

Л.И. Пономарев, В.А. Вечтомов, А.С. Милосердов

**Бортовые цифровые
многолучевые антенные решетки
для систем спутниковой связи**

Под редакцией Л.И. Пономарева

2-е издание



Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н. Э. Баумана
2 0 1 8

УДК 621.37
ББК 32.845
П56

Рецензенты:

д-р. техн. наук, профессор *Г.И. Азаров*;
д-р. техн. наук, профессор *В.Н. Митрохин*

Пономарев, Л. И.

П56 Бортовые цифровые многолучевые антенные решетки для систем спутниковой связи / Л. И. Пономарев, В. А. Вечтомов, А. С. Милосердов ; под ред. Л. И. Пономарева. — 2-е изд. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — 197, [1] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4808-1

Рассмотрены возможности спутниковых многолучевых зеркальных и линзовых антенн, а также особенности построения бортовых цифровых многолучевых антенных решеток на основе крупноапертурных зеркальных и линзовых излучателей. Приводятся результаты оптимизации структуры и характеристик крупноапертурных излучателей, а также антенных решеток из них. Показаны преимущества многолучевых крупноапертурных излучателей при построении антенных решеток для глобальных систем спутниковой связи и возможные схемотехнические и конструктивные решения по построению цифровых антенных решеток.

Для специалистов в области разработки систем спутниковой связи, а также аспирантов и студентов, обучающихся по специальностям «Радиоэлектронные системы и комплексы» и «Радиотехника».

УДК 621.37
ББК 32.845

© Пономарев Л.И., Вечтомов В.А.,
Милосердов А.С., 2016
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

ISBN 978-5-7038-4808-1

Оглавление

Предисловие	5
Список сокращений	7
Введение	9
Глава 1. Системы глобальной и региональной спутниковой связи и основные требования, предъявляемые к их антенным устройствам	21
1.1. Общие принципы построения систем спутниковой связи	21
1.2. Гибридно-зеркальные и гибридно-линзовые схемы построения антенн для космических ретрансляторов геостационарных спутников связи	30
1.3. Антенные системы и диаграммообразующие схемы зарубежных космических ретрансляторов с зонированным обслуживанием	39
1.4. Проблемы применения ФАР в качестве антенн бортовых ретрансляторов	47
Глава 2. Бортовая многолучевая зеркальная антенна для геостационарного космического ретранслятора Ки-диапазона	56
2.1. Основные направления повышения эффективности бортового космического ретранслятора для обеспечения связью территории РФ	56
2.2. Частотно-поляризационный план и структура парциальных лучей МЛА региональной системы спутниковой связи	57
2.3. Бортовая гибридно-зеркальная антенна для покрытия территории РФ	60
2.4. Результаты моделирования антенной системы	64
2.5. Оптимизация и расчет излучателя многоэлементного облучателя МЛА	68
2.6. Конструктивное исполнение МЛА	70
2.7. Результаты экспериментальных исследований МЛА	74
Глава 3. Зеркальный крупноапертурный излучатель для многолучевой антенной решетки системы спутниковой связи	76
3.1. Крупноапертурный излучатель для многолучевой антенной решетки	78
3.2. Анализ и оптимизация параметров многолучевого зеркального КАИ	80

3.3. Оптимальные схема и алгоритм возбуждения многоэлементного облучателя	89
3.4. Моделирование рельефа КУ многолучевого зеркального крупноапертурного излучателя	92
3.5. Оптимизация уровня пересечения соседних лучей и рельефа КУ в зеркальном КАИ с 7-элементным облучателем	94
3.6. Диаграмма направленности и рельеф КУ многолучевого зеркального КАИ с облучателем в виде семи круглых волноводов, заполненных диэлектриком	98
3.7. Коэффициент избыточности многолучевых антенных решеток из КАИ	100
Глава 4. Линзовый многолучевой диэлектрический крупноапертурный излучатель МАР	102
4.1. Выбор профиля апланатической линзы	102
4.2. Электродинамическое моделирование линзового КАИ с облучателем из семи волноводно-стержневых антенн	107
4.3. Оптимизация профиля линзы и элемента облучателя КАИ	109
4.4. Диаграмма направленности линзового КАИ	117
4.5. Рельеф коэффициента усиления линзового КАИ	123
4.6. Анализ частотных характеристик линзового КАИ	127
Глава 5. Многолучевой линзовый крупноапертурный излучатель, выполненный на основе волноводной линзы	130
Глава 6. Многолучевые цифровые антенные решетки из крупноапертурных излучателей	136
6.1. Схемы построения бортовых многолучевых ЦАР из КАИ	136
6.2. О минимальном количестве излучателей в многолучевых антенных решетках из КАИ	140
6.3. Диаграммы направленности многолучевых антенных решеток из КАИ	146
6.4. Адаптивная антенна миллиметрового диапазона волн КА Milstar-II	156
6.5. Адаптивная многолучевая система для космического аппарата третьего поколения — Advanced ENF	159
Глава 7. Схемотехнические и конструктивные решения по построению цифровой бортовой МЛА X-диапазона	162
7.1. Структурная схема входных цепей МАР	162
7.2. Конструктивные особенности цифровых антенных решеток из КАИ	166
7.3. Анализ прочностных характеристик приемной бортовой антенны	169
7.4. Цифровая обработка сигналов в бортовой антенне	178
7.5. Технические решения по реализации конструкции АЦП	188
Литература	193

ПРЕДИСЛОВИЕ

С начала 2000-х гг. наблюдается интенсивное развитие систем спутниковой связи. Подобные системы решают проблему обеспечения связью и другими видами мультимедийных услуг с широкополосным доступом (Интернет, телевидение и т. д.) многочисленной группы абонентов в пределах территорий развитых стран и сопредельных государств. Однако дальнейшее развитие систем спутниковой связи как в интересах гражданского населения, так и для использования в военных целях, наталкивается на ряд серьезных научно-технических проблем, связанных с необходимостью разработки высокоэффективных космических бортовых ретрансляторов, обеспечивающих прием и передачу сигналов в пределах практически всего земного шара (зоны видимости космического аппарата).

Важнейшим моментом при разработке таких ретрансляторов является создание бортовых многолучевых антенных устройств, с помощью которых достигается высокий энергетический потенциал для принимаемого и ретранслируемого сигналов в направлениях абонентов, находящихся в любой видимой с геостационарной орбиты точке земной поверхности.

В монографии последовательно анализируются требуемые характеристики, динамика и возможные пути дальнейшего развития бортовых многолучевых антенн для систем спутниковой связи.

В первых трех главах даны проблематика и аналитический обзор существующих типов спутниковых антенн и результаты разработки многолучевой гибридно-зеркальной антенны для региональной (в пределах Российской Федерации) системы спутниковой связи *Ku*-диапазона.

В последующих главах (4–6) рассматриваются возможности и особенности построения цифровых многолучевых антенных решеток на основе крупноапертурных излучателей, а также анализируются и оптимизируются характеристики и параметры зеркальных и линзовых крупноапертурных излучателей.

В гл. 7 приводятся возможные схемотехнические и конструктивные решения по построению цифровых многолучевых антенных решеток на основе крупноапертурных излучателей.

Монография написана как на основе анализа открытых зарубежных и отечественных источников по существующим бортовым многолучевым антеннам, так и в значительной степени на основе оригинальных работ авторов.

Книга может быть полезной специалистам в области разработки систем спутниковой связи, а также аспирантам и студентам старших курсов радиотехнических факультетов и вузов, специализирующихся в области космической связи.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ААР	— адаптивная антенная решетка
АР	— антенная решетка
АТ	— абонентский терминал
АС	— антенная система
АФАР	— активная фазированная антенная решетка
АЦП	— аналого-цифровой преобразователь
БРТК	— бортовой радиотехнический комплекс
БЦП	— бортовая цифровая платформа
ВЭО	— высокоэллиптическая орбита
ГСО	— геостационарная орбита
ГЗА	— гибридно-зеркальная антенна
ГЛА	— гибридно-линзовая антенна
ДН	— диаграмма направленности
ДОРА	— долговременная радиационностойкая аппаратура
ДОС	— диаграммообразующая схема
ЗС	— земная станция
ИСЗ	— искусственный спутник Земли
КА	— космический аппарат
КАИ	— крупноапертурный излучатель
КИП	— коэффициент использования поверхности
КЛТР	— коэффициент линейного температурного расширения
КУ	— коэффициент усиления
КНД	— коэффициент направленного действия
КПД	— коэффициент полезного действия
МАР	— многолучевая антенная решетка
МБЦП	— мультисервисная бортовая платформа
МЛА	— многолучевая антенна
МЛС	— межспутниковая линия связи
ММВ	— миллиметровые волны
МШУ	— маломощный усилитель
МШПр	— маломощный преобразователь (частот)
НО	— направленный ответвитель
ПЛИС	— программируемая логическая интегральная схема
ППРЧ	— псевдослучайная перестройка частоты

ПСС	— подвижная спутниковая связь
РДМ	— регулируемый делитель мощности
РН	— ракета-носитель
РСС-ВСД	— Российская спутниковая система высокоскоростного доступа
РДМ	— регулируемый делитель мощности
РТР	— ретранслятор
САС	— срок активного существования
СВЧ	— сверхвысокие частоты
СБИС	— сверхбольшая интегральная схема
ССС	— система спутниковой связи
ТТХ	— тактико-технические характеристики
УБЛ	— уровень боковых лепестков
УВК	— управляемые весовые коэффициенты
УМ	— усилитель мощности
ФАР	— фазированная антенная решетка
ФСС	— фиксированная спутниковая связь
ЦАР	— цифровая антенная решетка
ЦАП	— цифро-аналоговый преобразователь
ЦДОС	— цифровая диаграммообразующая схема
ЦС	— центральная станция
ШПД	— широкополосный доступ
ЭИИМ	— эффективная изотропно-излучаемая мощность
ЭМС	— электромагнитная совместимость
CDTI	— Испанский центр развития промышленной техники
DVB (Digital Video Broadcast)	— европейский стандарт цифрового теле- вещания
DVB-S (DVB-Satellite)	— европейский стандарт цифрового спутникового телевещания
DVB-RCS (DVB-Return Cannel via Satellite)	— европейский стандарт цифрового спутникового телевещания с обратным спутниковым каналом
ESA	— Европейское космическое агентство
ITU (International Telecommunication Union)	— Международный союз электросвязи (МСЭ)
G/T (Gain-to-noise temperature)	— добротность станции на прием (дБ/°К);
QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying)	— квадратурная фазовая манипу- ляция
VSAT (Very Small Aperture Terminal)	— спутниковый терминал с малым размером антенны

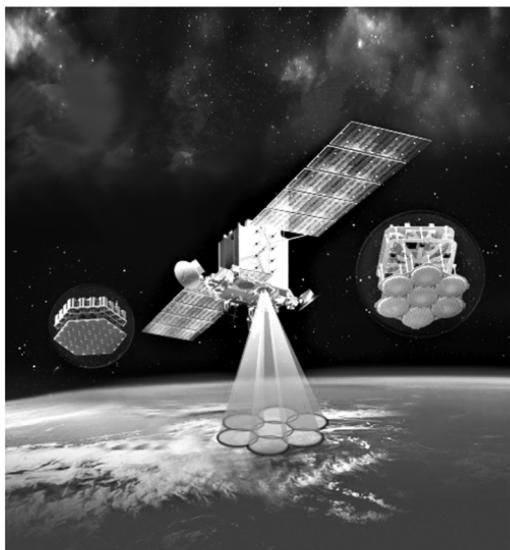
ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей составляющей качественного совершенствования базовых информационно-управляющих систем является космический сегмент спутниковой связи, в том числе с использованием геостационарных (ГСО) и высокоэллиптических (ВЭО) космических аппаратов (КА) связи. Поэтому создание перспективных космических ретрансляторов (РТР) с использованием бортовых многолучевых антенн (МЛА) и мультисервисных бортовых цифровых платформ (МБЦП) (рис. В1) является актуальной задачей. Первые серьезные проработки бортовых МЛА относятся к 1983 г. [1–3].

Комплекс «МЛА↔МБЦП» позволяет существенно экономить орбитально-частотный ресурс, многократно используя выделенную частотную полосу; увеличить пропускную способность системы спутниковой связи (ССС) за счет адресности передачи; обеспечить высокую пространственную селекцию между лучами за счет зонированного обслуживания, повышая при этом помехозащищенность каналов связи. Кроме того, комплекс позволяет коммутировать сигналы из луча в луч, устанавливая «односкачковую» связь между маломощными абонентскими терминалами (АТ) в сетях «каждый с каждым» и снижая требования к пропускной способности радиолинии «центральная станция (ЦС)→РТР», а также защитить РТР от несанкционированного использования.

Бортовые комплексы «МЛА↔МБЦП» уже широко используются за рубежом, обеспечивая не только повышение энергетического потенциала и пропускной способности спутника-ретранслятора (например «Anik-F2», «Taicom-4» и др.), но и реализуя сети VSAT (Very Small Aperture Terminal — спутниковый терминал с малым размером антенны) любой топологии без строительства ЦС.

Однако в РФ процесс разработки и применения комплекса «МЛА↔МБЦП» неоправданно затянулся. Проведенные маркетинговые и научно-технические исследования, широко освещаемые в



а



б

Рис. В1. МЛА с узкими лучами на КА связи (а); мульти-сервисная бортовая цифровая платформа на КА (б)

научных и бизнес-журналах [4–13], позволяют выяснить причину такого положения и установить три основные области использования комплекса «МЛА↔МБЦП» в перспективных бортовых РТР. Это:

- гражданские ССС, управляемые российскими операторами космической связи (ФГУП «ГПКС», ФГУП «Морспутник», ЗАО «Глобалтел», ОАО «Газком» и др. [6]);
- развитие сетей на базе российской государственной группировки для решения социальных проблем [7, 8];
- совершенствование ССС в интересах развития телекоммуникационных систем с двойным применением [9].

Первое направление — реализация комплекса «МЛА↔МБЦП» на КА, управляемых российскими операторами космической связи (серии «Экспресс АМ», ФГУП «Космическая связь» и «Ямал», ОАО «Газпром космические системы» (рис. В2)), представляется маловероятным, поскольку при реализации этого проекта необходимо перестраивать сеть земных станций (ЗС).

Несмотря на то что спрос на спутниковые транспондеры с прямой ретрансляцией сигналов неуклонно растет [4], идти на большие финансовые затраты, связанные с внедрением бортового комплекса «МЛА↔МБЦП», без поддержки со стороны государственного бюджета операторы ССС пока не готовы. Максимум, на что могут пойти операторы ССС, — это применение МЛА в целях создания контурных диаграмм направленности (ДН) с высокой крутизной скатов и возможностью реконфигурирования зоны обслуживания путем включения и выключения парциальных лучей в процессе эксплуатации РТР. В настоящее время для создания контурных ДН в ССС, как правило, используются профилированные зеркальные антенны, обеспечивающие зоны обслуживания, достаточно точно совпадающие с территорией РФ и сопредельных государств (рис. В3).

На рисунке В3, а цифрами дана эффективная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) в дБВт, а на рисунке В3, б сверху — ЭИИМ, снизу — отношение усиления к эквивалентной шумовой температуре.

Второе направление применения комплекса «МЛА↔МБЦП» на РТР российской спутниковой группировки связано с решением важной социальной задачи — создания единого информационного пространства РФ. Только ССС может обеспечить население РФ современными информационными технологиями на ее громадной территории. Ни сотовая, ни радиорелейная (в том числе и тропосферная), ни волоконно-оптическая связи не обладают такими

возможностями, особенно применительно к Восточной Сибири и Дальнему Востоку.

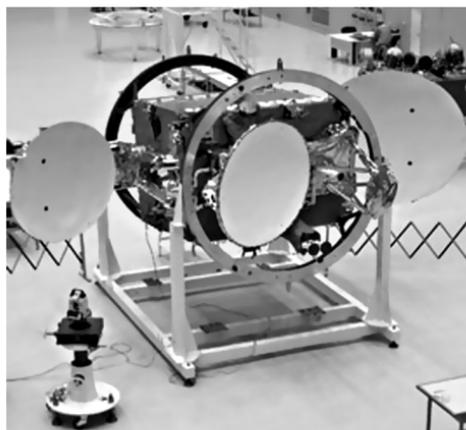
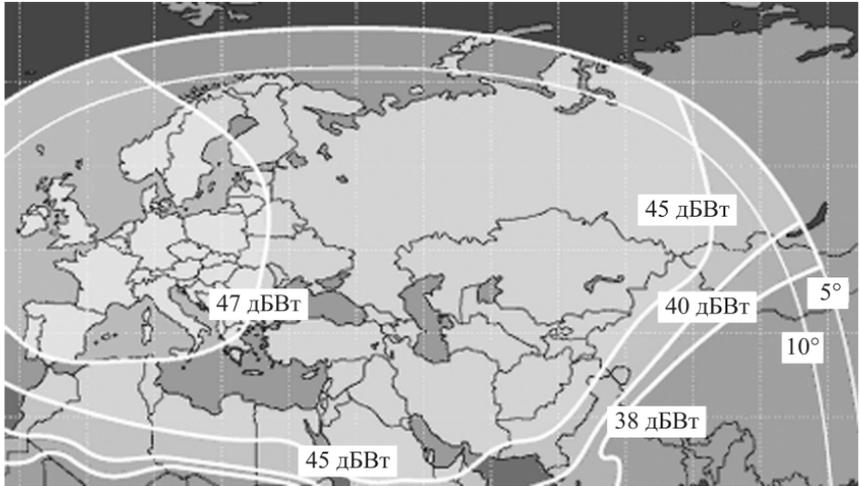
*а**б**в*

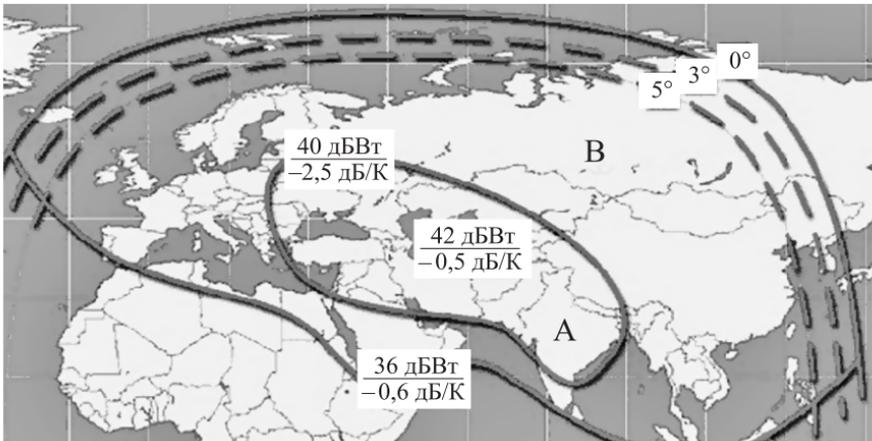
Рис. В2. КА серии «Экспресс АМ» (*а*); КА «Ямал-200» в сборочном цехе (*б*); КА «Ямал-200» в транспортном положении (*в*)

Эта задача рассматривалась в 2009 г. в рамках работы комиссии по модернизации и технологическому развитию экономики России. Системный проект «Обоснование и выбор оптимальных системно-технических решений в части космического сегмента российской спутниковой системы высокоскоростного доступа (РСС-ВСД)» [14–16], представленный этой комиссией, направлен

на обеспечение услугами широкополосного доступа (ШПД) населения на всей территории РФ.



а



б

Рис. В3. Контурная ДН РТР КА серии «Экспресс АМ» (а) и «Ямал-202» (б) для создания зоны обслуживания, совпадающей с территорией РФ и сопредельных государств

Анализ потребности населения в услугах ШПД показал, что наиболее перспективной, с точки зрения потенциальной абонентской базы, является сельская местность и пригороды. При этом по-

тенциальная абонентская база РСС-ВСД составляет около 2,1 млн абонентов и включение в ее зону обслуживания малонаселенных районов Восточной Сибири и Дальнего Востока является важнейшей социальной и государственной задачей.

В системном проекте РСС-ВСД утверждается, что практически полное покрытие территории РФ можно обеспечить двумя КА, базирующимися на ГСО в точках 60° в.д. и 130° в.д. и содержащими РТР с 32-лучевыми МЛА, построенными по схеме «один рупор — один луч». Каждый луч должен иметь ширину ДН по уровню половинной мощности $0,45^\circ \times 0,45^\circ$.

Распределение зон покрытия при использовании двух КА (с точками базирования 60° в.д. и 130° в.д.) с 32-лучевыми антеннами приведено на рис. В4.

При этом обеспечивается покрытие до 90 % территории РФ с углами места более 10° и с потенциальной пропускной способностью в пределах одного луча в 468 Мбит/с, а всей ССС — порядка 30 Гбит/с [15]. Потенциальная емкость РСС-ВСД соответствует 1,6 млн абонентов при подключении их на скорости 512 Кбит/с. При развертывании и совместном использовании космического сегмента РСС-ВСД и КА «Экспресс-АМ5» и «Экспресс-АМ6» обеспечивается требуемая емкость ССС на уровне 2 млн абонентов. Удельная пропускная способность на одного абонента составит порядка 18,7 Кбит/с, что сопоставимо с аналогичными показателями систем, разработанных компаниями ViaSat и EADS Astrium. Итоговая стоимость создания космического сегмента РСС-ВСД с учетом парного запуска двух КА одним ракетоносителем ориентировочно оценивается в 17,0 млрд руб.

Реализация РСС-ВСД в *Ka*-диапазоне позволит снизить стоимость АТ за счет установки в них зеркал диаметром 0,8 м, что увеличит их доступность для широкого круга потребителей (рис. В5).

Другим примером решения социальных задач с использованием ССС является канадский спутник «Anik-F2», оснащенный несколькими МЛА, работающими в *S*-, *Ka*- и *Ku*-диапазонах (рис. В6).

Тяжелый КА «Anik-F2», запущенный с космодрома Kourou (Французская Гвинея) 18 июля 2004 г. с помощью РН «Ariane-5», является одним из самых современных коммерческих телекоммуникационных РТР. Общая масса КА «Anik-F2» 5950 кг, полезная нагрузка — 3805 кг. Стоимость проекта — 600 млн канадских долларов (\$407 млн). Срок активного существования (САС) КА рассчитан на 15 лет.

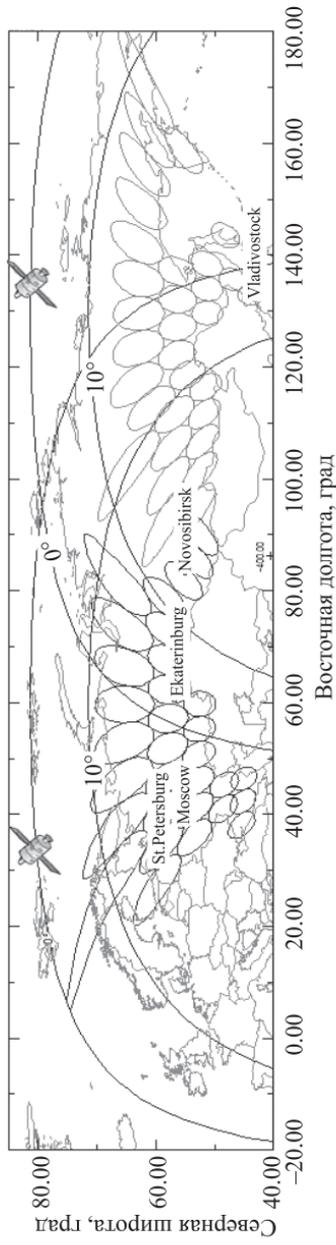


Рис. В4. Распределение зон покрытия 64 лучами по $0,45^\circ$ с КА в точках ГСО 60° в.д. и 130° в.д.

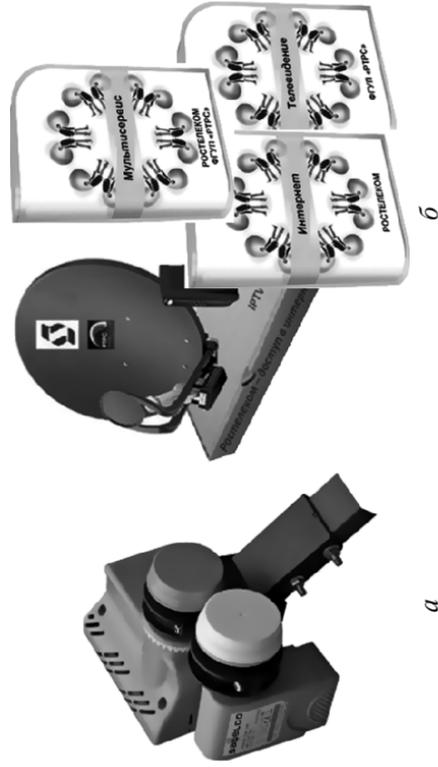


Рис. В5. Антенный терминал для продажи частным лицам:

а — приемо-передатчик *Ка*-диапазона;
б — общий вид антенного терминала с зеркалом $\varnothing 0,8$ м

а

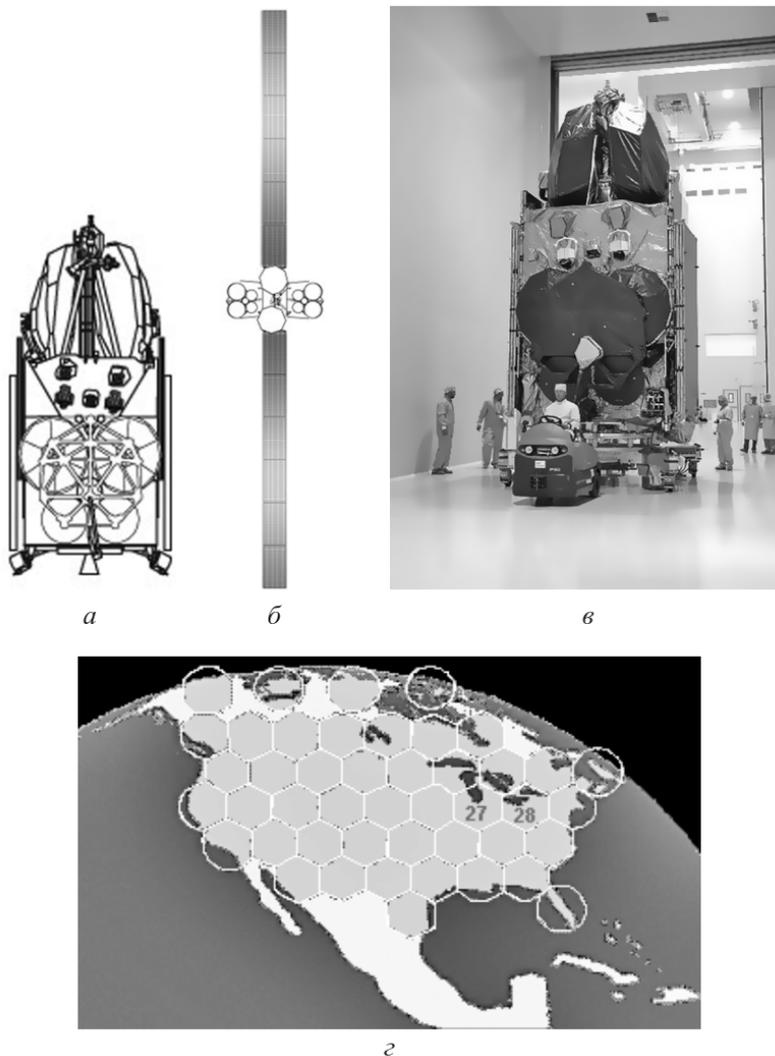


Рис. В6. Коммерческий телекоммуникационный КА «Anik-F2»:

a — схема транспортного положения; *б* — солнечные батареи; *в* — подготовка полезной нагрузки КА к запуску в цехе завода компании Boeing Satellite System (США); *г* — зоны обслуживания РТР «Anik-F2»

Ретранслятор КА «Anik-F2» функционирует в интересах широких слоев населения: оказывает высококачественные радиовещательные услуги и обеспечивает цифровую телефонную связь, а

также потребности бизнес-структур, правительства и других ведомств. Потенциально данная система может одновременно обслуживать до 1 млн потребителей. Широкополосный доступ в Интернет осуществляется с помощью РТР *Ка*-диапазона. Высококачественная цифровая телефонная связь и передача каналов спутникового ТВ осуществляется в *С*- и *Ku*-диапазонах. На рис. В.6, *з* показаны зоны обслуживания территории Северной Америки сканирующими лучами МЛА КА «Anik-F2».

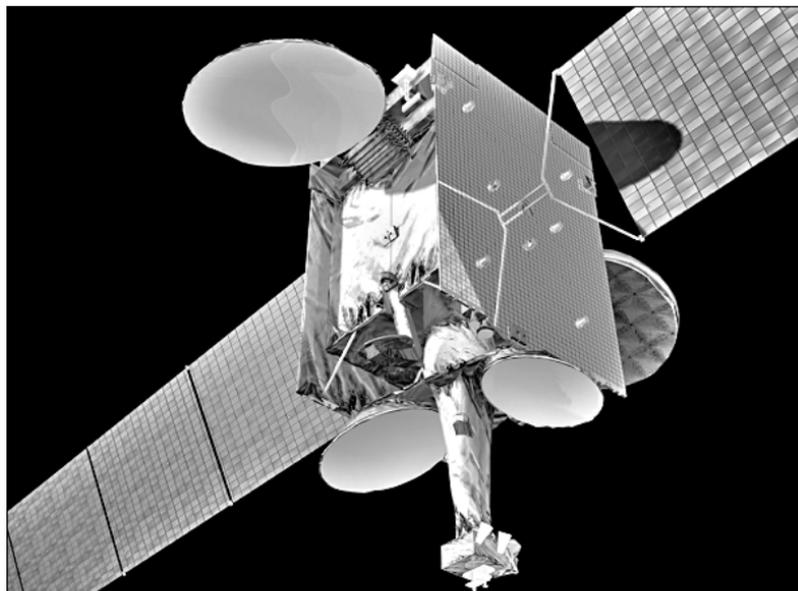
Еще одним примером решения социальных проблем является проект фирмы «Алкатель-Эспасио» — «АмерХис» [17], который софинансируют Европейское космическое агентство (ESA) и испанский Центр развития промышленной техники (CDTI). Проект «АмерХис» предоставляет широкий спектр услуг в области связи через КА «Amazonas», базирующийся на ГСО с точкой стояния 61° з.д. КА «Amazonas» выведен на ГСО в августе 2004 г. Бортовые системы «АмерХис» КА «Amazonas» маршрутизирует информацию в 4 контурных лучах [17] (рис. В7).

На рис. В8 показано оборудование системы «АмерХис», размещенное на борту КА «Amazonas» [17]. Вес системы «АмерХис» не более 30 кг, потребление порядка 160 Вт.

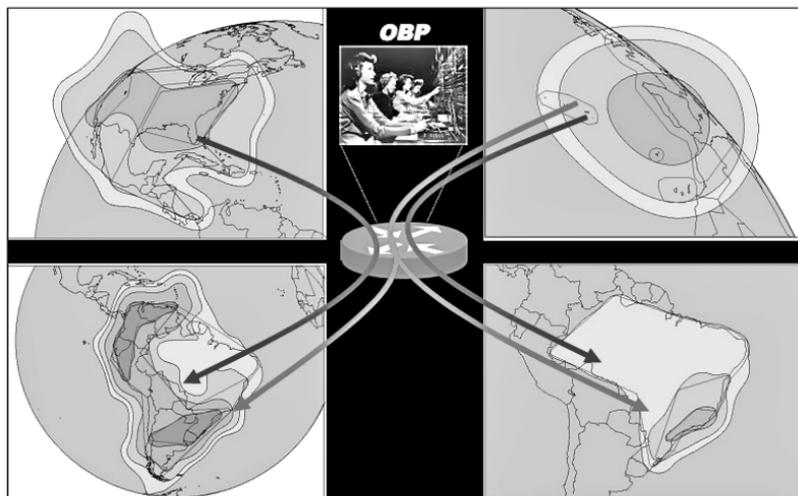
«Amazonas» — первый в мире КА гражданского назначения, который осуществляет коммутацию на борту. Благодаря проекту «АмерХис» компания «Hispasat/Hispamar» предоставляет мульти-сервисные услуги потребителям в любых районах Европы, Северной и Южной Америки без организации дорогостоящих и громоздких схем спутниковой ретрансляции, обеспечивая уникальные условия связи между различными зонами покрытия, и дает возможность реализовать большое число интерактивных спутниковых услуг в Атлантическом регионе.

Третьим направлением применения бортового комплекса «МЛА↔МБЦП» является совершенствование и развитие ССС, имеющих двойное применение [9]. Развитие телекоммуникационных систем военного назначения, расширение их возможностей является приоритетной задачей любого государства.

В ССС двойного назначения наблюдается непрерывный рост объемов и важности циркулирующих потоков информации. При этом возрастают требования к эффективности и качеству ССС. Основной акцент в системах двойного применения делается на широкомасштабное использование широкополосных высокоскоростных



a



б

Рис. В7. Проект «АмерХис» с 4-лучевой МЛА:

a — КА «Amazonas»; *б* — маршрутизация информационных сигналов КА «Amazonas» системой «АмерХис»

адаптивных антенн и цифровых устройств, способных обрабатывать большие объемы информации и обеспечивать требуемый уровень помехозащиты. Одной из основных задач ССС двойного применения является организация подвижной спутниковой службы (ПСС), а также надежной глобальной помехозащищенной ССС.

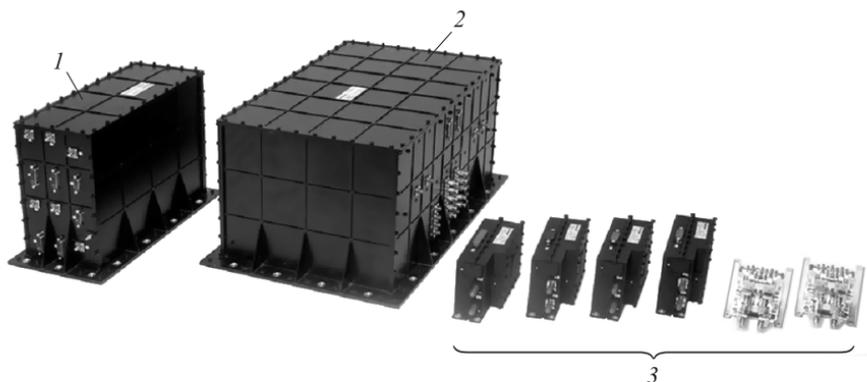


Рис. В8. Система «АмерХис»:

1 — преобразователи частоты; 2 — бортовой коммутатор; 3 — модуляторы

В решении перечисленных выше задач определяющим моментом являются технические характеристики бортовых антенн, к ним относятся: сектор обзора, количество лучей, характеристики направленности, а также массогабаритные параметры и параметры энергопотребления и энерговыделения.

Используемые во многих ССС гибридно-зеркальные антенны (ГЗА), построенные по двухзеркальной офсетной схеме [18, 19], не обеспечивают требуемый рельеф коэффициента усиления (КУ) антенны в глобальной зоне обслуживания. Жесткая привязка положения луча в зоне обслуживания не позволяет организовать ПСС. Применение частотно-поляризационного плана требует литерности приемных земных устройств по частоте и поляризации, что существенно усложняет и удорожает парк ЗС. При выходе из строя приемного тракта какого-нибудь луча существенным образом теряется потенциал этой зоны обслуживания. Поэтому, как правило, используется многократное покрытие зоны обслуживания, что не является оптимальным в случае организации ПСС.

Кроме того, большие габариты ГЗА в рабочем положении не позволяют размещать их под обтекателем полезной нагрузки РН без трансформации в транспортное положение [20]. Все это позволяет признать малопригодность таких антенн для применения в перспективных бортовых РТР ССС.

Поэтому построение бортовой многолучевой антенны, имеющей малые вес и продольные размеры и позволяющей осуществить цифровое диаграммообразование в пределах требуемого сектора обзора с возможной адаптацией характеристик направленности к помеховой ситуации, является ключевой задачей дальнейшего развития ССС.

Глава 1

Системы глобальной и региональной спутниковой связи и основные требования, предъявляемые к их антенным устройствам

1.1. Общие принципы построения систем спутниковой связи

ССС в общем случае состоит из системы РТР, расположенных на орбитальных КА, наземного сегмента ЗС и абонентов, объединенных системой управления. Ключевым устройством РТР является приемо-передающая антенна, с помощью которой осуществляется канал связи — ретрансляция сигнала от одного абонента к другому. Параметры антенны РТР оказывают решающее влияние на характеристики канала связи.

Первенство в создании ССС по праву принадлежит СССР. Первый запуск КА «Молния-1» (рис. 1.1, *а*) на высокоэллиптическую орбиту (рис. 1.1 *б*) был осуществлен 23 апреля 1965 г., а официальное открытие телевизионной сети «Орбита» с использованием этих КА связи состоялось 2 ноября 1967 г.

РТР КА «Молния-1» был оснащен двумя разворачиваемыми зонтичными антеннами диаметром 1,2 м (рис. 1.1, *в*), ширина диаграммы направленности (ДН) которых была около 18° , что обеспечивало связью в апогее орбиты всю видимую поверхность Земли. Бортовой передатчик на частоте $F = 0,8\text{--}1,0$ ГГц выдавал мощность 40 Вт. КА «Молния-1» предназначался для обеспечения телефонно-телеграфного сообщения на территории СССР, а также для передачи программ центрального телевидения на 20 специально созданных ЗС с зеркальными антеннами диаметром не менее 12 м (система «Орбита»).

Глава 2

Бортовая многолучевая зеркальная антенна для геостационарного космического ретранслятора *Ku*-диапазона

В настоящей главе приводятся результаты разработки ГЗА космического РТР, обеспечивающей связью абонентов, расположенных в пределах Российской Федерации.

2.1. Основные направления повышения эффективности бортового космического ретранслятора для обеспечения связью территории РФ

Рациональное использование частотно-орбитального ресурса является приоритетной государственной задачей. Количество КА на ГСО ограничено их угловым размещением ввиду девиации параметров орбиты и требованиями по их электромагнитной совместимости. Существующие КА разнесены примерно на 2° . Поэтому дальнейшее увеличение числа КА на ГСО связано с существенным улучшением их ТТХ и требует значительных финансовых и материальных затрат. В этом плане актуально применение в космическом РТР комплекса «МЛА \leftrightarrow МБЦП» (см. рис. В1 и 1.3), позволяющего экономно использовать частотно-орбитальный ресурс.

В настоящее время на рынке спутниковой связи наблюдаются две устойчивые тенденции [28]. Первая — расширение спектра услуг связи, вторая — снижение стоимости спутниковых абонентских (земных) терминалов (АТ), которая тесно связана с уменьшением диаметра его зеркальной антенны. Эти требования противоречивы по своей сути и могут быть реализованы только при использовании в составе РТР МЛА с узконаправленными лучами и

Глава 3

Зеркальный крупноапертурный излучатель для многолучевой антенной решетки системы спутниковой связи

В 1.4 были рассмотрены возможности построения ФАР из крупноапертурных излучателей (КАИ), предназначенных для обеспечения глобальной зоны обзора в ССС. На основе подобных ФАР могут быть созданы многолучевые антенные решетки (МАР) из КАИ. Однако подобные МАР обладают рядом существенных недостатков, главным из которых является увеличенный уровень боковых лепестков. Возможным способом устранения этого недостатка в таких МАР является использование более оптимального («квазиоптимального») КАИ, ДН которого в большей степени приближена к ступенчатой форме.

Квазиоптимальный КАИ может быть построен либо на основе зеркальных антенн с одним входом, имеющих максимально ступенчатую однолучевую ДН с шириной луча равной сектору обзора, в рассматриваемом случае $2\theta_{-3\text{дБ}} = 17,4^\circ$, либо на основе многолучевых зеркальных антенн, огибающая лучей которых в максимальной степени повторяет ступенчатую ДН, в рассматриваемом случае покрывающих конический сектор обзора с углом при вершине $8,7^\circ$. Возможные схемы построения зеркальных КАИ показаны на рис. 3.1.

В первом варианте используется специальный профиль зеркала, позволяющий сформировать максимально ступенчатую ДН (рис. 3.1, *а*). Вопросы построения квазиоптимального зеркального КАИ с одним входом рассмотрены в [56]. Во втором варианте КАИ представляет собой параболическое зеркало 1, в фокальной плоскости которого располагается n -элементный облучатель 2, имеющий n независимых входов (рис. 3.1, *б*). В однолучевом ква-

Глава 4

Линзовый многолучевой диэлектрический крупноапертурный излучатель MAP

В предыдущем разделе исследовался КАИ в виде зеркальных гибридных антенн, основным недостатком которых было затенение апертуры массивным облучателем. Линзовый КАИ лишен этого недостатка.

Кроме того, расположение облучателей перед линзой имеет ряд конструктивных преимуществ перед зеркальным, позволяя размещать МШУ и цифровые устройства в приборном блоке КА.

В гл. 4 изложены результаты исследования характеристик многоэлементного КАИ с диэлектрической линзой. В качестве основного выбран 7-элементный облучатель (рис. 3.3, *з*). В процессе моделирования линзового КАИ анализировались как геометрические размеры диэлектрической линзы, так и структура многоэлементного облучателя, позволяющие получить оптимальный рельеф коэффициента усиления в секторе углов обзора $\pm 8,7^\circ$.

4.1. Выбор профиля апланатической линзы

Важнейшим моментом при выборе профиля линзы является возможность обеспечения наиболее равномерного требуемого КУ в пределах сектора обзора. Как известно [61, 63, 64], апланатические линзы позволяют получить минимальное снижение КУ при смещении облучателя из фокуса линзы. Обычно теневая поверхность таких линз выбирается сферической [63]. Поэтому при дальнейших исследованиях теневой профиль линзы представлял собой сферический сегмент, а линза выполнялась в виде тела вращения (рис. 4.1). При этом профиль освещенной поверхности линзы определялся в приближении геометрической оптики [63].

Глава 5

Многолучевой линзовый крупноапертурный излучатель, выполненный на основе волноводной линзы

В данной главе рассматриваются характеристики КАИ, который состоит из волноводной линзы с облучателем в виде системы из семи рупорных антенн. Ориентировочная конфигурация волноводной линзы представлена на рис. 5.1.

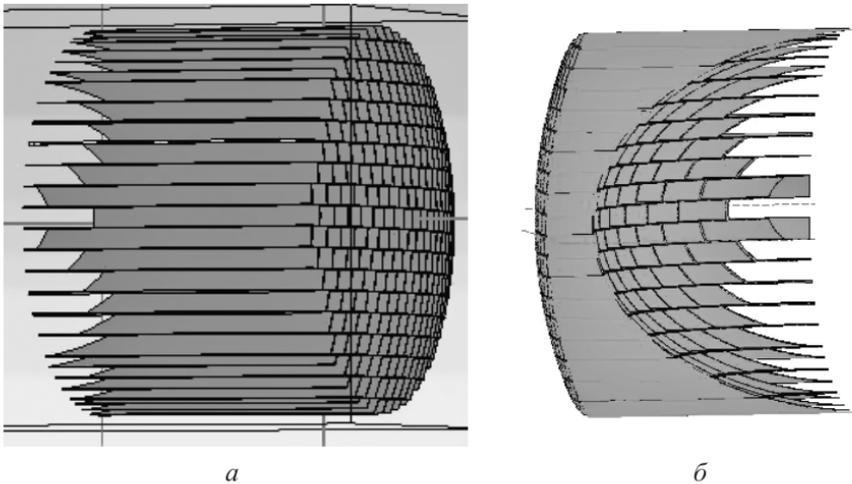


Рис. 5.1. Линзовый КАИ, выполненный в виде отрезков квадратных волноводов:

a — вид сбоку; *б* — вид в разрезе

Линза является телом вращения и состоит из отрезков квадратных волноводов с основной волной H_{10} или H_{01} , плотно примыка-

Многочуевые цифровые антенные решетки из крупноапертурных излучателей

6.1. Схемы построения бортовых многочуевых ЦАР из КАИ

Способы построения ЦАР рассмотрены в многочисленных работах, например [43–45, 65–67]. Там же приведены различные структурные и функциональные схемы построения приемных и передающих ЦАР. Применительно к рассматриваемой задаче возможные схемы приемной ЦАР показаны на рис. 6.1.

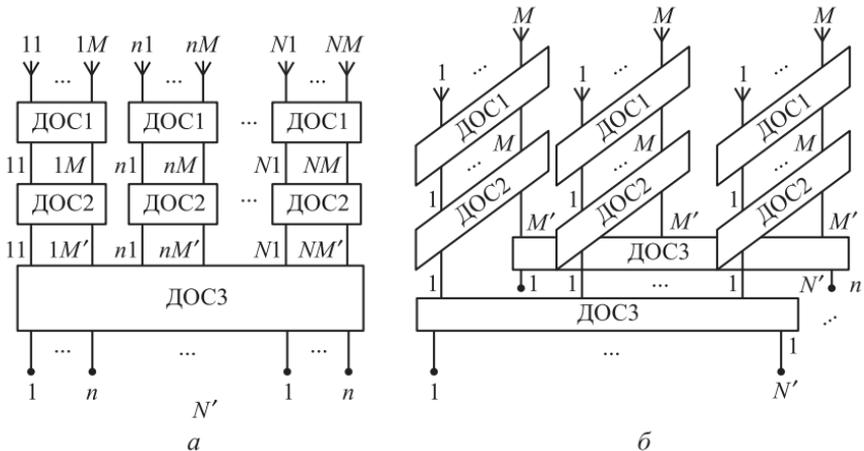


Рис. 6.1. Возможные схемы построения МАР:

a — МАР из N излучателей с N' выходами; *б* — МАР, использующая однотипные цифровые процессоры

Рассматриваемые цифровые МАР состоят из N КАИ (каждый из n -ных излучателей имеет M входов и M выходов), связанных

Глава 7

Схемотехнические и конструктивные решения по построению цифровой бортовой МЛА

7.1. Структурная схема входных цепей МАР

Оптимизация параметров КАИ, изложенная в гл. 3–5, позволяет сформулировать основные положения схемотехнических решений по построению цифровых бортовых МАР в X -диапазоне частот.

Во-первых, для обеспечения глобальной зоны покрытия с высоким КУ и возможности гибкой адаптации МАР должна выполняться в виде ЦАР из многолучевых КАИ.

Во-вторых, в качестве многолучевого КАИ для обеспечения конструктивных, транспортных и эксплуатационных требований целесообразно использовать линзовые КАИ, состоящие из отрезков волноводов.

В-третьих, схемотехнические и конструктивные решения должны базироваться на применении имеющейся элементной базы.

С учетом этого структурная схема входного устройства приемной ЦАР приведена на рис. 7.1.

МАР состоит из 7 линзовых КАИ. Каждый КАИ имеет 7-элементный облучатель и может принимать сигнал произвольной поляризации. Дальнейшие схемные особенности построения входного тракта приемной ЦАР определяются конструктивными особенностями исполнения МШУ и малошумящего преобразователя частоты (МШПр).

Возможные электрические схемы построения входного тракта, а также конструктивные исполнения волноводных трактов всей антенны зависят от конструктивных параметров блоков «МШУ \leftrightarrow МШПр».

Выполнение блока «МШУ \leftrightarrow МШПр» (рис. 7.1) в виде двухканального устройства, входом которого являются два прямоугольных

Литература

1. *Dragone C.* Unique reflector arrangement with very wide field of view for multibeam antennas // *Electron. Lett.*, 1983, 19, no 25, pp. 1061–1062.
2. *Ohtomo I., Kumazawa H., Yamada Y., Minomo M.* On-board *K*-band multibeam antennas configuration with low sidelobes and low crosspolarization. *Electron. Lett.*, 1986, 22, no. 21, pp. 1121–1122.
3. *Salmasi A.B., Rahmat-Samil Y.* Beam area determination for multiple — beam satellite application. *IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst.* 1983, 19, no. 3, pp. 405–412.
4. *Верзунов Г.В.* Бортовая обработка сигналов: перспективы и проблемы // *Технологии и средства связи. Специальный выпуск.* 2007. С. 52–58.
5. *Анпилогов В.Р.* Российский рынок спутниковой связи и вещания. Анализ состояния и прогноз развития // *Технологии и средства связи. Специальный выпуск.* 2007. С. 20–24, 26–28, 30, 32–33.
6. *Измайлов Ю.Д.* Развитие услуг спутниковой связи и вещания на базе российской государственной группировки // *Технологии и средства связи. Специальный выпуск.* 2007. С. 34–35.
7. *Анпилогов В.Р.* Современные спутники связи и вещания. Какой спутник нужен России // *Технологии и средства связи. Специальный выпуск.* 2006.
8. *Павлов В.И.* Перспективы развития национальной системы спутниковой связи и вещания на период до 2015 г. // *Электросвязь.* 2004. № 5.
9. *Мальцев В.* Вектор военно-космической безопасности // *Федеральное космическое агентство.* 2006. № 10. С. 50–55.
10. *Кудрявцев Г.Г.* Спутниковая связь: новый вектор // *Электросвязь.* 2004. № 5.
11. *Козлов А.А.* Перспективы строительства космических аппаратов серии «Экспресс» // *Электросвязь.* 2004. № 6.
12. *Быховский М.А.* Метод повышения эффективности использования частотно-орбитального ресурса в спутниковой связи // *Электросвязь.* 2007. № 11.
13. *Туман на орбите* // *Информкурьерсвязь.* 2006. № 1. С. 74.
14. *Вечтомов В.А., Кузенков А.Н., Дронов Д.В., Козлов А.А.* Принципы построения многолучевой антенны для проектируемой Российской спутниковой системы высокоскоростного доступа // *Материалы IV Всероссийской конф. «Радиолокация и радиосвязь».* М., 2010.
15. Обеспечение высокоскоростного доступа к информационным сетям через системы спутниковой связи // М.: РКС, 2010. Кн. 3. С. 244.

16. Вечтомов В.А., Зимин В.Н., Козлов А.А. и др. Бортовая многолучевая антенна Ka-диапазона для озонированного обслуживания территории РФ спутниковой связью с высокоскоростным доступом // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2012. С. 70–81.

17. Цепенфельд Ф. Перспективные проекты Европейского космического агентства в области спутниковых сетей VSAT // Технологии и средства связи. Специальный выпуск. Спутниковая связь и вещание. 2006. С. 24–27.

18. Анпилогов В.Р., Колчеев Г.Н. Антенные системы геостационарных спутников связи и вещания // Успехи современной радиоэлектроники. 1997. № 3. С. 3–17.

19. Анпилогов В.Р., Шишлов А.В., Эйдус А.Г.. Многолучевые антенные системы HTS // Технологии и средства связи. Специальный выпуск. Спутниковая связь и вещание. 2014. С. 54–67.

20. Бей Н.А., Вечтомов В.А., Гуркин Е.Н. и др. Бортовая многолучевая антенна космического ретранслятора // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2009.

21. Томаси У. Электронные системы связи. М., 2007. 1360 с.

22. Бертенев В.А., Болотов Г.В., Быков В.Л. и др. Спутниковая связь и вещание: справочник / под ред. Л.Я. Кантора. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1997. 528 с.

23. Анпилогов В.Р. Спутниковые системы связи: современное состояние и тенденции развития в мире и в России // Технологии и средства связи. Специальный выпуск. 2006.

24. Stirland S.J., Fox G.P.D., and Malik D.P.S. Comparison Between Multifeed and Shaped Reflector Satellite Antennas for Contoured Beams // AIAA-92, pp. 1571–1579.

25. Shogen K., Nishida H., Toyama N., Obuchi T., Miyata Y., Miyatani S. A Study of a Contoured Beam Antenna to Future Japanese DBS // AIAA-2045, pp. 1794–1802.

26. Dian D.D., Rahmat-Samit Y. A Generalized Diffraction Synthesis Technique for High Performance Reflector Antennas // IEEE Trans., AP-43, 1995, № 1, pp. 27–40.

27. Михайлов В.Ф., Мошкин В.И., Брагин И.В. Космические системы связи : учебное пособие / СПб.: ГУАП, 2006. 174 с.

28. Аносов А.М., Бей Н.А., Вечтомов В.А. Применение бортовых многолучевых антенн в системах спутниковой связи // Антенны. 2005. № 10.

29. Chandler C., Hoey L., Hixon D., Smigla T., Peebles A., Em M. Ka-band. Communications Satellite Antenna technology // TRW Space & Electronics, One Space Park, Redondo Beach, California 90278, USA. email: chuck.Chandler@trw.com

30. Loh Y.P. An Antenna Pointing Control for Communication Satellite // AIAA-92-1940-CP, pp. 976–986.

31. НТО СЧ НИР «Развитие технологической базы для бортовых ретрансляторов, в том числе с цифровой платформой для решения задач мультимедиа и цифрового телевидения». Раздел: «Разработка, обоснова-

ние и оптимизация решений по построению БРТК на основе базовых модулей в части МЛА для решения задач мультимедиа и цифрового телевидения» (шифр «МЛА»). М.: ОАО «МНИИРС», 2004. 127 с.

32. *Калошин В.А., Фролова Е.В.* Моделирование офсетной двухзеркальной апланатической антенны типа Грегори // Радиозлектроника. 2007. № 6.

33. *Калошин В.А., Фролова Е.В.* Моделирование офсетной двухзеркальной апланатической антенны типа Кассегрена // Радиозлектроника. 2007. № 7.

34. *Бахрах Л.Д., Галимов Г.К.* Зеркальные сканирующие антенны. М.: Наука, 1981.

35. *Chandler C., Hoey L., Hixon D., Chan R., Smigla T., Wilson L., Peebles A., Em M., Suleiman S.* Broadband Communications Satellite Antenna Technology for the Emerging Ka-Band Market // 7th Ka-Band Utilization Conference, Santa Margherita Ligure, Italy, 2001, pp. 1–8.

36. *Пономарев Л.И., Бей Н.А., Вечтомов В.А.* Гибридные зеркальные антенны // Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток : учебное пособие для вузов. Под ред. Д.И. Воскресенского. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2012. 744 с.

37. *Скобелев С.П.* Фазированные антенные решетки с секторными парциальными диаграммами направленности. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010.

38. Оборонительные Системы Спутниковой Связи (DSCS III). Орбитальная поддержка операций. Sol F04701-95-R-0013. Commerce Business Daily. СРП-1257, 6 января 1995 г.

39. *Симонов М.М.* Спутники — новые возможности в Азии // Технологии и средства связи. Специальный выпуск. 2006. № 5 (50). С. 28–33.

40. Journal of the National Institute of Information and Communications Technology (quarterly). Special Issue on the Engineering Test Satellite VIII (ETS-VIII), Vol. 50, No. 3/4, September/December 2003. URL: www.nict.go.jp/publication/shuppan/kihou-journal/journal-vol50no3.4.htm

41. *Слюсар В.И.* Цифровые антенные решетки в мобильной спутниковой связи // Первая миля. 2008. № 4.

42. *Слюсар В.И.* Фазированная антенная решетка системы Thuraya // Сети и телекоммуникации. 2002. № 5. С. 54–58.

43. *Слюсар В.И.* Цифровые антенные решетки в мобильной спутниковой связи // Первая миля. 2008. № 5.

44. *Добычина Е.М., Кольцов Ю.В.* Цифровые антенные решетки в бортовых радиолокационных системах. М.: МАИ, 2013. 160 с.

45. Активные фазированные антенные решетки / под ред. Д.И. Воскресенского, А.И. Канащенкова. М.: Радиотехника, 2004.

46. *Конторович М.И., Петрунькин В.Ю.* О наименьшем числе управляемых элементов в антенне с электрическим качанием луча // Радиотехника и электроника. 1961. Т. 6. № 12. С. 1982.

47. *Севастьянов Д.И.* «Газком» станет оператором универсальной спутниковой группировки // Технологии и средства связи. Специальный выпуск. 2006. С. 36–37.

48. Бей Н.А., Вечтомов В.А., Зимин В.Н. Антенны систем спутниковой связи и навигации : учебное пособие // под ред. Н.А. Бея. М.: Рудомино, 2010. 220 с.

49. Arun K. Bhattacharyya, Guy Goyette. A Novel Horn Radiator With Aperture Efficiency and Low Cross-Polarization and Low Cross-Polarization and Applications in Arrays and Multibeam Reflector Antennas // IEEE Transactions on AP, 2004, vol. 52, № 11.

50. Гинзбург А.Л., Жодзинский А.И., Ухабин Ю.В. Влияние погодных условий на характеристики радиолиний геостационарных спутников Кидиапазона // Технологии и средства связи. 2002. № 6. С. 40–44.

51. Калошин В.А., Фролова Е.В. Характеристики двухзеркальных осесимметричных апланатических антенн // Антенны. 2006. № 7.

52. Коган Б.Л. Кроссполяризация смещенной двухзеркальной антенны в геометрооптическом приближении // Антенны. 1999. № 2.

53. 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». 2009.

54. Литун В.И. Расчет зон покрытия земной поверхности многолучевой антенной ретранслятора // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2009. С. 18–22.

55. Young F.A., Rush W.V.T. Analysis of toroidal dual-reflector scanning antennas // IEEE Int. Symp., Dig. Antennas and Propagation, Univ. Md. College Parc, Md. N.Y.: 1978. Pp. 249–252.

56. Мельничук В.И., Шишлов А.В. Сравнение эффективности синтезированных различными методами антенн с контурными диаграммами направленности в случае двумерной задачи // Труды XI Молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь — перспективные технологии». М., 2013. 110 с.

57. Вендик О.Г., Парнес М.Д. Антенны с электрическим сканированием // под ред. Л.Д. Бахраха. М., 2001.

58. Ключев Д.С. Электродинамическая теория зеркальных и полосковых антенн : дис. ... докт. физ.-мат. наук. Самара : Поволжский государственный университет телекоммуникации и информатики, 2012.

59. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука, 1962.

60. Сазонов Д.М. Матричная теория антенных решеток // IV всероссийская школа-семинар по дифракции и распространению волн. Рязань, 1975.

61. Зелкин Е.Г., Петрова Р.А. Линзовые антенны. М.: Советское радио, 1974. 280 с.

62. Галимов Г.К. Зеркальные антенны. Т. 1. М.: Адвансед Солюшнз, 2010. 204 с.

63. Walter Rotman. Analysis of an EHF Aplanatic Zoned Dielectric Lens Antenna // IEEE Transactions on antennas and propagation, Vol. AP-32, No. 6, June, 1984.

64. Жук М.С., Молочков Ю.Б. Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств. М.: Энергия, 1973.

65. Проблемы антенной техники // под ред. Л.Д. Бахраха, Д.И. Воскресенского. М.: Радио и связь, 1989. 368 с.
66. Антенны и устройства СВЧ // под ред. Д.И. Воскресенского. М.: Радио и связь, 1994.
67. *Воскресенский Д.И., Овчинникова Е.В., Шмачилин П.А.* Бортовые цифровые антенные решетки и их элементы. М.: Радиотехника, 2013.
68. *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.
69. *Антипов В.Р.* Спутники связи и вещания // Спутниковая связь и вещание. 2006. С. 16–21, 77–79, 80–81.
70. *Монзинко Р.А., Мюллер Т.У.* Адаптивные антенные решетки. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
71. *Джиган В.И.* Адаптивная фильтрация сигналов. М.: Техносфера, 2013. 528 с.
72. *Cummings W.C.* An Adaptive Nulling Antenna for Military Satellite Communications // The Lincoln Laboratory Journal, 1992, V. 5, № 2.
73. *Бойко К.В., Курпиченков А.И., Перевоицков И.В., Шлаферов А.Л.* Узкополосный малощумящий транзисторный усилитель с термоэлектрическим охлаждением нижней части сантиметрового диапазона // Вопросы радиоэлектроники. 1997. Вып. 17. С. 30–35.
74. *Bornemann J., Senior Member, Labay V.A.* Ridge Waveguide Polarizer with Finite and Stepped-Thickness Septum // IEEE Transactions Onmicrowave Theory and Techniques, Vol. 43, No. 8. August, 1995.
75. *Пономарев Л.И., Мешковский В.Е., Вечтомов В.А.* и др. Оптимизированная антенная решетка из крупноапертурных излучателей для бортового ретранслятора»: тезисы докл. // XIX Международная НТК «Радиолокация, Навигация и связь». Воронеж, 16–18 апреля 2013 г.
76. Конструкционные материалы. Справочник // под ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990. 687 с.
77. Композиционные материалы. Справочник // под ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
78. *Алфутов Н.А., Зиновьев П.А., Попов Б.Г.* Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
79. *Kester W.* Taking the Mystery out of the Infamous Formula « $SNR = 6.02N + 1.76dB$ », and Why You Should Care // Analog Devices MT-001 Tutorial, 2008.
80. Микроэлектроника для космоса и военных. URL: [http:// habrahabr.ru/post/156049/](http://habrahabr.ru/post/156049/) (дата обращения: 08.02.2013).
81. *Солонина А.И., Улахович Д.А, Арбузов С.М., Соловьева Е.Б.* Основы цифровой обработки сигналов: курс лекций. 2-е изд., испр. и перераб. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 768 с.
82. *Richard G. Lyons* Understanding Digital Signal Processing. Pearson Education, 2010. 944 p.

Научное издание

Пономарев Леонид Иванович
Вечтомов Виталий Аркадьевич
Милосердов Александр Сергеевич

**Бортовые цифровые
многолучевые антенные решетки
для систем спутниковой связи**

Редактор *Е.Д. Нефедова*
Художник *Я.М. Ильина*
Корректор *Е.В. Николаева*
Компьютерная графика *О.В. Левашовой*
Компьютерная верстка *А.Ю. Ураловой*

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 01.11.2017. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 12,375 + 1,0 печ. л. цв. вкл. Тираж 100 экз. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru

Отпечатано в ПАО «Т8 Издательские Технологии»
109316, Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5.