

Миллиметровые волны в системах связи как перспектива развития и применения робототехнических средств и комплексов

В.Р. Скрынский

МИРЭА – Российский технологический университет
119454, Россия, г. Москва,
пр. Вернадского, 78

Аннотация – Обоснование. Системы связи миллиметрового диапазона становятся все более актуальными в условиях насыщения низкочастотного спектра и растущих требований к скорости передачи данных. Высокая степень поглощения радиоволн в атмосфере создает уникальные возможности для формирования помехозащищенных беспроводных локальных и персональных сетей. Эти факторы подчеркивают необходимость глубокого изучения особенностей и преимуществ применения миллиметрового диапазона в радиосвязи. **Цель.** Цель данного исследования заключается в анализе особенностей использования миллиметровых волн в различных типах радиосвязи, а также в оценке их преимуществ и недостатков для создания высокопроизводительных систем связи, включая робототехнические комплексы и сети 5G. **Методы.** В рамках исследования были использованы методы анализа и моделирования, направленные на изучение процессов затухания, рассеяния и искажения сигналов при распространении радиоволн в атмосфере. Также была проведена оценка адаптивной настройки частоты, позволяющей оптимизировать качество связи в зависимости от условий окружающей среды. Исследование охватывало различные типы радиосвязи, включая наземную, спутниковую и связь для летательных аппаратов. **Результаты.** Результаты исследования показали, что на больших высотах, где функционируют авиационные беспроводные локальные сети и рои беспилотных летательных аппаратов, атмосферное поглощение значительно уменьшается. Адаптивная настройка частоты продемонстрировала свою эффективность в обеспечении надежной связи в различных сценариях, что критически важно для поддержания качества передачи данных. Для создания высокопроизводительных сетей связи, включая робототехнические комплексы, необходимо применение монолитных интегральных схем, работающих в диапазоне 50–90 ГГц, с интегрированными антеннами на основе современных технологий. **Заключение.** Таким образом, миллиметровые волны представляют собой перспективное направление для развития беспроводных сетей, особенно в контексте новых коммерческих сетей 5G. Более высокие частоты миллиметрового диапазона обеспечивают улучшенные условия для сетевых соединений в промышленности и робототехнике, что открывает новые горизонты для применения современных технологий в области связи. Необходимость усложнения электроники на каждом сетевом узле подчеркивает важность дальнейших исследований в этой области для достижения высоких требований к отслеживанию и наведению направленных линий связи.

Ключевые слова – миллиметровый диапазон волн; диапазон 50–90 ГГц; робототехнические средства и комплексы; сверхвысокочастотный диапазон; системы связи; антенная решетка; радиосвязь; рой беспилотных летательных аппаратов; передача данных.

Введение

Системы связи миллиметрового диапазона привлекают внимание исследователей в вопросах беспроводной передачи данных в связи с насыщением низкочастотного спектра частот и постоянно растущей потребностью в более высокой скорости передачи данных. Высокая степень поглощения в атмосфере позволяет выстраивать на основе этого диапазона помехозащищенные беспроводные локальные и персональные сети.

Связь на частотах миллиметровых волн обеспечивает высокую пропускную способность, что позволяет достичь высокой скорости передачи данных, необходимой для промышленной отрасли и роевых комплексов. В частности, антенные решетки компенсируют более высокие потери связи на частотах миллиметровых волн из-за меньшей

эффективной апертуры одного антенного элемента по сравнению с размером антенного элемента на более низких частотах от 1 до 3 ГГц (например, частоты сотовых телефонов). Более узкая ширина луча от антенных решеток и доступное управление лучом обеспечивают меньшую вероятность перехвата, меньшую восприимчивость к помехам и большую устойчивость к глушению и взлому (за пределами ширины луча). В ряде работ [1; 2] сообщалось об экспериментах с использованием частотной области около 50 ГГц, где поглощение атмосферы достигает пика, обеспечивая резкое падение покрытия канала связи, что идеально подходит для закрытой работы сети. Настраивая рабочую частоту вокруг пиков поглощения, можно создать скрытую зону защищенной связи, которая может быть адаптивно изменена в соответствии

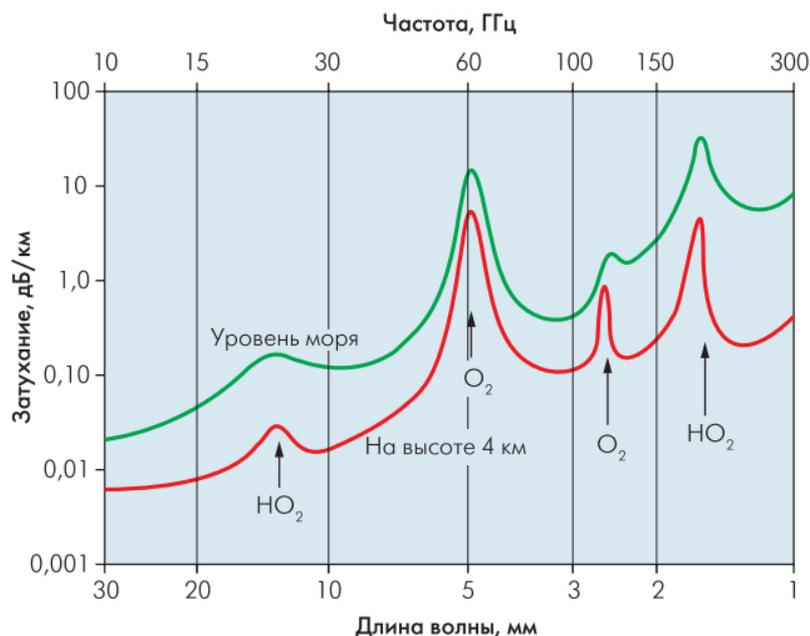


Рис. 1. Ослабление сигнала в воздухе за счет атмосферного кислорода и воды
 Fig. 1. Signal attenuation in air due to atmospheric oxygen and water

с изменениями конфигурации или погодных условий в реальном времени.

К числу неоспоримых преимуществ применения миллиметровых длин волн (ММВ) в системах связи следует отнести прежде всего такие факторы, как увеличение объема и скорости передачи информации, высокое усиление антенн при малой их апертуре и повышенную помехозащищенность канала связи [3].

1. Особенности использования ММВ в радиосвязи

Особенность использования ММВ для радиосвязи (наземной, спутниковой, а также для связи летательных аппаратов) состоит в том, что при их распространении радиоизлучение затухает в атмосферных газах и гидрометеорах [4]. При взаимодействии излучения со средой возникают процессы рассеяния, ослабления и деполяризации излучения, а также амплитудные и фазовые искажения сигналов. Ослабление радиоизлучения в атмосфере имеет общую тенденцию возрастать с ростом частоты и зависеть от погодных условий. (см. рис. 1)

В целом ММВ относятся к волнам с переменной дальностью действия из-за сравнительно большого молекулярного поглощения в парах воды и кислороде воздуха, а также из-за ослабления в различных гидрометеорах атмосферы.

Уменьшение принимаемой мощности при увеличении расстояния передачи может представ-

лять проблемы для безопасности сети: сигнал, достаточно сильный для обеспечения высокой скорости передачи данных, может быть обнаружен, заглушен и взломан. Чтобы уменьшить эту уязвимость, можно использовать частотные области с высоким поглощением в атмосфере. Диапазон 50–90 ГГц – типичное окно непрозрачности, является привлекательным для разработчиков телекоммуникационных систем во многом благодаря тому, что позволяет реализовывать закрытые сети, открывает возможность повторного использования частот, взаимного влияния приемопередающих устройств и т. п. [5]. Относительно крутая линия поглощения приводит к экспоненциальному увеличению потерь связи с увеличением расстояния и дает возможность настроить «зону безопасности» вокруг каналов сети с хорошей связью внутри зоны и практически не обнаруживаемой и бесперебойной связью в нескольких километрах за пределами поля.

На рис. 2 демонстрируется процесс регулировки потерь в радиочастотном канале путем изменения частоты передачи данных. Это делается с целью достижения разных размеров «Зоны безопасности» вокруг канала связи и адаптации к различным условиям окружающей среды.

«Зона безопасности» в данном контексте означает область вокруг радиочастотного канала, где сигнал связи остается надежным и не подвержен внешним воздействиям или уязвимостям, таким как вмешательство или прослушивание. Регули-

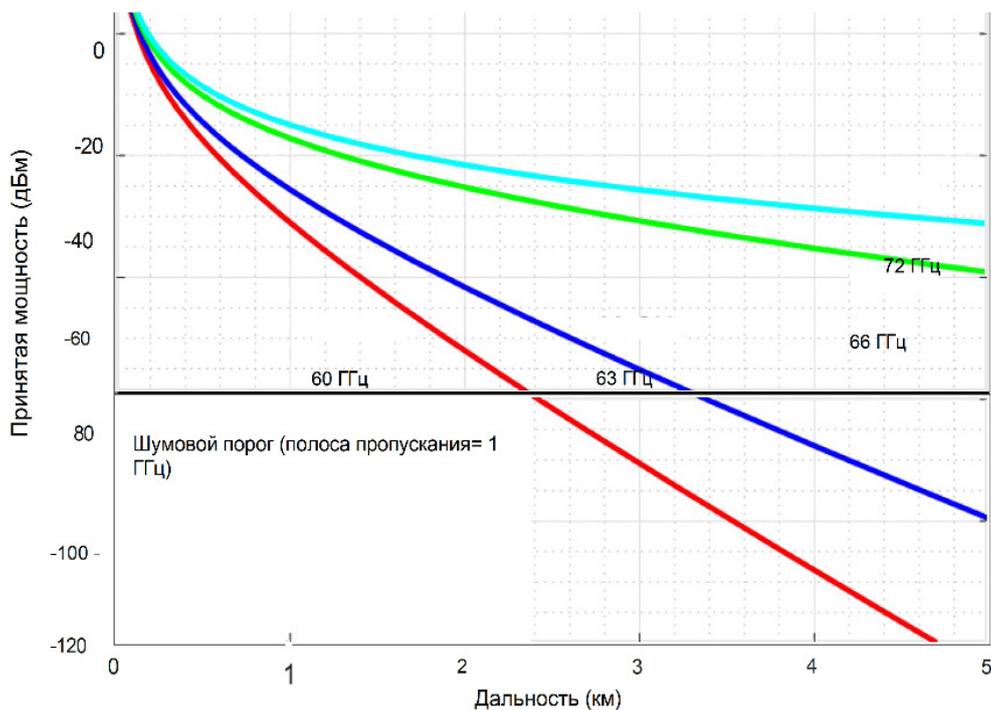


Рис. 2. Принятая мощность канала связи для 1 Вт
Fig. 2. Adopted power of the communication channel for 1 W



Рис. 3. Пример скоординированного роя БПЛА
Fig. 3. Example of a coordinated swarm of UAVs

ровка потерь в канале связи означает изменение мощности сигнала или других параметров передачи данных так, чтобы сделать эту зону безопасности более или менее обширной в зависимости от требований.

2. Преимущества и недостатки использования ММВ в радиосвязи

Для больших высот, на которых расположены авиационные беспроводные локальные сети или рой БПЛА (см. рис. 3), атмосферное поглощение уменьшается и становится гораздо более сложным, как показано на рис. 4.

Около частоты 60 ГГц при давлении на уровне моря множество линий поглощения кислорода сливаются, образуя одну широкую полосу поглощения, что в деталях показано на рис. 4. На этом же рисунке представлено затухание за счет кислорода в более высоких слоях атмосферы, где с увеличением высоты давление уменьшается и становятся различимы отдельные линии поглощения. Ряд дополнительных видов молекул (например, виды изотопов кислорода, колебательно возбужденные молекулы кислорода, озон, виды изотопов озона, колебательно возбужденные молекулы озона и прочие незначительные виды молекул) не учитываются при использовании метода прогнозирования путем суммирования спектральных линий. Эти дополнительные спектральные линии несущественны для обычной атмосферы, однако могут быть важны при сухой атмосфере. Существует компромисс между потерями (или мощностью сигнала) и использованием «зоны безопасности». При максимальной скрытности (на частоте 60 ГГц) потери составляют около 15 дБ/км. Это частично компенсируется преимуществом направленности в 20 дБ по сравнению с работой на частоте 6 ГГц при том же физическом размере апертуры. Для практической работы оператору потребуется возможность настраивать размер зоны безопасности (и, следовательно, потери связи) путем перестрой-

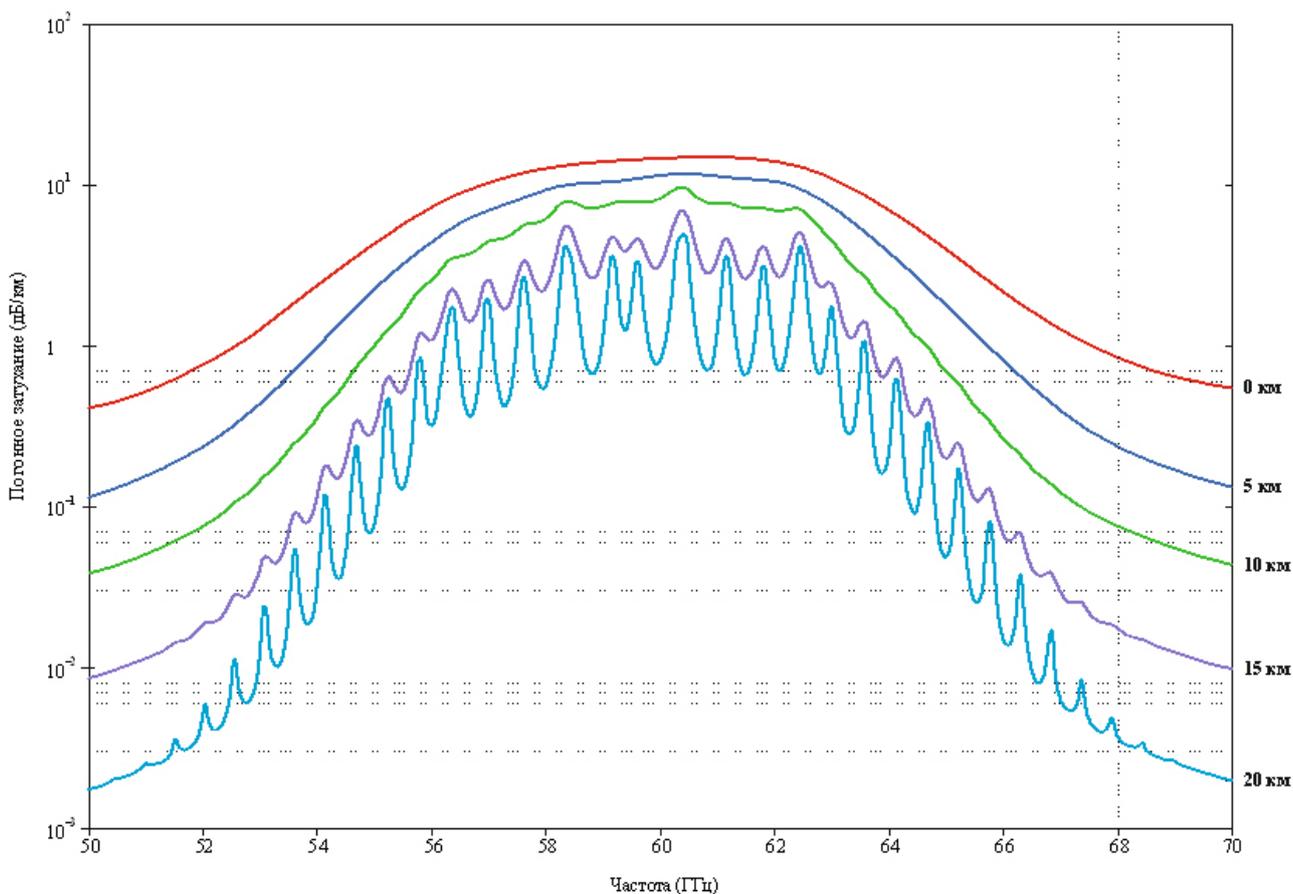


Рис. 4. Затухание в диапазоне 50–70 ГГц на указанных высотах, рассчитанное с шагом 50 МГц, включая центры линий поглощения (0, 5, 10, 15 и 20 км)
 Fig. 4. Attenuation in the range of 50–70 GHz at the indicated altitudes, calculated with a step of 50 MHz, including the centers of absorption lines (0, 5, 10, 15 and 20 km)

ки частоты, чтобы сбалансировать необходимую скрытность и потери мощности.

Адаптивная настройка частоты означает, что частота, на которой передается информация, может быть изменена в реальном времени, чтобы управлять качеством и безопасностью связи. Это позволяет подстраивать передачу данных под текущие условия окружающей среды, такие как расстояние между устройствами, погодные условия или наличие помех. Таким образом, адаптивная настройка частоты обеспечивает более эффективное использование радиочастотного канала и поддерживает надежную связь в разных сценариях.

Дождь влияет на покрытие сигнала связи. Например, потери рассеяния из-за сильного дождя (50 мм/час) составляют 1 дБ/км на 10 ГГц, 10 дБ/км на 30 ГГц и увеличиваются до 20 дБ/км на 90 ГГц, где они начинают выравниваться на более высоких частотах [6]. Таким образом, на расстоянии 5 км дополнительное затухание составляет всего 5 дБ на частоте 10 ГГц, но 100 дБ на частоте 90 ГГц. Потери в 5 дБ на частоте 10 ГГц можно легко ком-

пенсировать увеличением передаваемой мощности на 5 дБ или использованием большей физической апертуры антенны на одном конце линии связи. Однако неразумно ожидать, что мощность передачи на частоте 90 ГГц можно увеличить на 100 дБ для поддержания радиочастотной связи на расстоянии 5 км. С точки зрения проектирования системы это означает, что канал связи должен быть способен переключаться между несколькими диапазонами, а также иметь возможность адаптироваться в более узком спектре частот вокруг этих диапазонов.

Отношение мощности излучаемого сигнала к мощности принятого сигнала дает величину его ослабления в канале связи:

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{1}{G_t G_r} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2. \quad (1)$$

Тогда мощность принятого сигнала в свободном пространстве будет равна

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2, \quad (2)$$

где P_t – мощность передатчика; G_t и G_r – усиление передающей и приемной антенн; λ – длина волны излучения и R – расстояние между приемником и передатчиком. Соответственно, для длины волны 5 мм и дальности 100 м отношение P_r / P_t без учета усиления антенн составит примерно –108 дБ. При этом поглощение на атмосферном кислороде (примерно 1,5 дБ на 100 м) не окажет решающего влияния.

Таким образом, на относительно малых дистанциях в диапазоне 60 ГГц при прямой видимости основной фактор – естественное ослабление сигнала. Прежде всего из-за сильного ослабления, связанного с поглощением на атмосферном кислороде, устраняется проблема интерференции между различными источниками сигнала, принадлежащими разным сетям. Это позволяет автоматически решить проблему повторного использования частот – упрощается задача частотного распределения [7].

Одновременно достигаются такие показатели, как скрытность связи, целостность (стойкость к прицельным помехам) и стойкость к несанкционированному подключению (невозможность фальсифицировать мобильную станцию или точку доступа).

Для создания сетей связи, в которых может осуществляться использование робототехнических средств и комплексов, необходимо применять монолитные интегральные схемы (МИС), работающие в диапазоне 50–90 ГГц, с интегрированной антенной на основе GaAs- и GaN-технологий и КМОП-технологий. Такие технологии обеспечивают минимальные массогабаритные характеристики при максимальной мощности выходных усилителей мощностей (УМ) и генераторов, управляемых напряжением (ГУН) для гетеродинных радиоприемников.

Ширина доступной полосы и отсутствие интерференции между различными источниками сигнала в данном диапазоне делают его привлекательным для применения в высокоскоростной сверхширокополосной передаче данных, в системах межспутниковой и ближней связи. В миллиметровом диапазоне длина волны около 5 мм, и, соответственно, размеры излучателя становятся столь малыми, что целесообразно интегрировать его непосредственно на кристалл. Интеграция антенн на один кристалл с активными элементами позволяет обеспечить низкий уровень потерь между элементами системы, низкий уровень шумов и большую передаваемую мощность, снижает

производственные и материальные издержки по сравнению с реализацией в виде микросборки.

Один из примеров таких МИС выпускает компания Silicon Radar в разных вариантах исполнения: одноканальный радарный модуль TRX_060_011; двухканальный TR2_060_010 и многоканальный МИМО T4R4_060_029.

Микросхема TRX_060_011 выпускается в виде кристалла размером 1,42 × 0,72 мм. Она содержит ГУН на 30 ГГц; делитель частоты на 32; умножитель на 2, обеспечивающий перекрытие по частоте 58,31–63,91 ГГц; УМ; малошумный усилитель (МШУ); квадратурный смеситель; направленный ответвитель для развязки приемного и передающего каналов. Плата содержит чип, патч-антенны и разъем для подключения к основной плате.

Микросхема TR2_060_010 – это аналогичный радарный модуль, только с двумя каналами приема и отдельными антеннами. Он выпускается в виде кристалла размером 1,65 × 1,05 мм. Радарный модуль содержит ГУН на 30 ГГц; делитель частоты на 32; умножитель на 2, обеспечивающий перекрытие по частоте 58,31–63,91 ГГц; УМ; два МШУ; два квадратурных смесителя. Плата содержит чип, патч-антенны и разъем для подключения к основной плате.

Микросхема T4R4_060_029 производится в виде кристалла размером 2,26 × 2,49 мм. Она содержит ГУН на 20 ГГц; делитель частоты на 4; умножитель на 3, обеспечивающий перекрытие по частоте 55,5–64,6 ГГц; переключатель источника частоты для умножителя; четыре независимых передатчика и четыре приемника. Данную микросхему можно легко каскадировать, так как сигнал на умножитель может подаваться как с внутреннего ГУН, так и с внешнего входа. Выход гетеродина тоже имеется. Это особенно важно для построения многоканальной радарной системы с высоким разрешением по азимуту.

3. Перспективные направления использования ММВ

В настоящее время увеличение объема обрабатываемой информации в развитых странах пропорционально квадрату роста промышленного потенциала этих стран. Необходимость в передаче на большие расстояния постоянно возрастающих потоков информации способствует прогрессу в развитии систем спутниковой связи. В последние годы тенденция использования диапазона миллиметровых радиоволн приобрела, в отличие от

прошлых лет, устойчивый характер. Это объясняется не только успехами в разработке элементной базы (приемники, передатчики, антенны, волноводы), но и созданием технически совершенных устройств и систем.

Узкие диаграммы направленности антенн на ММВ способствуют повышению скрытности связи, а большой коэффициент усиления позволяет уменьшать мощность передатчика и улучшать массогабаритные характеристики аппаратуры спутника. Применение узконаправленных многолучевых бортовых антенн дает возможность осуществлять коммутацию линий спутниковой связи, а также увеличивает надежность связи при плохих погодных условиях за счет разнесенного приема.

Использование узконаправленных антенн в миллиметровом диапазоне длин волн (ММВ) способствует улучшению связи и оптимизации характеристик связанных устройств, таких как спутники и приемо-передающие аппараты. Антенны на ММВ способны передавать и принимать сигналы только в узком направлении. Это уменьшает вероятность, что сигнал будет случайно распространяться во всех направлениях, делает его более сложным для обнаружения сторонними наблюдателями и вмешательства в связь. Это способствует повышению скрытности связи. Они обладают высоким коэффициентом усиления, это означает, что они могут сфокусировать сигналы в узких лучах. Это позволяет уменьшить необходимую мощность передатчика, чтобы достичь желаемого качества связи. Более низкая мощность, в свою очередь, уменьшает потребление энергии и улучшает массогабаритные характеристики аппаратуры, так как не требуется крупных и мощных антенн. Использование узконаправленных антенн с разнесенным приемом позволяет более эффективно справляться с плохими погодными условиями. Если одно направление становится непригодным из-за атмосферных помех, другие направления могут продолжать обеспечивать связь, что повышает надежность связи в сложных климатических условиях [8].

Спутник *MILSTART* (США) – на борту искусственного спутника Земли (ИСЗ) предусмотрены использование шумоподобных сигналов и псевдослучайная перестройка частот в полосе 2 ГГц, а также коммутация сигналов. Межспутниковая связь в системе *MILSTART* осуществляется в диапазоне частот 60 ГГц, в котором большое затухание в центре линии поглощения кислорода делает практически невозможным создание активных

преднамеренных радиопомех с Земли для работы бортовой аппаратуры. Последний (шестой) спутник этой модели был запущен в 2003 г. с расчетным сроком службы 10 лет.

Advanced Extremely High Frequency (АЕНФ) – группировка спутников защищенной связи стала естественным продолжением спутников *MILSTART*. АЕНФ работают в частотном диапазоне ММВ, а именно в диапазоне частот свыше 44 ГГц. Этот диапазон частот ММВ обеспечивает высокую производительность и обеспечивает защищенную связь для военных и государственных организаций, предоставляя надежные каналы передачи данных и голосовой связи. АЕНФ-спутники разработаны для обеспечения высокой степени защиты и надежности военной связи в различных условиях и при угрозах электронной войны. Спутники АЕНФ используют большое количество узконаправленных лучей, направленных на Землю, для передачи сообщений пользователям и от них. Перекрестные связи между спутниками позволяют им передавать сообщения напрямую, а не через наземную станцию. Спутники предназначены для обеспечения помехоустойчивой связи с низкой вероятностью перехвата. Они включают в себя радиотехнологию со скачкообразной перестройкой частоты, а также антенны с фазированной решеткой, которые могут адаптировать свои диаграммы направленности для того, чтобы заблокировать потенциальные источники помех. Их развертывание началось в 2010 г. Полный охват всей земной поверхности состоялся в 2020 г. с выходом на геостационарную орбиту последнего (шестого) спутника со сроком службы 15 лет.

Постепенно на смену этой серии будут приходить спутники Evolved Strategic Satellite (ESS), представляющие собой созвездие из американских военных спутников связи, разрабатываемые для удовлетворения потребностей космических сил Соединенных Штатов. Они будут использоваться для ретрансляции защищенной связи с вооруженными силами США с целью удовлетворения как тактических, так и стратегических потребностей во время конфликта, включая ядерную войну. Первый прототип должен быть выведен на орбиту примерно в 2025 г. [9].

Другим перспективным направлением использования миллиметрового диапазона длин волн является применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в земледелии. Специфика российского рынка БПЛА заключается в преобладании производителей военных «дронов» и

практически полном отсутствии производителей потребительских и коммерческих «дронов». При этом преобладающая часть производителей военных БПЛА имеет в своем портфеле либо уже устаревшие технические модели, либо только современные опытные образцы, которые демонстрируются на выставках, но не поступают в массовое производство, и, несмотря на значительные бюджетные вливания со стороны государства, продукция российских компаний сейчас не выдерживает конкуренции с западными образцами. Использование БПЛА в сельском хозяйстве может совершить настоящий прорыв, значительно снизив производственные затраты. Использование беспилотных летающих аппаратов в производстве продукции растениеводства широко практикуется в США, Китае, Японии, Бразилии и многих европейских странах. Применение БПЛА в сельском хозяйстве имеет огромный потенциал, и с каждым годом интерес к их использованию растет. Применение беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве является инновацией для России, в первую очередь, при реализации задач точного земледелия. «Беспилотники» оснащаются разнообразными датчиками, в том числе мультиспектральными камерами, высокая четкость изображения которых позволяет точно определять проблемные участки поля; системами спутниковой навигации; малогабаритными бортовыми компьютерами; оборудованием для внесения химикатов и т. д. [10].

При внедрении современных методов работы в сельскохозяйственном секторе БПЛА должны будут собирать и передавать огромные массивы

данных для их обработки. Использование связи на частотах миллиметровых волн позволит собирать весь массив данных и передавать с высоким разрешением на большой скорости.

Заключение

До сих пор анализ был сосредоточен на возможностях распространения, предоставляемых более высокими частотами миллиметровых волн для архитектур беспроводной локальной сети. Для эффективного использования преимуществ миллиметровых волн электроника на каждом сетевом узле станет значительно сложнее, чтобы обеспечить требования к отслеживанию и наведению направленных линий связи и адаптивную настройку в линиях поглощения. Недавние и текущие разработки схем для ММВ были значительно активизированы требованием поддержки новых коммерческих сетей 5G. Эти разработки будут использованы для различных приложений.

Более высокие частоты ММВ обеспечивают значительно лучшие условия потери траектории для сетевых соединений в промышленности или робототехнических средств, где апертуры антенн ограничены фиксированной площадью, что позволяет использовать антенные решетки.

Область миллиметровых волн между 50 и 90 ГГц дает возможность адаптивно настраивать скрытность и уязвимость сети (или потенциал помех для соседних сетей), что также будет полезно для ряда других военных беспроводных приложений.

Эти соображения должны быть учтены при разработке концепции и проектировании новых военных сетей связи.

Список литературы

1. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г. Теоретические основы обработки сигналов в беспроводных системах связи. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2011. 368 с.
2. Жижин В. Будущее широкополосной радиосвязи: миллиметровый диапазон // Беспроводные технологии. 2017. № 1 (46). С. 51–55.
3. Перспективы использования и развития оборудования пакетной радиосвязи миллиметрового диапазона операторами связи / Д.С. Ключев [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2018. Т. 20, № 2. С. 58–67. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7037>
4. Маклашов В.А., Шашков Д.И., Пиганов М.Н. Разработка и исследование коммутатора входящих сигналов для приемопередающих устройств систем связи // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 23, № 1. С. 106–114. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.1.106-114>
5. Омелянчук Е.В., Тихомиров А.В., Кривошеев А.В. Особенности проектирования систем связи миллиметрового диапазона радиоволн // Инженерный вестник Дона. 2013. № 2 (25). С. 79.
6. Xing Y., Rappaport T.S. Propagation measurement system and approach at 140 GHz—moving to 6G and above 100 GHz // 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). 2018. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2018.8647921>
7. Rappaport T.S., Murdock J.N., Gutierrez F. State of the art in 60-GHz integrated circuits and systems for wireless communications // Proceedings of the IEEE. 2011. Vol. 99, no. 8. P. 1390–1436. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2143650>

8. Парфенов В.И., Ле В.Д. Анализ влияния окружающей среды на эффективность алгоритма обработки информации в беспроводных сенсорных сетях // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 23, № 2. С. 49–54. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.2.49-54>
9. Harvey J.F., Steer M.B., Rappaport T.S. Exploiting high millimeter wave bands for military communications, applications, and design // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 52350–52359. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2911675>
10. Гончаренко К.А. Применение беспилотных летательных аппаратов (дронов) в точном земледелии // Фермер. Поволжье. 2016. № 7 (49). С. 34–37.

Информация об авторе

Скрынский Владислав Романович, ведущий инженер инновационно-инжинирингового центра микросенсорики МИРЭА – Российского технологического университета, г. Москва, Россия.

Область научных интересов: распространение радиоволн, радиопередающие и радиоприемные устройства, радиотехнические системы зондирования, локации и навигации.

E-mail: skrynskiy@mirea.ru

SPIN-код (eLibrary): 4630-7130

Physics of Wave Processes and Radio Systems

2025, vol. 28, no. 2, pp. 78–86

DOI [10.18469/1810-3189.2025.28.2.78-86](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2025.28.2.78-86)

UDC 621.396

Original Research

Received 7 April 2025

Accepted 12 May 2025

Published 30 June 2025

Millimeter waves in communication systems as a prospect for the development and application of robotic means and complexes

Vladislav R. Skrynskiy

MIREA – Russian Technological University
78, Vernadsky Avenue,
Moscow, 119454, Russia

Abstract – Background. Millimeter-wave communication systems are becoming more and more relevant in conditions of saturation of the low-frequency spectrum and growing requirements for data transmission speed. The high degree of radio wave absorption in the atmosphere creates unique opportunities for the formation of interference-proof wireless local and personal networks. These factors emphasize the need for in-depth study of the features and advantages of millimeter-wave band application in radio communications. **Aim.** The purpose of this study is to analyze the peculiarities of using millimeter waves in different types of radio communications, as well as to evaluate their advantages and disadvantages for the creation of high-performance communication systems, including robotics and 5G networks. **Methods.** The research used analysis and modeling methods aimed at studying the processes of attenuation, scattering and distortion of signals when radio waves propagate in the atmosphere. Adaptive frequency tuning was also evaluated to optimize the quality of communication depending on environmental conditions. The study covered various types of radio communications, including terrestrial, satellite and aircraft communications. **Results.** The results of the study showed that atmospheric absorption is significantly reduced at high altitudes where aviation wireless LANs and drone swarms operate. Adaptive frequency tuning has been demonstrated to be effective in providing reliable communication in various scenarios, which is critical for maintaining data transmission quality. For high-performance communication networks, including robotic systems, monolithic integrated circuits operating in the 50–90 GHz range with integrated antennas based on state-of-the-art technologies are required. **Conclusion.** Thus, millimeter waves represent a promising direction for the development of wireless networks, especially in the context of new commercial 5G networks. Higher millimeter-wave frequencies provide improved conditions for network connectivity in industry and robotics, which opens new horizons for the application of modern communication technologies. The need to increase the complexity of the electronics at each network node emphasizes the importance of further research in this area to achieve the high tracking and pointing requirements of directional links.

Keywords – millimeter wave band; 50–90 GHz band; robotic vehicles and complexes; ultra-high frequency band; communication systems; antenna array; radio communication; drone swarm; data transmission.

✉ skrynskiy@mirea.ru (Vladislav R. Skrynskiy)

 © Vladislav R. Skrynskiy, 2025

References

1. V. T. Ermolaev and A. G. Flaksman, *Theoretical Foundations of Signal Processing in Wireless Communication Systems*. Nizhniy Novgorod: Nizhegorodskiy gosuniversitet, 2011. (In Russ.)
2. V. Zhizhin, “Future of broadband radio communications: Millimeter range,” *Besprovodnye tekhnologii*, no. 1 (46), pp. 51–55, 2017. (In Russ.)

3. D. S. Klyuev et al., "Perspectives of the use and development of the equipment of the millimeter radio communication equipment by communication operators," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 58–67, 2018, url: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7037>. (In Russ.)
4. V. A. Maklashov, D. I. Shashkov, and M. N. Piganov, "Development and research of incoming signal switch for transceiver communication systems," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 23, no. 1, pp. 106–114, 2020, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.1.106-114>. (In Russ.)
5. E. V. Omel'yanchuk, A. V. Tikhomirov, and A. V. Krivosheev, "Features of the design of the bonds of the millimeter range of radio waves," *Inzhenernyy vestnik Dona*, no. 2 (25), p. 79, 2013. (In Russ.)
6. Y. Xing and T. S. Rappaport, "Propagation measurement system and approach at 140 GHz—moving to 6G and above 100 GHz," *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–6, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2018.8647921>.
7. T. S. Rappaport, J. N. Murdock, and F. Gutierrez, "State of the art in 60-GHz integrated circuits and systems for wireless communications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 8, pp. 1390–1436, 2011, doi: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2143650>.
8. V. I. Parfenov and V. D. Le, "Analysis of the environment influence on the efficiency of the information processing algorithm in wireless sensor networks," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 49–54, 2020, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.2.49-54>. (In Russ.)
9. J. F. Harvey, M. B. Steer, and T. S. Rappaport, "Exploiting high millimeter wave bands for military communications, applications, and design," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 52350–52359, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2911675>.
10. K. A. Goncharenko, "The use of unmanned aerial vehicles (drones) in precise agriculture," *Fermer. Povolzh'e*, no. 7 (49), pp. 34–37, 2016. (In Russ.)

Information about the Author

Vladislav R. Skrynskiy, leading engineer of the Innovation and Engineering Center of Microsensorics, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia.

Research interests: radio wave propagation, radio transmitting and radio receiving devices, radio-technical systems of sensing, location and navigation.

E-mail: skrynskiy@mirea.ru

SPIN-code (eLibrary): 4630-7130