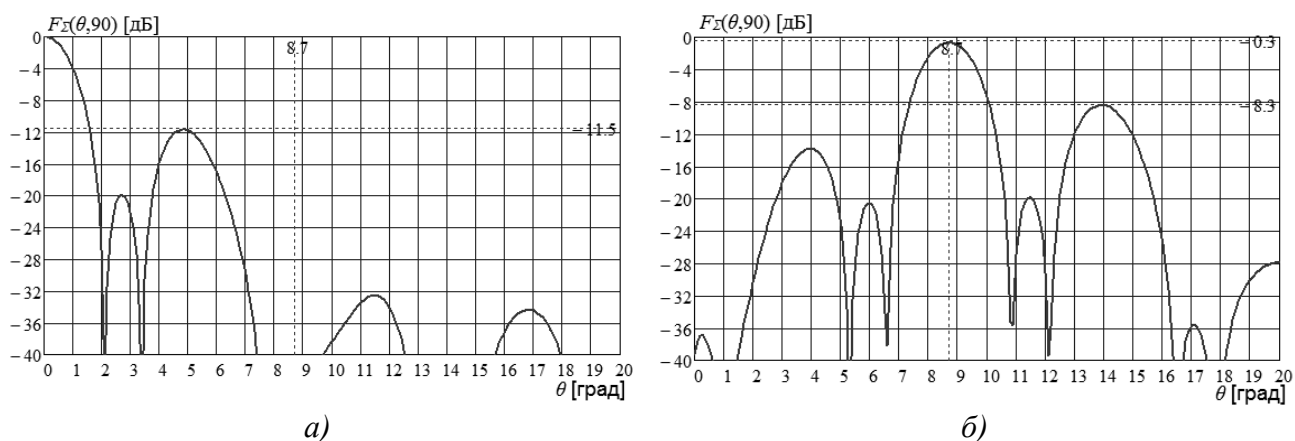


Рис. 10. ДН МАР из 7-и 19-и лучевых КАИ . *a* – в направлении  $\theta_0 = 0^\circ$ ,  $\varphi_0 = 90^\circ$  в плоскости  $ZOY$ ;

*б* – в направлении  $\theta_0 = 8,7^\circ$ ,  $\varphi_0 = 90^\circ$  в плоскости  $ZOY$ .

Как видно, за счет использования 7-и элементной МАР, состоящей из 19-и лучевых КАИ, при выставлении луча в направление на границу сектора обзора уровень интерференционных боковых лепестков в плоскости  $ZOY$  составляет -8 дБ. Дальнейшего уменьшения интерференционных боковых лепестков можно добиться за счет синтеза соответствующего амплитудно-фазового возбуждения в 19-и элементном КАИ.

Отметим, что основные закономерности в форме ДН и уровне боковых лепестков для МАР  $Ka$  диапазона такие же, как для  $X$  диапазона.



В **заключении** сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы, которые заключаются в следующем:

1. Проведен аналитический обзор отечественных и зарубежных бортовых антенных устройств, используемых в системах глобальной и региональной спутниковой связи, и проанализированы возможные пути построения перспективных многолучевых приемных бортовых антенн.

2. Разработана и обоснована двухступенчатая схема построения приемной бортовой многолучевой антенной решетки для системы глобальной спутниковой связи в  $X$ - и  $Ka$ -диапазонах. Схема основана на использовании многолучевой антенной решетки, состоящей из минимального количества многолучевых крупноапертурных излучателей, формирующих требуемый рельеф коэффициента усиления в пределах полного сектора обзора земли с геостационарной орбиты.

3. Рассмотрены различные варианты построения многолучевого крупноапертурного излучателя (на основе зеркальной антенны, линзовой диэлектрической антенны и линзовой антенны, состоящей из волноводных излучателей). С использованием программного комплекса FEKO и специально разработанных алгоритмов проведены электродинамическое моделирование и сравнительная оптимизация характеристик направленности каждого из трех типов крупноапертурных излучателей в зависимости от их геометрических параметров и конструктивных особенностей.

4. Установлена зависимость между требуемым коэффициентом усиления многолучевого крупноапертурного излучателя, уровнем пересечения соседних лучей и количеством элементов в облучателе крупноапертурного излучателя. Определено минимальное количество элементов в облучателе, обеспечивающее заданный коэффициент усиления в требуемом секторе обзора и уровень пересечения соседних лучей.

5. Разработан алгоритм оптимального возбуждения отдельного крупноапертурного излучателя, позволяющий получить наиболее высокий и равномерный рельеф коэффициента усиления в требуемом секторе обзора. С использованием этого алгоритма для заданного чис-

ла излучателей определен максимальный коэффициент усиления многолучевой антенной решетки во всем секторе обзора.

### **Публикации по теме диссертации**

1. *Пономарев Л.И., Вечтомов В.А., Терехин О.В., Милосердов А.С.* Многолучевая антенная решетка системы спутниковой связи. Патент на изобретение №2509399 от 05.07.2012 г.
2. *Пономарев Л.И., Вечтомов В.А., Милосердов А.С.* Многолучевая антенная решетка для системы спутниковой связи // Коллективная монография под ред. *А.Ю. Гринева*. М.: Радиотехника. 2013. С. 164–174.
3. *Пономарев Л.И., Вечтомов В.А., Милосердов А.С.* Крупноапертурный излучатель для многолучевой антенны системы спутниковой связи // Труды МАИ. 2012. № 52.
4. *Л.И. Пономарев, В.А. Вечтомов, А.С. Милосердов.* Многолучевая антенная решётка для системы спутниковой связи // Антенны. 2012. № 5. С. 52–65.
5. *Пономарёв Л.И., Вечтомов В.А., Воронов Р.Х., Милосердов А.С.* Бортовая антенная решетка из крупноапертурных излучателей с глобальным обслуживанием с геостационарной орбиты // Вестник МГТУ им. Баумана. 2012. Вып. 7.
6. *Пономарев Л.И., Вечтомов В.А., Милосердов А.С.* Многолучевые антенные решётки для системы спутниковой связи // Антенны. 2013. №9. С. 23–30.
7. *Милосердов А.С., Зинин Е.Д., Мельников Г.А.* Линзовый крупноапертурный излучатель для бортовой многолучевой антенной решетки системы глобальной спутниковой связи // Фазотрон. 2013. № 3 (22). С. 78–91.
8. *Милосердов А.С., Зинин Е.Д., Мельников Г.А.* Перспектива использования ФАР в бортовых антеннах глобальной спутниковой сотовой связи // Труды МАИ. № 73.
9. *Пономарев Л.И., Вечтомов В.А., Милосердов А.С.* Многолучевая антенна для системы спутниковой связи на основе решетки из крупноапертурных излучателей // Труды 10-й Междунар. конф. «Авиация и космонавтика – 2011» 8–10 ноября 2011 г. Москва. С. 202–203.
10. *Пономарев Л.И., Вечтомов В.А., Милосердов А.С.* Линзовый крупноапертурный излучатель для многолучевой антенной решётки системы спутниковой связи // Труды молодёж-

ной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2012» 17 – 20 апреля 2012 г. Москва. С. 106.

11. *Байкин А.В., Милосердов А.С.* Оптимизация линзового крупноапертурного излучателя многолучевой антенной решетки системы космической связи // Труды молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2013» 16 – 18 апреля 2013 г. Москва. С. 203–204.
12. *Милосердов А.С., Зинин Е.Д., Мельников Г.А.* Линзовый крупноапертурный излучатель для многолучевой антенной решётки системы спутниковой связи // Труды молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2013» 16 – 18 апреля 2013 г. Москва. С. 246.
13. *Вечтомов В.А., Пономарев Л.И., Милосердов А.С., Воронов Р.Х., Мешковский В.Е., Терёхин О.В., Чурилин С.А.* Оптимизированная антенная решетка из крупноапертурных излучателей для бортового ретранслятора // Труды XIX междунар. науч.-технич. конф. «Радиолокация, навигация, связь». 16–18 апреля 2013 г. Воронеж. Т. 2. С. 1107.
14. *Милосердов А.С., Зинин Е.Д., Мельников Г.А.* О минимальном количестве излучателей в фазированной антенной решетке для глобальной спутниковой связи // Труды 12-й междунар. конф. «Авиация и космонавтика» 12–15 ноября 2013 г. Москва. С. 461–462
15. *Милосердов А.С., Зинин Е.Д., Мельников Г.А.* Сравнительный анализ эффективности построения фазированных и многолучевых антенных решёток для систем глобальной спутниковой связи // Труды 11-й междунар. конф. «Радиолокация и связь – перспективные технологии». 2013. Москва. ОАО «Радиофизика». 16 с.