

ненных с помощью некогерентных РЛС [2—4]. Эти расхождения свидетельствуют об отличии механизма формирования отраженных сигналов в случае использования некогерентных и когерентных РЛС миллиметрового диапазона.

Полученные результаты позволяют оценивать уровень пассивных помех на входе когерентных РЛС миллиметрового диапазона, возникающих из-за отражений от растительности, с помощью предложенной двухкомпонентной модели. Параметры модели зависят от сезона года и в меньшей степени — от направления ветра.

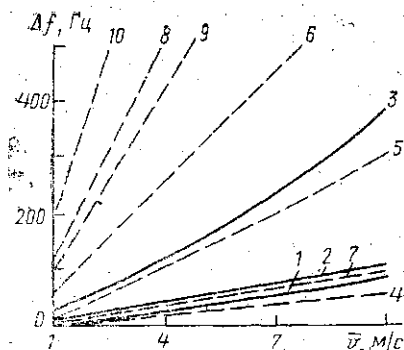


Рис. 5. Зависимость эффективной ширины спектра от средней скорости ветра, рассчитанной согласно [1, 3] — кривые 5, 6, а также измеренной: с помощью когерентной РЛС для травы, кустарника, дерева и леса — кривые 1—4 соответственно, и некогерентной РЛС для травы, дерева и леса — кривые 7, 8 ($\lambda=2,2$ мм), 9 ($\lambda=3,16$ мм) и 10

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кулемин Г. П., Разказовский В. Б. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами. Киев, 1980. [2] Андреев Г. А., Потапов А. А. //Зарубежная радиоэлектроника. 1984. № 11. С. 28. [3] Андреев Г. А., Потапов А. А., Хохлов Г. И. //Радиотехн. и электроника. 1982. 27, № 10. С. 1863. [4] Trebits R. N., Hages R. D., Vomar L. C. //Microwave J. 1978. 21, N 8. P. 49. [5] Коростелев В. С., Хлопов Г. И., Шестопалов В. П. //Изв. вузов, Радиофизика. 1990. 33, № 8. С. 895. [6] Арманд Н. А., Дякин В. А., Кибардина И. Н. и др. //Радиотехн. и электроника. 1973. 18, № 7. С. 1337. [7] Капитонов В. А., Меленчук Ю. В., Черников А. А. //Там же. 1973. 18, № 9. С. 1816. [8] Марпл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М., 1980. [9] Кендалл М. Дж. Теория распределений. М., 1966.

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1994. Т. 35, № 4

УДК 621.396

МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Ю. А. Пирогов

Рассматриваются перспективные микроволновые системы связи миллиметрового диапазона: наземные, спутниковые и размещаемые на высотном беспилотном летательном аппарате. Быстрое развертывание, всепогодность, высокая надежность, отсутствие кабеля, возможность обеспечения широкой полосы частот в канале передачи информации и прямого включения в существующие сети спутниковой, радиореальной и сотовой связи делают микроволновые системы уникальными для целого ряда приложений. Применение миллиметровых волн существенно увеличивает пропускную способность радиоканала, помехозащищенность и надежность передачи информации, уменьшает массогабаритные параметры и энергопотребление системы связи.

В последнее время широко обсуждаются перспективы и возможности бескабельной микроволновой связи. При этом не случайно максимальное внимание уделяется системам миллиметрового диапазона (ММД). В самом деле весьма успешные решения проблемы телекоммуникаций достигаются, например, в случае дальней связи — на длине волны $\lambda=8$ мм при дальности до 20—25 км ($P_{\text{рад}} \sim 100$ мВт), для

ближней беспомеховой (скрытной) связи — на волне $\lambda=5$ мм с поглощением в атмосфере (для защиты от помех) на спектральной линии кислорода, наиболее компактные системы связи средней дальности и сверхвысокой направленности — в 3-мм диапазоне. В перспективе ММД является совершенно уникальным для целого ряда применений, среди которых можно отметить межкомпьютерную связь со скоростью передачи информации до 1 Гбит/с и выше, межатс-ные и межбанковские телекоммуникационные системы емкостью не менее 10^4 телефонных каналов, охранные комплексы, телефонную и ТВ-связь с городами-спутниками и малыми населенными пунктами и др.

1. Наземные системы связи ММД

Как правило, наземные (тропосферные) системы связи ММД обеспечивают дальность действия не более 20—25 км (при выходной мощности от 100 мВт до 1 Вт на длинах волн ~ 8 мм): большей протяженности плеча связи препятствует поглощение радиоволн гидрометеорами даже в окнах относительной прозрачности атмосферы [1]. На рис. 1 показано влияние паров воды на прозрачность атмосферы на

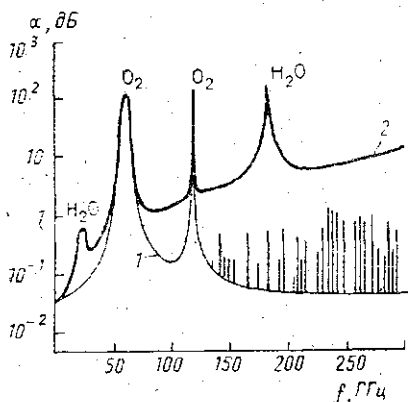


Рис. 1. Затухание в атмосфере («в зените») при отсутствии (1) и наличии (2) в воздухе паров воды (плотность 2 г/см³)

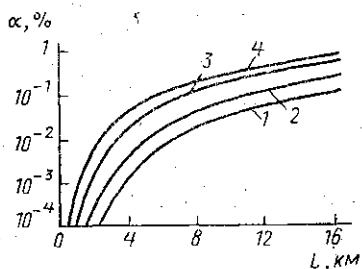


Рис. 2. Поглощение α (в %) 8-мм излучения в дожде интенсивностью 20—100 мм/ч; сигнал мощностью 150 мВт на частоте 38 ГГц измерялся на приземной трассе между антеннами с диаметром 30 см; интенсивность дождя 20 (1), 30 (2), 60 (3) и 100 мм/ч (4)

различных частотах ММД, а на рис. 2 представлен уровень поглощения радиоволн в дожде различной интенсивности (20—100 мм/ч) в зависимости от дальности связи на частоте 38 ГГц при 30-см диаметре антенн: как видим, в этой области частот поглощение незначительно (меньше 1%). Однако уже в 3-мм диапазоне дальность действия реальных систем с надежностью связи не менее 0,98 при дожде тропической интенсивности не превышает 3—5 км. В любом случае затухание в атмосфере является серьезным препятствием развитию устройств связи ММД, однако их компактность, высокая (почти кабельная) направленность, чистота эфира (отсутствие радиопомех в этом диапазоне), широкая полоса частот канала связи и относительно малая стоимость делают ММД-системы телекоммуникаций на коротких трассах более предпочтительными, чем системы сантиметровых волн [2].

Наибольшее применение находят дуплексные системы. На рис. 3 дается блок-схема приемно-передающего терминала дуплексной системы [3]. Особенностью ее является использование двух отдельных ис-

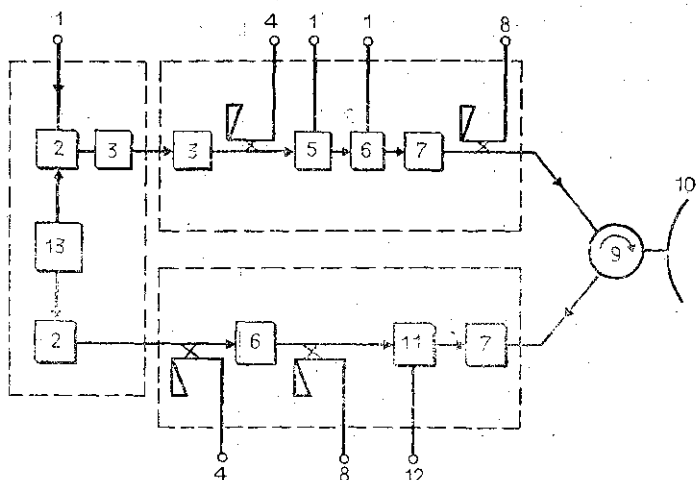


Рис. 3. Блок-схема приемно-передающего терминала дуплексной системы микроволновой связи 8-мм диапазона: 1 — сигналы управления, 2 — генераторы на ЛПД или диоде Ганна, 3 — вентили, 4 — выходы сигнала к схеме автоматической подстройки частоты, 5 — фазовый модулятор; 6 — управляемые аттенюаторы, 7 — волноводные полосовые фильтры, 8 — выходы сигнала к схеме контроля, 9 — циркулятор, 10 — антенна, 11 — смеситель с предварительным усилителем, 12 — выход ПЧ, 13 — источник питания

точников микроволн — генератора излучаемого сигнала и гетеродина приемника. Можно, однако, ограничиться в каждом терминале и одним генератором, если частоты сигналов прямого и обратного каналов связи разнесены на величину промежуточной частоты: тогда в режиме приема на смесительном диоде смешиваются волны принимаемого сигнала и немодулированного излучения (ответвленного с уменьшенной аттенюатором мощностью) собственного генератора, одновременно играющего роль гетеродина. Для систем связи характерны применение фазовой (ФМ) и частотной модуляции (ЧМ). В первом случае необходимо обеспечить стабильность генераторов на уровне не хуже 10^{-6} , во втором случае требования на стабильность частоты менее жестки ($\sim 10^{-4}$). Как правило, при цифровом методе передачи информации в режиме ФМ в качестве модуляторов фазы используются *pin*-диоды, а в режиме ЧМ для перестройки частоты — варакторы. Скорости передачи информации достигают 140 Мбит/с (дуплексная система фирмы «Siemens»), но типичными являются 2 или 10 Мбит/с (все российские системы, разработанные в НИИ «Исток», «Эра», СП «Бист», МГУ и др., а также зарубежные: «Alcatel», «Nokia», «Microwave Networks» и др.). Однако, имея в виду предел постоянной времени существующих *pin*-модуляторов (на уровне 10^{-11} с), можно утверждать, что скорости передачи информации могут быть увеличены по крайней мере до 10 Гбит/с. Это позволило бы транспортировать очень большие потоки цифровой информации, например аэрокосмической, при передаче широкополосных сигналов с обработкой на приемном терминале в режиме реального времени. Таким образом, системы ММД становятся реальным конкурентом волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) бла-

годаря не только их меньшей стоимости (для ВОЛС требуется прокладка кабелей), но и большей скорости передачи информации (реальные ВОЛС имеют максимальное быстродействие порядка 1 Гбит/с).

Наиболее устойчивая микроволновая связь обеспечивается на основе ФМ. При скоростях передачи менее 10 Мбит/с ФМ может осуществляться как в основном частотном канале (ММД), так и на более низкой частоте (100—1000 МГц) с последующим преобразованием вверх. Последнее позволяет упростить схему стабилизации частоты задающих генераторов и применить полосковые варианты включения *rip*-модуляторов. Вторая система ФМ значительно надежнее и выгоднее энергетически, как показали разработки НИИ «Исток» [3]. Самые коротковолновые системы дуплексной связи в 3-мм диапазоне (частота 95 ГГц) разработаны «Исткомом» [3], наиболее быстродействующие — зарубежными фирмами «Siemens» (140 Мбит/с) и «Microwave Networks» (45 Мбит/с).

В последнее время в связи с развитием локальных вычислительных сетей внутри зданий появилась необходимость бескабельного соединения компьютерных терминалов. Фирма «Motorola» (США) разработала для этих целей микроволновую дуплексную систему связи «Altair» на частоте 18 ГГц со скоростью передачи информации 470 кбит/с [4]. Это первый опыт микроволнового соединения ЭВМ в локальные вычислительные сети с передачей пакетов информации в формате Ethernet. Опыт оказался достаточно успешным (фирма приступила к серийному производству систем «Altair»), несмотря на умеренную пропускную способность канала связи, впрочем, сравнимую со скоростью обмена информацией между процессором компьютера серии AT и жестким магнитным диском системы памяти. Система «Altair» состоит из модуля управления и нескольких (до пяти) модулей пользователя, к которым подключается до шести ЭВМ. Модуль управления играет роль интеллектуального моста, читающего адрес пакета и направляющего пакет соответствующему модулю пользователя. Модули очень просто подключаются к ЭВМ и обеспечивают связь на расстояниях до 50 м (до ~10 м при наличии препятствий типа стен сухой кладки). В дальнейшем пропускная способность таких систем будет увеличена и область их применений значительно расширится.

2. Спутниковые системы связи

Микроволновые спутники связи сантиметрового диапазона в последние 20 лет стали неотъемлемой частью мировой телекоммуникационной системы [5, 6]. Однако необходимость расширения полосы частот (увеличения пропускной способности канала связи) и уменьшения габаритов бортовых терминалов заставляет переходить в диапазон более коротких, миллиметровых волн. Работа в ММД позволяет увеличить объем и скорость передаваемой информации, уменьшить число геостационарных спутников, обеспечить, не выходя в локальные сотовые сети, индивидуальную связь со спутником из автомобиля, самолета, морского судна, гостиницы, в полевых условиях и т. п. Высокое электродинамическое усиление антенн ММД при малой их апертуре, повышенная помехозащищенность и направленность связи также являются важным преимуществом ММД. Последнее, в частности, позволяет уменьшить мощность бортовых передатчиков и повысить надежность канала связи.

Обычно с ММД связывают повышенное затухание радиоволн в газах, составляющих атмосферу (см. рис. 1), и в гидрометеорах. Это вер-

но на горизонтальных тропосферных трассах, но для вертикальных и наклонных космических трасс эквивалентная толщина атмосферы не превышает 1,5 км, что соответствует всепогодной прозрачности практически во всем ММД.

Применение спутников связи на волнах ММД особенно выгодно малым странам, поскольку в случае ММД облучаемая со спутника площадь существенно уменьшается и не выходит за пределы малого государства. Поэтому не случайно пионерами в развитии спутников ММД-связи являются Япония [7—10], Италия [11] и Германия [12, 13], тогда как крупнейшие космические державы Россия, США и Китай [15, 16] только начинают разработки в этой области.

Сейчас в ММД действуют японские спутники «Sasuga» (CS-2A, -2B, -3A, -B) [7], итальянские «Italsat» [11], немецкие «DFS-Kopernikus» [12], спутник Европейского экономического сообщества «Olympus-1» [13], готовятся сориентированные на ММД экспериментальные спутниковые программы ACTS [14, 15] и Nortsar (США), ETS-6 (Япония) [7—9].

Спутниковая связь осуществляется по дуплексной схеме с сильным разнесением частот прямого и обратного каналов связи. Пока используются довольно низкие частоты 20/30 ГГц, но проводятся эксперименты и на частотах 40/60 ГГц и планируются исследования по созданию стволов персональной связи и связи с подвижными объектами в диапазоне 40/50 ГГц (в числителе дроби указаны частоты канала «спутник-Земля», в знаменателе — канала «Земля-спутник»).

Программа Italsat является типичной для современного состояния работ в области ММД. Она нацелена на создание рабочей цифровой спутниковой сети в комбинации с наземной микроволновой сетью. Итальянская программа содержит немало новинки: использование диапазона 20/30 ГГц и покрытие территории страны несколькими узконаправленными лучами с коммутацией их на борту ИСЗ. Обеспечивая связь в интересах государственных учреждений и частных фирм Италии, спутник «Italsat», запущенный в январе 1991 г., обслуживает системы телефонной связи и передачи высокоскоростной цифровой информации, проведение телеконференций и эксперименты в перспективном диапазоне 40/50 ГГц. Геостационарный спутник имеет 3 ретранслятора 20/30 ГГц с выходной мощностью 10 Вт и скоростью передачи информации 12 Мбит/с; 6 высокоскоростных (147 Мбит/с) ретрансляторов диапазона 20/30 ГГц мощностью до 20 Вт; радиомаяк 40/50 ГГц; 2 антенны диаметром 1,95 м с 6 лучами шириной 0,5°, перекрывающими на поверхности Земли площадки диаметром ~300 км. Наземные антенны имеют диаметр 1,5 и 3,5 м с усилением от 48 до 63 дБ и обеспечивают высокое качество приема с вероятностью ошибки не более $\sim 10^{-6}$ в течение 99% года при шумовых температурах приемников от 200 до 500 К.

Разработанные фирмой «Siemens» два спутника «DFS-Kopernikus» [12] (запущены в 1989 и 1990 гг.) обеспечивают двустороннюю телевизионную, радиотелефонную, факсимильную и высокоскоростную цифровую (140 Мбит/с) связь на частотах 20/30 ГГц между 30 наземными станциями (с антеннами диаметром от 3,5 до 11 м) на территории ФРГ и других европейских стран. Наземные станции снабжены охлаждаемым до гелиевых температур приемником (20 ГГц) с шумовой температурой около 100 К и ЛБВ-передатчиком (30 ГГц) мощностью 1 кВт.

Европейское космическое агентство (ESA) при участии 60 фирм Италии, Бельгии, Великобритании и др. вывело на орбиту в 1989 г.

самый мощный многоцелевой экспериментальный спутник связи «Olympus» общей массой 3300 кг с 600-кг полезной нагрузкой, рассчитанный на 10-летний срок функционирования [13]. Помимо исследований по отработке телекоммуникационных систем в перспективных диапазонах 12/20, 20/30, 40/50 и 50/60 ГГц предусмотрена обширная научная программа по изучению влияния гидрометеоров, выработке методики противодействия глубокому федингу сигнала из-за изменения погодных условий, фазовых и поляризационных искажений.

Первый экспериментальный спутник связи в ММД был запущен в 1977 г. в Японии на частотах 20/30 ГГц. Островное положение Японии и гористый рельеф обеспечивают высокую эффективность спутниковой связи, особенно при наличии развитой сети радиорелейных линий на частотах 4, 6 и 11 ГГц; однако большая плотность занятости эфира сантиметровыми излучениями также способствует переходу в системе спутниковой связи на частоты ММД. В 1980-е годы были осуществлены успешные запуски ряда японских геостационарных спутников серии ETS (Experimental Technological Satellite). Наиболее совершенный из них ETS-6 (запущен в 1994 г.) несет компактный (массой 11 кг) ретранслятор на частотах 40/50 ГГц для экспериментов по персональной связи на основе систем с антеннами наземного терминала диаметром 30 см и терминала на спутнике — 40 см при выходной мощности передатчиков 0,5 Вт. Приемники с промежуточной частотой 2 ГГц и коэффициентом шума 6 дБ имеют гетеродины с высокой стабильностью частоты ($\sim 10^{-7}$). Кроме того, в 1994—1995 гг. в Японии намечено вывести на орбиту наиболее крупный спутник CS-1 с 70 ретрансляторами и многолучевой бортовой антенной (10—20 лучей) для связи по 100 тысячам дуплексных каналов.

Весьма интересная программа NASA (ATCS) и фирмы «Norstar» в США (общей стоимостью только демонстрационного варианта в 500 млн долларов) после 1991 г. вошла в стадию реализации [7, 14, 15]. В диапазоне 20/30 ГГц предполагается реализовать самую перспективную систему антенного оборудования с коммутационной матрицей, системой скачкообразного перенацеливания лучей и процессором обработки сигналов. Общее число каналов связи составит 1728 при скорости передачи информации до 110 Мбит/с. Спутник оборудован тремя отдельными антеннами, из которых две: диаметрами 2,2 и 3,3 м служат соответственно для приема и передачи сигналов в рабочих каналах. Третья антенна диаметром 1 м предназначена для управления по служебному каналу положением диаграмм направленности рабочих антенн. Ретранслятор содержит приемник с малощумящим входным усилителем на *HEMT*-транзисторах, ЛБВ-передатчик мощностью 46 Вт и оборудование для автокомпенсации замираний сигнала во время дождя.

3. Региональные микроволновые системы на основе беспилотных летательных аппаратов

В России, а также в ряде других европейских государств (Чехия, Венгрия, Италия, Греция) рассматриваются и альтернативные спутниковым проекты систем телекоммуникаций, основанные на применении высотных (15—25 км) беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) регионального назначения. Основная суть предложений сводится к использованию БПЛА в качестве высотной платформы для ретрансляции радиосигналов многоканальной системы связи в сантиметровом и дециметровом диапазонах, а также для ретрансляции сигналов на-

правленных высокоскоростных линий межкомпьютерной связи ММД. В качестве БПЛА может использоваться высотный самолет (вертолет) с автопилотом или радиоуправлением с Земли, аэростат или дирижабль. Однако наиболее предпочтительно применение легкого самолета с размахом крыльев 12—15 м и массой 100—150 кг, для которого практически нет проблем безопасности в случае потерь управления аппаратом, поскольку для его сохранения при аварии возможно использование парашютных устройств. На борту БПЛА может размещаться разнообразная телеметрическая аппаратура, а также системы связи оптического, инфракрасного и микроволнового диапазонов. Из-за очень высокой стоимости эксплуатации как спутниковых, так и пилотируемых самолетных и вертолетных носителей использование БПЛА становится актуальным при осуществлении следующих программ.

1. Анализ состояния поверхности Земли, океана и атмосферы в видимом, ИК и микроволновом диапазонах с помощью как активных средств (радары миллиметрового и сантиметрового диапазонов, трассовые лидары наземного базирования с угловыми рефлекторами на борту БПЛА), так и пассивных (оптические и матричные ИК-приемники отраженного излучения Солнца, ИК и микроволновые радиометры) в интересах геофизики, экологии и военного дела.

2. Направленная широкополосная (1—2 ГГц) радиосвязь от точки к точке в ММД на частотах 30—150 ГГц с помощью малогабаритного (5—10 кг) бортового ретранслятора, обеспечивающего скорости передачи информации до 150 Мбит/с в режиме реального времени, в том числе на межкомпьютерных линиях, связь по 10^5 телефонным каналам, телевизионную трансляцию по 50—100 каналам, межсотовую связь между БПЛА-ядрами ячеек и т. п.

3. Всенаправленная внутрисотовая радиосвязь в сантиметровом диапазоне с обзором территории до 10^5 км², в том числе с ретрансляционным БПЛА-ядром охранной системы — для приема сигналов тревоги со всех точек контролируемой территории и направленной передачи на миллиметровых волнах в пункт контроля. При этом возможна организация региональной системы пеленга и навигации как автономной, так и с включением в спутниковую глобальную навигационную систему.

4. Внутрисотовая телефонная персональная связь в сантиметровом и дециметровом диапазонах.

5. Межсотовая высоконаправленная широкополосная радиосвязь между БПЛА-ядрами сотовых ячеек в ММД, в том числе надтропосферная беспомеховая с 60-ГГц несущей.

Связь на основе БПЛА-ретрансляторов имеет многочисленные достоинства. Так, с их применением значительно увеличивается дальность широкополосной радиосвязи ММД, так как трасса сигнала проходит в основном вне (выше) тропосферы, имеющей, как отмечалось, эквивалентную толщину по вертикали не более 1,5 км: в случае БПЛА-ретранслятора предел дальности связи может быть увеличен до 100—150 км по сравнению с 20 км на приземной горизонтальной трассе. Вместе с тем релейные линии ММД с БПЛА-ретранслятором позволяют увеличить базу (расстояние между ретрансляторами) до 900 км. При этом бортовой ретранслятор ММД в блочно-интегральном исполнении не превышает по массе 5 кг при диаметре антенны не более 30 см, энергопотреблении не более 200 Вт, излучаемой микроволновой мощности 0,1—1 Вт и чувствительности приемников дуплексного ретранслятора 0,2 К·с.

С использованием фазированных антенных решеток ММД на бор-

ту БПЛА (общая масса бортовой радиосистемы при этом возрастает до 10—15 кг) может осуществляться электронное сканирование участка подстилающей поверхности до 100 км² с рэлеевским разрешением до 30—100 м. С применением алгоритмов сверхразрешения, основанных на методах математической редукции [17, 18], обеспечивается разрешение до 1—5 м не только в активном (с помощью локатора с синтезированной апертурой), но и в пассивном (радиометрическом) режиме наблюдения. Кроме того, путем использования современных морфологических методов анализа оптических, ИК и микроволновых изображений возможно эффективное распознавание слабоконтрастных объектов по эталонам в памяти бортового компьютера [19].

БПЛА-системы на 2—3 порядка дешевле спутниковых, мобильны, автономны и просты в эксплуатации. Что особенно важно, они не требуют столь высокого уровня многолетней надежности, как дорогостоящие спутниковые модули. Находясь не более 3—7 сут в рабочей точке и действуя в челночном режиме, модули БПЛА могут проходить еженедельную профилактику и при необходимости блочную замену, оказываясь в итоге намного надежнее спутниковых систем.

В качестве первого этапа реализации БПЛА-программы целесообразно создание региональной системы связи над территорией до (1—10) · 10³ км². С помощью трех БПЛА-челноков можно реализовать при этом два режима функционирования: 1) всенаправленный сбор на борту БПЛА информации с Земли в сантиметровом диапазоне и адресная передача на наземный пункт приема на волнах ММД; 2) узконаправленная помехозащищенная сверхширокополосная 50—100-км линия передачи от точки к точке.

В заключение отметим, что перспективы микроволновых систем телекоммуникаций связываются прежде всего с повышением пропускной способности каналов связи до 1—10 Гбит/с и более. Это возможно только в ММД. Однако при переходе к более высоким скоростям передачи информации возникает целый ряд не вполне решенных принципиальных физических проблем, наиболее важными из которых являются следующие: 1) модуляция с излучением сверхкоротких (малопериодных) ФМ- и ЧМ-импульсов; 2) стабилизация частоты генераторов на уровне 10⁻⁷—10⁻⁸, особенно важная при фазовой модуляции сигналов; 3) демодуляция с высокой надежностью распознавания сигналов; 4) высокочувствительный прием в режиме прямого усиления сверхкоротких радиоимпульсов и др.

Автор выражает признательность С. В. Люсину за полезные обсуждения и информацию о ряде зарубежных спутниковых систем связи ММД, а также С. А. Филиппычеву за участие в работе над проектом БПЛА-ретранслятора.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. М., 1988. [2] Pick D. R. // Proc. 16th Eur. Microwave Conf. Dublin, Ireland. 1986. [3] Амирян Р. А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1992. 33, № 3. С. 111. [4] Riny S. // PC Magazine. 1991. June 11. P. 40. [5] Зарубежные спутники связи: Справочник. М., 1990. [6] Гвозденко А. А. // Зарубежная радиоэлектроника. 1990. № 9. С. 11. [7] Kondo K. // Proc. 13th Int. Commun. Satell. Syst. Conf. Los Angeles. March 11—15, 1990. Pt. 1. P. 1. [8] Nakamura K. // Ibid. P. 65. [9] Sawanabe E. // Space Commun. 1990. 8, N 1. P. 31. [10] Nakamura K. // Techn. Jap. 1990. 23, N 1. P. 57. [11] Adamon A., Barbaliscia F., Florio A. // Riv. Tecn. Selenia. 1989. 11, N 2. P. 157. [12] Pletschacher P. // Luft- und Raumfahrt. 1990. 11, N 3. P. 10. [13] Tartaga G. // Proc. Olympus Util. Conf. Vienna, 1989. P. 103. [14] Stoddard R. // Satellite Commun. 1990. 14, N 1. P. 16. [15] Wright D. L. // Proc. IEEE. 1990. 78, N 7. P. 1165. [16] Зарубежные коммерческие спутниковые системы связи/Ред. Н. Н. Ва-

ильева, Н. С. Сотникова, М., 1989. [17] Пытьев Ю. П. Математические методы интерпретации физического эксперимента. М., 1990. [18] Гладун В. В., Пирогов Ю. А., Пытьев Ю. П., Сердобольская М. Л. // Тез. докл. 9-й Всесоюз. конф. «Планирование и автоматизация эксперимента в научных исследованиях». М., 1989. Ч. 2. С. 144. [19] Пытьев Ю. П., Чуличков А. И. ЭВМ анализирует изображение. М.: «Знание», 1988. № 5.

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1994. Т. 35, № 4

УДК 621.391

АДАПТИВНАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА С УГЛОВОЙ И ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ СЕЛЕКЦИЕЙ СИГНАЛА И ПОМЕХ В КОСМИЧЕСКОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ

В. В. Балинов, Ю. В. Березин, Н. В. Потапова

Разработана математическая модель адаптивной антенной решетки с угловой и поляризационной селекцией (ААР с УПС) радиосигналов; в рамках этой модели исследовано качество работы такой решетки на космической линии радиосвязи при приеме полностью поляризованных полезного сигнала и помехи в присутствии аддитивного шума. Показано, что ААР с УПС обеспечивает в среднем выигрыш в отношении сигнал/(помеха+шум) не меньше 10 дБ даже в самом неблагоприятном случае приема, когда сигнал и помеха идут с одного направления.

Введение

Принципы построения адаптивных антенных решеток (ААР), предназначенных для улучшения качества приема полезного сигнала в присутствии помех, известны [1]. Наиболее часто отличительными признаками принимаемых электромагнитных полей служат частотный спектр или направление прихода. Однако известно, что таким признаком может быть и поляризация электромагнитного поля [2—5].

Весьма перспективно использование углов прихода и поляризации как совместных отличительных признаков разных полей одной частоты, так как при этом число независимых параметров в пространстве действительных переменных, с помощью которых описывается векторное поле $E(\omega)$, возрастает с двух до четырех — кроме угла места (θ) и азимута (ϕ), определяющих направление прихода волны, появляется фазор поля $P = \text{Re} P + i \text{Im} P$, характеризующий его поляризацию.

В этом случае диаграмма направленности ААР должна быть определена в пространстве четырех переменных $F(\theta, \phi, \text{Re} P, \text{Im} P)$. Очевидно, что это существенно расширяет возможности раздельного приема волн одной частоты.

Постановка задачи

Один из возможных принципов оптимальной обработки смеси полезного сигнала и помехи — это их селекция по совокупности углового и поляризационного признаков. Этот принцип может быть реализован с помощью соответствующей адаптивной антенной решетки.

Пусть адаптивная антенная решетка с угловой и поляризационной селекцией (ААР с УПС) расположена на борту искусственного спутника Земли (ИСЗ), находящегося на геостационарной орбите. Источники векторных полей полезного сигнала и нескольких помех одной частоты расположены на поверхности Земли, видимой с ИСЗ. Идеали-