

СОВМЕЩЕННЫЕ АНТЕННЫ КУ-ДИАПАЗОНА ДЛЯ СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ И ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Е. В. Овчинникова, М. Куран, А. Ю. Ганицев

Антенны Ку-диапазона являются важными технологиями, разработанными для повышения эффективности спутниковой связи и телевизионных систем. Эти антенны обеспечивают широкую полосу пропускания и высокую скорость передачи данных, что делает их идеальным решением для спутниковой связи и телевизионного вещания. В системах спутниковой связи Ку-диапазона используются два поддиапазона: 10,70 – 12,75 ГГц и 13,25 – 14,80 ГГц; первый – для приема, второй – для передачи. Разделение каналов осуществляется по поляризации. В будущем для расширения функциональности систем Ку-диапазона, увеличения скорости передачи данных и повышения энергетического потенциала потребуется модернизация антенн. Также рассматриваются инновационные решения, такие как технология тонких пленок, для повышения производительности низкопрофильных антенн Ку-диапазона и многолучевые технологии, способные обслуживать нескольких пользователей одновременно. Адаптивные антенные системы с поддержкой искусственного интеллекта улучшают связь за счет направленного формирования луча и управления помехами. В статье рассматривается структура антенных решеток Ку-диапазона, технологии их изготовления и моделирования с учетом условий эксплуатации. Также анализируются преимущества и недостатки антенн спутникового телевидения и перспективы развития этих систем.

Ключевые слова: антенные решетки спутниковой связи и телевидения, двухдиапазонные антенны, антенны с управляемой поляризацией, низкопрофильные антенны, широкополосные и диапазонные антенны, адаптивные антенные решетки.

Технологии и инновации антенн Ку-диапазона

Спутниковые системы связи и телевидения являются неотъемлемой частью современного общества, и для повышения их эффективности постоянно разрабатываются новые технологии. Антенны Ку-диапазона обеспечивают широкую полосу пропускания и высокую скорость передачи данных, что делает их идеальным решением как для спутниковой связи, так и для телевизионных передач. Недавние исследования были сосредоточены на повышении производительности антенн Ку-диапазона за счет оптимизации их конструкции и производительности. В системах спутниковой связи, работающих в Ку-диапазоне, используются два поддиапазона: 10,70 – 12,75 ГГц и 13,25 – 14,80 ГГц. Первый поддиапазон используется для приема, второй – для передачи. Разделение каналов также осуществляется поляризацией [1, 2]. В работе [2] представлен обзор антенных решеток систем спутниковой связи и спутникового телевидения.

Новые материалы и технологии производства

Традиционные параболические рефлекторные антенны крупные и тяжелые, что создает трудности при транспортировке и установке. В связи с этим существует необходимость в более легких, низкопрофильных и высокоэффективных антеннах. Цзяньцюань Хуан и его команда [3] разработали низкопрофильную, ультралегкую и высокоэффективную плоскую антенную решетку с круговой поляризацией для удовлетворения этих требований. Основной излучающий элемент антенны – это четырехэлементная подрешетка, которая позволяет использовать круговую поляризацию, и улучшенную распределительную систему с использованием

технологии последовательного поворота. Излучатели, напечатанные на тонкой полиамидной пленке, и поддерживающая пена обеспечивают механическую прочность при минимальном весе. Эта антенная решетка работает в диапазоне частот 11,55 – 12,25 ГГц с полосой пропускания 700 МГц, обеспечивая высокоэффективную работу с максимальным коэффициентом усиления 26,4 дБи. Низкопрофильная и ультралегкая конструкция снижает вес спутников, что уменьшает затраты на запуск, а высокая эффективность обеспечивает более мощную передачу сигнала. Однако сложность конструкции может увеличить затраты на производство и потребовать точных производственных методов для достижения высокой эффективности. С появлением новых материалов вес антенны можно легко уменьшить, тем самым увеличив ее адаптивные способности.

В работе [4] предложена двухвинтовая спиральная антенна для многолучевых антенных решеток с двойными и круговыми поляризациями. Антенна имеет два плеча, которые работают независимо для противоположных круговых поляризаций; одно плечо питается от центральной точки, а другое от внешней точки, образуя противоположную структуру питания. Разработанная антенна демонстрирует высокую производительность в Ку-диапазоне с возможностью направлять несколько лучей одновременно и с двойной поляризацией, но размеры спиральных антенн могут быть неудобными для компактных конструкций, а многолучевая структура усложняет систему управления. Уменьшение размеров спиральной антенны может расширить ее применение на спутниковых платформах, а использование алгоритмов с поддержкой искусственного интеллекта может упростить управление многолучевой антенной.

Исследование [5] представляет антенную решетку с двойной круговой поляризацией, предназначенную для спутниковой связи в Ku-диапазоне, характеризующуюся высоким коэффициентом усиления и оптимальными радиационными характеристиками. Эта антенна представляет собой ультратонкую фазированную решетку и разработана вместе с интегрированными приемниками. Обеспечивая эффективную передачу сигнала в Ku-диапазоне, она повышает производительность систем спутниковой связи, а двойная круговая поляризация улучшает управление поляризацией сигнала и уменьшает помехи, что обеспечивает более высокую эффективность передачи данных в приложениях Ku-диапазона. Ультратонкая конструкция антенны упрощает монтаж и интеграцию. Однако интегрированные приемники могут увеличить общий размер антенны. Следовательно, миниатюризация интегрированных приемников может оптимизировать производительность антенны.

В статье [6] разработаны три разные конфигурации подрешетки, изготовленные с использованием стереолитографии и металлизации. Это исследование показывает, как передовые производственные технологии, такие как 3D-печать, и тщательная оптимизация дизайна могут быть использованы для повышения компактности и эффективности фазированных антенных решеток для спутниковой связи и радарных систем. 3D-печать выделяется как метод, который можно настроить и который предоставляет преимущества с точки зрения затрат, а адаптивная структура может приспосабливаться к различным потребностям связи. Однако процессы 3D-печати и материалы могут иметь определенные ограничения в производительности, а компактный дизайн может создавать проблемы с охлаждением. Инновации в науке о материалах могут улучшить производительность антенн, напечатанных на 3D-принтере, и преодолеть эти трудности с помощью интеграции более продвинутых алгоритмов. Микрополосковые антенны особенно важны для сетей связи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) благодаря таким характеристикам, как высокая направленность и широкая полоса пропускания.

В статье [7] представлено детальное описание плоской и линейной антенной решетки 1×4 , работающей на частотах 11, 18 и 27 ГГц. Эти частотные диапазоны подходят для связи в Ka- и Ku-диапазонах. Исследование показывает, что эта многочастотная фазированная антенна, оптимизированная для обнаружения БПЛА, демонстрирует высокую производительность и является перспективной для ис-

пользования в сетях беспилотной связи. Микрополосковые антенны предлагают низкую стоимость и компактный дизайн, но могут испытывать потерю производительности на широких частотных диапазонах и требуют дополнительной мощности и обработки для увеличения дальности обнаружения. Использование новых материалов и проектных методик может повысить производительность микрополосковых антенн.

Искусственный интеллект и глубокое обучение

Искусственные нейронные сети (ИНС) используются как эффективный инструмент для улучшения характеристик антенн, таких как коэффициент усиления, полоса пропускания и другие показатели производительности. В исследовании [8] рассматриваются применения алгоритмов глубокого обучения в процессах оптимизации проектирования антенн. Оптимизация геометрических размеров антенны была выполнена с использованием ИНС. Патч-антенна на базе планарного диэлектрического волновода резонирует на частоте 16,10 ГГц и демонстрирует низкие уровни обратных потерь, варьирующихся от -10 до -19 дБ. Оптимизация, выполненная с использованием MATLAB-модели ИНС, повысила производительность и точность антенны.

В работе [9] представлена компактная ультраширокополосная антенна, оптимизированная для обеспечения высоких скоростей передачи данных и широкой полосы пропускания в Ku-диапазоне. Оптимизация параметров антенны была выполнена с использованием ИНС. Этот метод обеспечивает высокую точность в улучшении производительности антенны и ускоряет процесс оптимизации, повышая эффективность.

В статье [10] рассматривается оптимизация параметров микрополосковой патч-антенны для применения в Ku-диапазоне (12 – 18 ГГц) с использованием ИНС. В результате процесса оптимизации был увеличен коэффициент усиления антенны, и достигнуты низкие значения ошибки. Этот метод обеспечивает высокую точность в разработке высокопроизводительных антенн для частот Ku-диапазона и ускоряет процесс оптимизации, делая его более эффективным. Однако обучение и оптимизация нейронных сетей требуют больших объемов данных и вычислительных мощностей, а точность модели зависит от набора данных, на котором она обучена. Необходимо разрабатывать версии нейронных сетей, которые работают быстрее и требуют меньше данных, а также исследовать новые подходы и техники для оптимизации параметров. Интеграция алгоритмов

машинного обучения и антенн значительно улучшает производительность беспроводных систем связи в частотах Ku-диапазона.

В работе [11] рассматривается, как технологии Ku-диапазона (12 – 18 ГГц), алгоритмы машинного обучения и системы на базе интернета вещей могут быть интегрированы для обеспечения непрерывной беспроводной связи. Эта технология увеличивает производительность системы, позволяя передавать несколько потоков данных одновременно в густонаселенных районах. Алгоритмы машинного обучения оптимизируют беспроводную связь, решая задачи по распределению ресурсов и управлению помехами, в то время как интеграция интернета вещей обеспечивает более умную и адаптивную связь. Технология Ku-диапазона делает системы более эффективными и надежными благодаря высоким скоростям передачи данных и уменьшенным атмосферным потерям. Ku-диапазон имеет критическое значение для спутниковой связи и радарных систем.

В работе [12] рассматриваются преимущества и ограничения таких технологий, как высокоподвижные электронные транзисторы на основе арсенида галлия (GaAs) и согласованные антенные решетки. Измерения показателей производительности этих технологий демонстрируют высокий коэффициент усиления и низкий уровень шума. В будущем ожидается, что эти технологии достигнут еще более низких уровней шума и более широкой полосы пропускания. В статье представлены сведения о текущем состоянии и будущих вызовах методов формирования луча на основе глубокого обучения. Применение алгоритмов глубокого обучения в формировании луча и их производительность имеют потенциал для более высокой точности и адаптивности, однако эти техники требуют высокой вычислительной мощности и больших объемов данных. Сложность процессов обучения и оптимизации также привлекает внимание. Необходимо разрабатывать новые алгоритмы, повышающие вычислительную эффективность, и исследовать техники, ускоряющие процесс обучения и повышающие точность моделей.

Радарные и космические системы

Кубсат широко используется для различных научных и коммерческих целей из-за своей низкой стоимости и модульной конструкции. Ku-диапазон является идеальным для таких проектов, поскольку обеспечивает высокие скорости передачи данных и эффективность связи, что делает его подходящим для приложений дистанционного зондирования,

телеметрии и передачи данных. Исследование [13] подчеркивает критическую важность Ku-диапазона в проектах кубсат и выявляет его потенциал для будущих применений. Особенно микроэлектронные антенны, благодаря своей легкости и низкой стоимости, обеспечивают высокий коэффициент усиления и направленность в Ku-диапазоне. Эти антенны, спроектированные в компактной конструкции для кубсат, могут выполнять функции высокоточного слежения и управления. Однако адаптация этих антенн, оптимизированных для малых спутников, для больших спутников может оказаться сложной задачей, и для увеличения мощности сигнала и дальности действия может потребоваться дополнительное энергоснабжение. Модульная конструкция антенной системы может упростить адаптацию к различным типам спутников, а для повышения точности слежения могут быть интегрированы усовершенствованные алгоритмы обработки сигналов.

Исследование [14] представляет поляриметрический анализ моностатических и бистатических радарных наблюдений в Ku-диапазоне (12 – 18 ГГц). В моностатическом радаре передатчик и приемник находятся в одной точке, а в бистатическом – в разных. Это исследование рассматривает, как радарные наблюдения используются для понимания динамики и изменений в областях накопления ледников. Бистатический радар обладает способностью более детально обнаруживать структуры поверхности, а сезонные наблюдения позволяют эффективно оценивать сезонные изменения. Результаты исследования показывают, что поляриметрические радарные технологии могут анализировать структурные характеристики ледников, предоставляя детализированные данные для лучшего понимания их динамики. Однако сложность радарных систем и трудности анализа данных, а также окружающие условия в ледниковых регионах могут повлиять на эффективность работы радара. Для повышения точности и чувствительности радарных систем необходима разработка новых технологий и алгоритмов, а также проведение исследований на тему радарных сенсоров, которые лучше учитывают окружающие условия. Радарные технологии являются важным инструментом для анализа физических свойств морского льда и снежного покрова, и распределение снега играет важную роль в интерпретации этих данных.

Исследование [15] показывает, как Ka- и Ku-диапазонные радары измеряют влияние изменений в снежном покрове на радарные сигнатуры, и подчеркивает важность этой информации для мониторинга морского льда и исследований изменения

климата. Было обнаружено, что тонкий снежный покров увеличивает отражение радарного сигнала, а толстый – приводит к его потере. Ku-диапазонные радары лучше различают характеристики снега, в то время как Ka-диапазон более эффективен на больших территориях. Исследование показывает, что понимание влияния ветрового распределения снега на радарные сигнатуры может повысить точность мониторинга морского льда и предоставить информацию о воздействии экологических изменений на радарные сигнатуры. Однако влияние снежных ветров на радарные сигналы может быть сложным, а процессы сбора и анализа данных – затруднительными. Разработка новых алгоритмов и сенсоров, повышающих точность радарных систем для снега и льда, а также проведение исследований на тему радарных технологий, лучше моделирующих окружающие условия, могут помочь преодолеть эти трудности.

Низкошумящие и многофункциональные микросхемы

Малошумящий усилитель (МШУ) обычно изготавливаются с использованием технологий GaAs и псевдоморфных высокоэлектронных подвижных транзисторов (PHEMT). Эти усилители обеспечивают высокий коэффициент усиления и низкий уровень шума в диапазоне частот 12 – 18 ГГц, что позволяет передавать сигнал высокого качества. Низкий уровень шума повышает качество сигнала и обеспечивает более четкую связь. Однако разработка и производство МШУ может быть сложным процессом, а стоимость высокопроизводительных усилителей часто бывает высокой. В статье [16] представлен общий обзор МШУ, используемых в Ku-диапазоне для спутниковых приложений. Использование новых материалов и производственных технологий может повысить эффективность усилителей и улучшить характеристики шума за счет разработки инновационных решений.

В статье [17] представлены многофункциональные передающие и приемные системы, разработанные для Ku-диапазона. Конструкция этих систем выполнена с использованием технологии псевдоморфных высокоэлектронных подвижных транзисторов (PHEMT) на основе GaAs с топологией 0,25 мкм. Технология GaAs обеспечивает высокую производительность и низкие потери. Многофункциональный чипсет передатчика и приемника обеспечивает высокий коэффициент усиления и низкий уровень шума, а фазовращатели и аттенюаторы работают с высокой точностью. Однако микросхемы на основе GaAs могут быть дорогими, а мно-

гофункциональные конструкции – сложными. В этой работе предпочтение отдано более эффективным и дешевым версиям технологии GaAs, а также могут быть использованы инновационные подходы, снижающие сложность проектирования микросхем.

Многофункциональные антенны

Исследование [18] представляет компактную антенну с ультраширокополосными характеристиками, оптимизированную для небольших спутниковых систем в Ku-диапазоне (12 – 18 ГГц), обеспечивающую высокие скорости передачи данных и широкую полосу пропускания. Эта антенна разработана для передовых беспроводных коммуникационных приложений. Антенна обладает высоким коэффициентом усиления, широкой полосой пропускания и эффективной направленностью, что делает ее идеальным решением для продвинутых беспроводных систем связи. Однако работа в широкой полосе может усложнить конструкцию и повысить вероятность помех. Кроме того, оптимизация в широкой полосе может оказаться сложной задачей. В этом случае требуется дальнейшее уменьшение размеров антенны, использование инноваций в области материаловедения и инженерии для оптимизации сверхширокополосных антенн. Также известным техническим решением [19] является использование двух отдельных антенных решеток для приема и передачи. В этой работе антенна была рассмотрена для обеспечения высокоскоростных каналов связи на ходу, может использоваться на всех типах транспортных средств, таких как автомобили, железные дороги, морские и речные суда, самолеты, специальное оборудование.

Исследование [20] тщательно рассматривает конструкцию и характеристики кругополяризованной многочастотной антенны кубсат, работающей в диапазонах S, C, X, Ku, K и Ka. Проект ориентирован на удовлетворение потребности в легких, компактных и высокоэффективных антеннах для различных приложений, таких как космическая телеметрия и безопасность дальности, и подчеркивает многочастотные возможности этой антенны с широкой полосой пропускания. Дизайн был разработан с использованием фазированной решетки для обеспечения высокой точности направленности в Ka- и Ku-диапазонах. Результаты симуляций и тестов показали, что антенна демонстрирует высокий коэффициент усиления в диапазонах S, C, X, Ku, K и Ka, а круговая поляризация эффективна в радарных и телекоммуникационных системах. Фазированная решетка улучшает направленные

возможности антенны, позволяя эффективно работать в различных частотных диапазонах. Однако проектирование и производство фазированных антенных решеток может быть сложным и дорогостоящим. Электронные компоненты, необходимые для поддержки двух разных диапазонов, могут увеличить вес антенны.

Исследование [21] рассматривает фазированную антенную решетку, разработанную для космической телеметрии и проектов безопасности дальности, работающую в Ku- и Ka-диапазонах. Эта антенна разработана с использованием микроэлектронных элементов для обеспечения высоких скоростей передачи данных и гибкой связи. Антенна обладает как горизонтальной, так и вертикальной поляризацией, а также высоким коэффициентом усиления (12 дБн в Ku-диапазоне, 15 дБн в Ka-диапазоне) и низкими потерями на отражение. Эти характеристики позволяют антенне снижать потери данных и обеспечивать надежную связь в космических системах. Дизайн антенны основан на кругополяризованной частотно-избирательной поверхности, которая может выборочно пропускать или отражать сигналы на определенных частотах.

Также представляет интерес дизайн частотно-избирательной поверхности с круговой поляризацией, работающей в Ku- и Ka-диапазонах с высокой эффективностью. Эта конструкция выборочно пропускает или отражает сигналы на определенных частотах, а круговая поляризация снижает потери сигнала независимо от направления и повышает эффективность связи. Благодаря использованию различных геометрических форм и материалов с низкими потерями удалось достичь высокой эффективности (90%) и низких потерь на отражение. Частотно-избирательная поверхность обеспечивает высокую производительность на определенных частотах, блокируя нежелательные сигналы, а круговая поляризация может улучшить качество сигнала. Однако проектирование и оптимизация частотно-избирательных поверхностей могут быть сложными, и такие поверхности обычно крупные и тяжелые. Использование компактных и легких материалов может улучшить дизайн, делая поверхности меньшими и эффективными, а также расширить область применения за счет улучшения динамических частотно-избирательных характеристик.

В настоящее время имеется значительное число работ по антенным решеткам спутниковой связи с двойной линейной поляризацией, работающих в диапазонах Ku/K. Двойная линейная поляризация повышает качество сигнала и эффективность связи, а широкая полоса частот удовлетворяет различные потребности в связи. Полученные резуль-

таты показывают, что антенны демонстрируют эффективные характеристики с высоким коэффициентом усиления и низкими потерями на отражение. Однако проектирование антенных решеток может быть сложным и дорогостоящим, а для оптимизации производительности может потребоваться тонкая настройка конструкции. Использование более легких и компактных материалов может повысить производительность и портативность антенны, а также могут быть применены инновационные методы проектирования, оптимизирующие двойную поляризацию и широкополосную производительность.

Заключение

Таким образом, предоставлен всесторонний обзор современных разработок антенных технологий для спутниковых систем связи и телевидения в Ku-диапазоне. Рассматриваемые работы включают в себя создание легких и компактных конструкций, адаптивных антенных технологий, а также интеграцию искусственного интеллекта в процессы оптимизации. Эти инновационные решения значительно повышают эффективность антенных систем, обеспечивая связь на более широком диапазоне частот и с более высокими скоростями передачи данных. Особенно важным является применение алгоритмов оптимизации, поддерживаемых искусственным интеллектом, которые позволяют антеннам отслеживать свою производительность в режиме реального времени и адаптироваться к динамичным условиям. В процессе модернизации необходимо сосредоточиться на уменьшении веса и размеров антенн, использовании передовых материалов и улучшении адаптивных рабочих характеристик. Ключевую роль в повышении производительности фазированных антенных решеток и многолучевых конструкций играют усовершенствованные технологии управления, обработки сигналов и интеграция с искусственным интеллектом. Применение новых материалов не только улучшает эффективность антенн, но и снижает затраты на их производство. Эти достижения расширяют возможности применения антенн в спутниковой связи и других беспроводных коммуникациях. Кроме того, инновации в технологиях производства и оптимизация, основанная на интеграции приемников с нейронными сетями, могут значительно улучшить производительность антенн в Ku-диапазоне. Решения на основе глубокого обучения и интернета вещей повышают производительность антенн, позволяя антеннам быстро реагировать на изменяющиеся условия окружающей среды и обеспечивать более надежные результаты в спутниковой

связи. В заключение, модернизация антенных технологий в Ку-диапазоне возможна благодаря усилению как физических характеристик, так и программного обеспечения и инфраструктуры безопасности. Такой целостный подход сыграет важную роль в повышении надежности и производительности спутниковых систем связи в Ку-диапазоне и внесет вклад в создание более устойчивой и высокопроизводительной коммуникационной инфраструктуры в будущем.

Литература

1. Васильев, О. В. Антенные решетки систем спутникового телевидения (обзор) / О. В. Васильев, Е. В. Овчинникова, Фам Ван Винь [и др.] // Антенны. – 2016. – Москва : Радиотехника. – № 4 (224). – С. 22–33.
2. Фам Ван Винь. Двухдиапазонная антенна системы спутникового телевидения : специальность 05.12.07 «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Фам Ван Винь ; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»]. – Москва, 2018. – 114 с.
3. Huang, J. A Low Profile, Ultra-Lightweight, High Efficient Circularly-Polarized Antenna Array for Ku-band Satellite Applications / J. Huang, W. Lin, F. Qiu [et al.]. – DOI : 10.1109/ACCESS.2017.2750318 // IEEE Access. – 2017. – Vol. 5. – P. 18356–18365.
4. Chou, H. T. Design of two-arm spiral antennas for dual-CP multibeam applications at Ku-band / H. T. Chou, P. H. Hsueh, L. R. Kuo [et al.]. – DOI : 10.1109/APS.2012.6349093 // Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. – 2012. – P. 1–2.
5. Klatser, P. An ultra flat phased array Ku-band antenna with integrated receivers in SiGe BiCMOS / P. Klatser, Van Der Vossen, M. Voshaar [et al.]. – DOI : 10.1017/S1759078715000999 // International Journal of Microwave and Wireless Technologies ; Cambridge University Press and the European Microwave Association. – 2015. – P. 379–389.
6. Abedrabbha, S. Subarray Optimization for Compactness Improvement of a 3D Printed Adaptive Phased Array Antenna Operating in Ku-band / Sarra Abedrabbha, Rozenn Allanic, Cedric Quendo [et al.]. – DOI : 10.23919/EuMC.2019.8910905 // Proceedings of the 49th European Microwave Conference. – Paris, 2019. – P. 1012–1015.
7. Microstrip Antenna Array Design for Unmanned Aerial Vehicles Detection Radar / P. Ruiz, Xavier Begaud, F. Magne [et al.]. – DOI : 10.7716/aem.v12i3.2066 // Advanced Electromagnetics. – 2023. – Vol. 12. – No. 3. – P. 1–9.
8. Al Kassir, Haya A Review of the State of the Art and Future Challenges of Deep Learning-Based Beamforming / Haya Al Kassir, Zaharias D. Zaharis, Pavlos I. Lazaridis [et al.]. – DOI : 10.1109/ACCESS.2022.3195299 // IEEE Access. – USA : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. – № 10. – P. 80869–80882.
9. Kumar, A. K. Optimization of Antenna Parameters Using Neural Network Technique for Ku-band Applications / A. K. Kumar, M. Kirti, S. Pani [et al.]. – DOI : 10.1109/SPIN48934.2020.9070929 // 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN). – Noida : Amity University, 2020. – P. 706–709.
10. Ramesh, B. Machine learning and I_oT based MIMO-UWB Antenna Integrated with Ku-Band for Seamless Wireless Communication / B. Ramesh, R. Lakshminarayanan, P. Padmavathy [et al.] // Journal of Electrical Systems. – France : Engineering and Scientific Research Groups (ESR Groups), 2024. – Vol. 20-2s. – P. 795–801.
11. Kourdi, Z. Ku-band tracking, command and ranging antenna design for small satel-lites communications applications / Z. Kourdi, M. A. Rabah, A. A. Kanoun [et al.]. – DOI : 10.1007/s42401-023-00261-2 // Aerospace Systems ; Shanghai Jiao Tong University. – 2024. – Vol. 7. – P. 271–277.
12. Stefko, M. Polarimetric Analysis of Biseasonal Monostatic and Bistatic Radar Observations of a Glacier Accumulation Zone at Ku-Band / M. Stefko, P. Bernhard, O. Frey [et al.]. – DOI : 10.1109/JSTARS.2024.3374051 // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2024. – Vol. 17. – P. 9706–9727.
13. Nandan, V. Wind redistribution of snow impacts the Ka and Ku-band radar signatures of Arctic sea ice / V. Nandan, R. Willatt, R. Mallett [et al.]. – DOI : 10.5194/tc-17-2211-2023 // The Cryosphere. – 2023. – Vol. 17 (6). – P. 2211–2229.
14. Chen, Z. Design of Ku-band Low Noise Amplifier for Satellite Communication Applications / Z. Chen, M. Huang, Z. Huang [et al.]. – DOI : 10.1109/ICICM54364.2021.9660315 // 2021 6th International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM) (Nanjing, China). – IEEE, 2021. – P. 342–346.
15. Lee, H. A Ku-Band GaAs Multifunction Transmitter and Receiver Chip-set / H. Lee, Y. Kim, I. Lee [et al.]. – DOI : 10.3390/electronics9081327 // Electronics. – 2020. – Vol. 9 (8). – P. 1327.
16. Compact MIMO UWB antenna integration with Ku-band for advanced wireless communication applications / V. N. Koteswara, N. Radha, P. Sunitha [et al.]. – DOI : 10.1016/j.heliyon.2024.e27393 // Heliyon. – 2024. – Vol. 10 (12). – Iss. 5.
17. Бобков, В. Антенные системы SOTM (Satcom-On-The-Move) ООО «Технологии Радиосвязи» / Н. Званцгов, В. Бобков // Специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание – 2019». Приложение к журналу «Технологии и средства связи». – 2019. – С. 42–44.
18. Whiteman, D. E. Ku- and Ka-band Phased Array Antenna for the Space-Based Telemetry and Range Safety Project / D. E. Whiteman, L. M. Valencia, R. B. Birr // Biotechnology, nanotechnology, molecular biology, self assembly, genetic engineering. NASA. – 2005. – URL : <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20050215644/downloads/20050215644.pdf>.
19. Orr, R. Circular Polarization Frequency Selective Surface Operating in Ku- and Ka-band / R. Orr, G. Goussetis, V. Fusco [et al.]. – DOI : 10.1109/EuCAP.2014.6902189 // The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014) (The Hague, Netherlands). – IEEE, 2014. – P. 1969–1971.
20. Trinh-Van, S. A Four-Port Dual-Band Dual-Polarized Antenna for Ku-band Satellite Communications / S. Trinh-

- Van, W. Y. Yang, H. W. Cho [et al.]. – DOI : 10.3390/app14072730 // Applied Sciences. – 2024. – 14 (7). – P. 2730.
21. A Ku/K-band dual linearly polarized Reflectarray for earth exploration satellite services / V. SathyaNayanan, P. Agumbe, G. N. Alsath Mohammed [et al.]. – DOI : 10.1080/00207217.2024.2302338 // International Journal of Electronics. – 2024. – P. 153–166.

Поступила в редакцию 09.10.2024

Елена Викторовна Овчинникова, доктор технических наук, доцент, т. +7 (915) 323-40-36, e-mail: oea8888@gmail.com.

Мутаххар Куран, аспирантка, т. +7 (915) 131-39-55, e-mail: mutaharakuran@hotmail.com.

Алексей Юрьевич Ганицев, кандидат технических наук, доцент, т. +7 (910) 019-11-18, e-mail: ganitsev.mai.k406@bk.ru.

(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»).

COMBINED KU-BAND ANTENNAS FOR SATELLITE COMMUNICATION AND TELEVISION SYSTEMS

E. V. Ovchinnikova, M. Kuran, A. Yu. Ganitsev

Ku-band antennas are important technologies developed to enhance the efficiency of satellite communication and television systems. These antennas provide wide bandwidth and high data transmission speeds, making them an ideal solution for satellite communication and television broadcasting. In Ku-band satellite communication systems, two sub-bands are used: 10,70 – 12,75 GHz for reception and 13,25 – 14,80 GHz for transmission. Channel separation is achieved through polarization. In the future, the modernization of Ku-band antenna systems will be required to expand their functionality, increase data transmission speeds, and enhance energy potential. Additionally, innovative solutions such as thin-film technology to improve the performance of low-profile Ku-band antennas and multi-beam technologies capable of serving multiple users simultaneously are being explored. AI-supported adaptive antenna systems improve communication performance through directed beamforming and interference management. This article examines the structure of Ku-band antenna arrays, their manufacturing technologies, and modeling based on operational conditions. The advantages and disadvantages of satellite television antennas and the future development paths of these systems are also discussed.

Keywords: satellite communications and television antenna arrays, dual-band antennas, antennas with controlled polarization, low-profile antennas, broadband and range antennas, adaptive antenna arrays.

References

- Vasilyev, O. V. Antenna arrays of satellite television systems (review) / O. V. Vasilyev, E. V. Ovchinnikova, Pham Van Vinh [et al.] // Antennas. – 2016. – Moscow : Radiotekhnika. – No. 4 (224). – P. 22–33.
- Pham, Van Vinh. Dual-band antenna of satellite television system: Thesis for a Candidate Degree in Technical Sciences: 05.12.07 / Pham Van Vinh; [Place of Thesis defence: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Moscow Aviation Institute (National Research University)»], 2018. – 114 p.
- Huang, J. A Low Profile, Ultra-Lightweight, High Efficient Circularly-Polarized Antenna Array for Ku-band Satellite Applications / J. Huang, W. Lin, F. Qiu [et al.] // in IEEE Access. – 2017. – Vol. 5. – P. 18356–18365. – DOI : 10.1109/ACCESS.2017.2750318.
- Chou, H. T. Design of two-arm spiral antennas for dual-CP multi-beam applications at Ku-band / H. T. Chou, P. H. Hsueh, L. R. Kuo [et al.] // Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. – Chicago. – 2012. – P. 1–2. – DOI : 10.1109/APS.2012.6349093.
- Klatser, P. An ultra-flat phased array Ku-band antenna with integrated receivers in SiGe BiCMOS / P. Klatser, Van Der Vossen, M. Voshaar [et al.] // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. – Cambridge University Press and the European Microwave Association, 2015. – P. 379–389. – DOI : 10.1017/S1759078715000999.
- Abedrabbba, S. Subarray Optimization for Compactness Improvement of a 3D Printed Adaptive Phased Array Antenna Operating in Ku-band / Sarra Abedrabbba, Rozenn Allanic, Cedric Quendo [et al.] // Proceedings of the 49th European Microwave Conference. – Paris, 2019. – P. 1012–1015. – DOI : 10.23919/EuMC.2019.8910905.
- Ruiz, P. & Begaud, Xavier & Magne, F. & Leder, E. & Khy, A. Microstrip Antenna Array Design for Unmanned Aerial Vehicles Detection Radar // Advanced Electromagnetics. – 2023. – Vol. 12. – No. 3. – P. 1–9.
- Al Kassir, Haya A Review of the State of the Art and Future Challenges of Deep Learning-Based Beamforming / Haya Al Kassir, Zaharias D. Zaharis, Pavlos I. Lazaridis [et al.]. – DOI : 10.1109/ACCESS.2022.3195299 // IEEE Access. – USA : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. – № 10. – P. 80869–80882.
- Kumar, A. K. Optimization of Antenna Parameters Using Neural Network Technique for Ku-band Applications / A. K. Kumar, M. Kirti, S. Pani [et al.] // 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN). – Noida : Amity University, 2020. – P. 706–709. – DOI: 10.1109/SPIN48934.2020.9070929.
- Ramesh, B. Machine learning and IoT based MIMO-UWB Antenna Integrated with Ku-Band for Seamless Wireless Communication / B. Ramesh, R. Lakshminarayanan, P. Padmavathy [et al.] // Journal of Electrical Systems. – France : Engineering and Scientific Research Groups (ESR Groups), 2024. – Vol. 20-2s. – P. 795–801.

11. Kourdi, Z. Ku-band tracking, command and ranging antenna design for small satel-lites communications applications / Z. Kourdi, M. A. Rabah, A. A. Kanoun [et al.]. – DOI : 10.1007/s42401-023-00261-2 // Aerospace Systems ; Shanghai Jiao Tong University. – 2024. – Vol. 7. – P. 271–277.
12. Stefko, M. Polarimetric Analysis of Biseasonal Mono-static and Bistatic Radar Observations of a Glacier Accumulation Zone at Ku-Band / M. Stefko, P. Bernhard, O. Frey [et al.]. – DOI : 10.1109/JSTARS.2024.3374051 // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2024. – Vol. 17. – P. 9706–9727.
13. Nandan, V. Wind redistribution of snow impacts the Ka- and Ku-band radar signatures of Arctic sea ice / V. Nandan, R. Willatt, R. Mallett [et al.]. – DOI : 10.5194/tc-17-2211-2023// The Cryosphere. – 2023. – Vol. 17 (6). – P. 2211–2229.
14. Chen, Z. Design of Ku-band Low Noise Amplifier for Satellite Communication Applications / Z. Chen, M. Huang, Z. Huang [et al.]. – DOI : 10.1109/ICICM54364.2021.9660315 // 2021 6th International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM) (Nanjing, China). – IEEE, 2021. – P. 342–346.
15. Lee, H. A Ku-band GaAs Multifunction Transmitter and Receiver Chip-set / H. Lee, Y. Kim, I. Lee [et al.]. – DOI : 10.3390/electronics9081327 // Electronics. – 2020. – Vol. 9 (8) : 1327.
16. Compact MIMO UWB antenna integration with Ku-band for advanced wireless communication applications / V. N. Koteswara, N. Radha, P. Sunitha [et al.]. – DOI : 10.1016/j.heliyon.2024.e27393 // Heliyon. – 2024. – Vol. 10 (12). – Iss. 5.
17. Bobkov V. The SOTM (Satcom-On-The-Move) antenna systems manufactured by RadioComm Technologies Ltd / N. Zvantsugov, V. Bobkov // Special issue ‘Communication and Broadcasting 2019’. Supplement to the magazine «Communication Technologies & Equipment», 2019. – P. 42–44.
18. Whiteman, D. E. Ku- and Ka-band Phased Array Antenna for the Space-Based Telemetry and Range Safety Project / D. E. Whiteman, L. M. Valencia, R. B. Birr // Bio-technology, nanotechnology, molecular biology, self assembly, genetic engineering. NASA. – 2005. – URL : <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20050215644/downloads/20050215644.pdf>.
19. Orr, R. Circular Polarization Frequency Selective Surface Operating in Ku and Ka-band / R. Orr, G. Goussetis, V. Fusco [et al.]. – DOI : 10.1109/EuCAP.2014.6902189 // The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014) (The Hague, Netherlands). – IEEE, 2014. – P. 1969–1971.
20. Trinh-Van, S. A Four-Port Dual-Band Dual-Polarized Antenna for Ku-band Satellite Communications / S. Trinh-Van, W. Y. Yang, H. W. Cho [et al.]. – DOI : 10.3390/app14072730 // Applied Sciences. – 2024. – 14 (7). – P. 2730.
21. A Ku/K band dual linearly polarized Reflectarray for earth exploration satellite services / V. SathyaNarayanan, P. Agumbe, G. N. Alsath Mohammed [et al.]. – DOI : 10.1080/00207217.2024.2302338 // International Journal of Electronics. – 2024. – P. 153–166.

*Elena Viktorovna Ovchinnikova, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
t. +7 (915) 323-40-36, e-mail: oea8888@gmail.com.*

Mutahar Kuran, Postgraduate student, t. +7(915) 131-39-55, e-mail: mutaharakuran@hotmail.com.

*Aleksei Yurievich Ganitsev, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor,
t. +7 (910) 019-11-18, e-mail: ganitsev.mai.k406@bk.ru.*

*(Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Moscow Aviation Institute (National Research University)»).*