

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.8.9>

УДК: 677.532

ТЕКСТИЛЬНЫЕ АНТЕННЫ.

ЧАСТЬ 3. СОВРЕМЕННЫЕ РАЗРАБОТКИ ТЕКСТИЛЬНЫХ АНТЕНН

А.В. Вицукаев, И.А. Олехнович, А.Ю. Фролов

Научно-исследовательский институт приборостроения имени В.В. Тихомирова,
140180, Московская область, г. Жуковский, ул. Гагарина, д. 3)

Статья поступила в редакцию 30 апреля 2026 г.

Аннотация. Текстильные антенны – это особый класс антенн, которые частично или полностью изготовлены из текстильных материалов, в отличие от обычных антенн, которые состоят из жестких материалов. Основные преимущества: небольшой вес, относительно простая конструкция, возможность использования как отдельно, так и на любой поверхности, в том числе изогнутой и при движении объекта. Интеллектуальные текстильные системы представляют большой интерес для применения в различных сферах. В этой статье представлен обзор некоторых носимых текстильных антенн, работающих в разных частотных диапазонах от нижних диапазонов УВЧ до самого последнего миллиметрового диапазона волн 60 ГГц. Технология носимых на теле антенн развивается и совершенствуется: от простых прямоугольных патч-антенн до более сложных топологий с использованием новых материалов и перспективных технологических решений. Беспроводная связь, посредством текстильных антенн и носимых технологий, представляет собой популярную область исследований, которые могут быть сосредоточены на новых структурах и топологиях, обеспечивающих лучшую производительность и практическое применение.

Ключевые слова: текстильная антенна, носимая текстильная антенна, беспроводная коммуникация.

Автор для переписки: Олехнович Ирина Александровна,
olekhnovich.i@otd40.niip.ru

Введение

Это завершающая статья обзорного цикла о текстильных антеннах. Текстильные антенны – это особый класс антенн, которые частично или полностью изготовлены из текстильных материалов, в отличие от обычных антенн, которые состоят из жестких материалов. Текстиль, составляющий текстильную антенну, делится на электропроводящие ткани, называемые электротекстилем, и применяемые для излучающих и заземляющих частей и диэлектрические материалы для изолирующих частей антенны.

В этой части обзора описаны некоторые из самых последних разработок носимых текстильных антенн, представляющих современное состояние в этой области. Каждая из описанных антенн обладает характеристиками, которые обеспечивают решения для одного или нескольких неблагоприятных эффектов и проблем. Классификация антенн в соответствии с диапазоном частот, начиная от самого низкого диапазона ISM (868 МГц) до не так давно исследованного диапазона 60 ГГц [9].

1. Диапазоны UHF (УВЧ) для RFID (технология радиочастотной идентификации) (860-960 МГц)

Технология радиочастотной идентификации (RFID) направлена на однозначную идентификацию объекта, имеющего уникальный идентификационный код, выдаваемый устройством, известным как RFID-метка. RFID-метка состоит из небольшого радиочастотного транспондера, состоящего из интегральной схемы и антенны. Такое устройство, когда его «опрашивает» «считыватель», отвечает, передавая радиочастотный сигнал, содержащий информацию о его идентичности [1]. Согласно международной стандартизации, технология RFID использует диапазоны частот УВЧ.

Компания EPCglobal, ответственная за такую деятельность по стандартизации, установила некоторые стандарты в диапазоне частот UHF 860-960 МГц [19], в котором работают большинство разработанных RFID-меток и антенн. До сих пор RFID широко использовались в таких сферах, как отслеживание товаров, управление доступом и бесконтактная оплата. Совсем недавно представленные текстильные антенны постепенно привлекли внимание как интегрирующий компонент носимых меток RFID, что стало популярным объектом исследований для приложений по локализации и отслеживанию людей. С тех пор было предложено множество текстильных антенн, работающих в указанном диапазоне частот. Здесь описаны несколько из последних разработок в этой области.

В 2014 году Коски и др. [2] представили антенну-метку с частотой 866 МГц, использующую анизотропную вышитую текстильную структуру в качестве излучающей накладки. Характеристики антенны также сравниваются с эквивалентным прототипом, имеющим излучающую накладку из обычной медной ткани. Оценка диапазона считываемости проводилась для антенны, установленной на руке человека-испытуемого. Анализ показал, что носимая антенна RFID с вышитой накладкой демонстрирует сопоставимые потери связи и затенение по сравнению с эквивалентной версией с обычной медной накладкой, демонстрируя пригодность техники вышивки при производстве носимых антенн RFID.

Хирвонен и др. [3] предложили в 2013 году текстильную монополярную антенну, работающую в том же диапазоне частот 867 МГц для нательного применения. Экспериментально исследовались также характеристики связи на теле с точки зрения потерь на пути прохождения сигнала. Антенна представляет собой монополь толщиной 4 мм на заземляющей плоскости размером 50×50 мм, проводящие части которой изготовлены из посеребренного полиимида, демонстрирующего высокую гибкость и проводимость. Подложка представляет собой диэлектрик толщиной 4 мм с очень низкой диэлектрической проницаемостью. Антенна состоит из двух полигональных верхних пластин

с оптимизированной топологией, к которым подключен фидер. Трехмерная структура этой антенны получена путем изгибания электротекстиля над подложкой. Излучающий элемент 4-мм короткий, соединяющий верхнюю пластину с нижней заземляющей плоскостью. Также присутствует электронная плата, включающая беспроводную электронику и батареи, встроенные в подложку антенны. Антенна показывает довольно небольшие значения из-за малых размеров и низкой проводимости текстильного материала. Однако, измерения натальной связи между двумя прототипами антенн, надетыми на разные части тела, показали относительно высокие значения усиления канала на теле, в диапазоне от -47 до -56 дБ в безэховой среде и от -35 до -80 дБ в многолучевом сценарии. Таким образом, антенна представляет собой подходящее малогабаритное и надежное решение для беспроводной связи на теле.

Кроме того, недавно было проведено исследование по интеграции солнечных батарей с плоскими текстильными антеннами для диапазона UHF RFID. Деклерк и др. [4] представили новую носимую апертурно-связанную короткозамкнутую плоскую антенну с солнечными элементами, непосредственно интегрированными поверх излучающей пластины. Такое решение позволяет эффективно интегрировать два основных элемента в носимую текстильную систему, являющуюся носимой антенной с энергетической батареей, образуя компактную многослойную структуру. Предлагаемая антенна предназначена для работы в диапазоне частот УВЧ 902-928 МГц и имеет закорачивающую плоскость между излучающей пластиной и заземляющей плоскостью, что приводит к уменьшению размеров пластины, равных 62×80 мм по сравнению с обычными пластинами $\lambda/2$. Питание с апертурной связью, выбранное для повышения гибкости и надежности, реализовано с помощью микрополосковой линии на нижней стороне конструкции, соединенной с пластиной через H-образный слот в заземляющей плоскости. Подложки состоят из гибкой полиуретановой пены толщиной 11 мм для антенны и арамидного слоя толщиной 0,95 мм для линии питания. Два солнечных элемента a-Si:H установлены

непосредственно на пластине антенны. Их влияние на свойства излучения антенны незначительно, поскольку их толщина 0,2 мм намного меньше длины волны. Сигнал постоянного тока, полученный освещенным солнечным элементом, направляется по медному проводу, закорачивающая стенка служит обратным путем к задней стороне конструкции, где интегрирована соответствующая схема регулятора для обеспечения стабильного выходного напряжения. Характеристики антенны были экспериментально проверены при установке на реальном человеке, что привело к ширине полосы пропускания импеданса 64 МГц и максимальному усилению 1,6 dBi.

2. ISM-диапазоны 2,45 ГГц и 5,8 ГГц

Промышленные, научные и медицинские диапазоны являются зарезервированными частями радиоспектра, определенными ИТУ Регламентом радиосвязи [5], которые используются в беспроводных коммуникационных приложениях, ориентированных на тело человека и, в более общем плане, для других промышленных, медицинских и научных приложений. Большинство текстильных антенн, разработанных на сегодняшний день, предназначены для работы в некоторых из этих ISM-диапазонов, особенно в 2,45 ГГц (безусловно, наиболее популярном) для носимых антенн и диапазона 5,8 ГГц. Первый диапазон представляет собой хороший компромисс между размерами антенны (обратно пропорциональны частоте) и потерями на пути (увеличиваются с частотой), тогда как второй более удобен, когда требуются антенны меньших размеров.

Далее описаны некоторые примеры антенн в этих диапазонах.

3. Диапазон 2,45 ГГц

Хертлер и др [6] представили носимую патч-антенну для работы в диапазоне 2,4,-2,4835 ГГц, изготовленную из амортизирующей, огнестойкой пенопластовой подложки и подходящую для спасателей. Антенна использует простую топологию, состоящую из прямоугольного патча с усеченным углом

с коаксиальным питанием по диагонали патча (рис. 1), что позволяет возбуждать две ортогональные моды, которые дают почти круговую поляризацию. Проводящие части антенны состоят из коммерчески доступных электротекстильных материалов с очень высокой проводимостью, в частности «ShieldIt™» для излучающей части и «Flectron®» для заземляющей плоскости. Предлагаемая антенна была испытана в различных условиях эксплуатации. В частности, авторы показали, как с помощью измерений, так и моделирования, что близость человеческой руки, над которой была согнута антенна, влияет на ее работу, производя сдвиг резонансной частоты. Однако, благодаря относительно большой ширине полосы пропускания импеданса конструкции -10 дБ, антенна по-прежнему соответствует требованиям конструкции, даже когда она согнута вокруг человеческой руки.

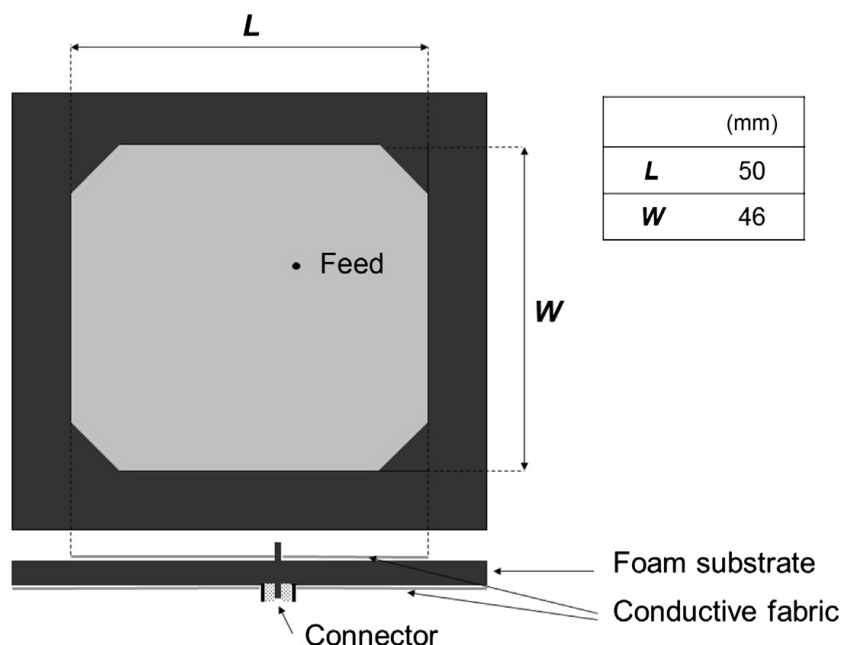


Рис. 1. Схема прямоугольной патч-антенны с усеченным углом.

В 2008 году, используя ту же защитную пену в качестве подложки, Валлоцци и др. [7] предложили патч-антенну 2,45 ГГц с двойной поляризацией, позволяющую реализовать поляризационное разнесение с помощью одной компактной носимой антенны. Антенна использует простую почти квадратную топологию с небольшой щелью в центре и с двумя коаксиальными разъемами, расположенными симметрично на двух диагоналях патча (рис. 2). Это позволяет

возбуждать две ортогональные, линейно-поляризованные волны, которые могут одновременно передавать/принимать две независимые радиоволны, для реализации поляризационного разделения.

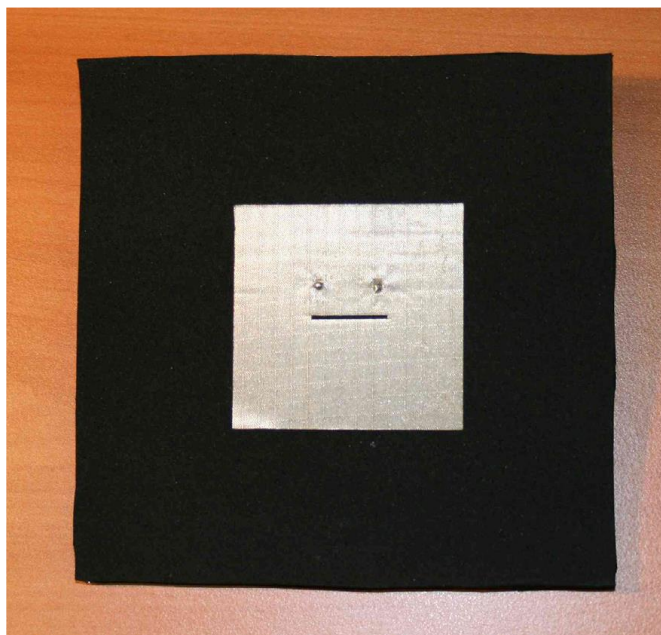


Рис. 2. Реализованный прототип двухполяризационной патч-антенны на вспененной подложке.

Антенна была сконструирована, оптимизирована и протестирована. Дополнительно измерения проводились в реальных условиях на теле человека для проверки устойчивости антенны к присутствию тела человека. В обоих случаях измеренные коэффициенты отражения соответствуют проектным требованиям ($|S_{11}| < -10$ dB; $|S_{22}| < -10$ dB), при этом резонансная частота претерпевает лишь очень небольшой сдвиг, если рассматривать ситуацию на теле. Измеренные диаграммы усиления также остаются почти неизменными, в случае на теле по отношению к ситуации в свободном пространстве, при этом максимальное значение составляет около 6 dBi в поперечном направлении, что более чем достаточно для установления надежной линии связи вне тела. Чтобы применить технологию разнесения вне тела, две такие антенны могут быть интегрированы в носимую текстильную систему, надеваемую спереди и сзади человека. [11]

Еще одна многообещающая технология Substrate Integrated Waveguide (SIW) изготовления жестких печатных плат была впервые применена Моро и др.

для разработки носимой текстильной антенны для работы в диапазоне ISM 2,45 ГГц [12]. Такой вид патч-антенны отвечает важным требованиям в области внетелесной связи, таким как подавление нежелательных поверхностных волн и высокий уровень экранирования от тела человека, даже при очень малой плоскости заземления, высокой направленности и стабильности работы.

Структура состоит из щелевой антенны с полостью на гибкой защитной пенопластовой подложке с электротекстилем (Flectron), металлизированным с обеих сторон. Верхний слой состоит из прямоугольного проводящего слоя с щелью в форме собачьей кости, представляющей излучающий элемент, в то время как на нижнем слое заземленный копланарный волновод 50 Ом представляет собой линию питания. Прямоугольная полость образована внутри подложки антенны, используя люверсы в качестве металлизированных отверстий с соответствующим расстоянием между ними. Все геометрические параметры были оптимизированы с помощью специальной программы и после этого антенна была прототипирована с помощью недорогой производственной технологии. Экспериментальная проверка характеристик антенны в свободном пространстве показала, что антенна демонстрирует коэффициент отражения ниже -10 dB в полосе пропускания 165 МГц, включая полный диапазон ISM 2,45 ГГц, максимальный коэффициент усиления 3,21 dBi на частоте 2,45 ГГц и эффективность излучения 68 %. Эксперименты были повторены с антенной, интегрированной на задней стороне куртки пожарного, надеваемой на тело, что показало, характеристики лишь немного отклоняются от состояния свободного пространства, при этом максимальный коэффициент усиления увеличивался до 4,9 dBi из-за отражений от тела человека. Эффекты изгиба также были проверены с помощью моделирования, что привело к очень небольшому увеличению резонансной частоты для радиуса изгиба 10 см, что не ухудшает общую производительность в рабочем диапазоне.

Позже щелевая антенна с полостью SIW использовалась Леми и др. [13] в качестве отправной точки для разработки новой платформы сбора энергии, полученной с помощью солнечных элементов и специализированной гибкой

схемы, компактно интегрированной на верхней и задней поверхности структуры антенны SIW, как показано на рисунке 3. Более конкретно, два a-Si:H-солнечных элемента были применены на верхней стороне антенны SIW, в то время как необходимая схема для управления выходной мощностью постоянного тока от солнечных батарей была интегрирована на задней стороне и подключена к солнечным элементам с помощью проводов, проложенных через отверстия для люверсов.

Интегральные схемы были от Central Power Management System (CPMS) и Low Power System (LPS), развернутые на гибком полиимидном субстрате на заземлении, приклеенном на задней стороне SIW.

Другие две интересные компактные структуры для реализации проекта носимых текстильных патч-антенн, работающих на частоте 2,45 ГГц, были предложены и изучены Лю и др. в 2014 году [8]. Для этих антенн уменьшили размер обычной структуры вдвое, используя электрическую / магнитную симметрию. Сначала авторы разработали аналитический анализ обеих структур. Затем они построили точные модели, воспроизводящие особенности их реальной текстильной реализации. Использовали ткань, покрытую серебром и вышивку проводящей нитью, состоящей из стежков с интервалом 1 мм и всего 5 проходов. С помощью моделирования было обнаружено, что сжатие шва, вызванное вышивкой, приводит к смещению резонансной частоты. Следовательно, такой эффект необходимо включить в модель для правильного прогнозирования резонансной частоты и производительности. Были построены реальные прототипы двух антенн и их производительность была экспериментально оценена, получив рабочие полосы пропускания 300 МГц и 130 МГц и максимальные коэффициенты усиления 5,3 dBi и 5,1 dBi. Более того, влияние близости тела человека на параметры производительности оказалось неразличимым, что доказывает хорошие изоляционные свойства заземляющей плоскости.

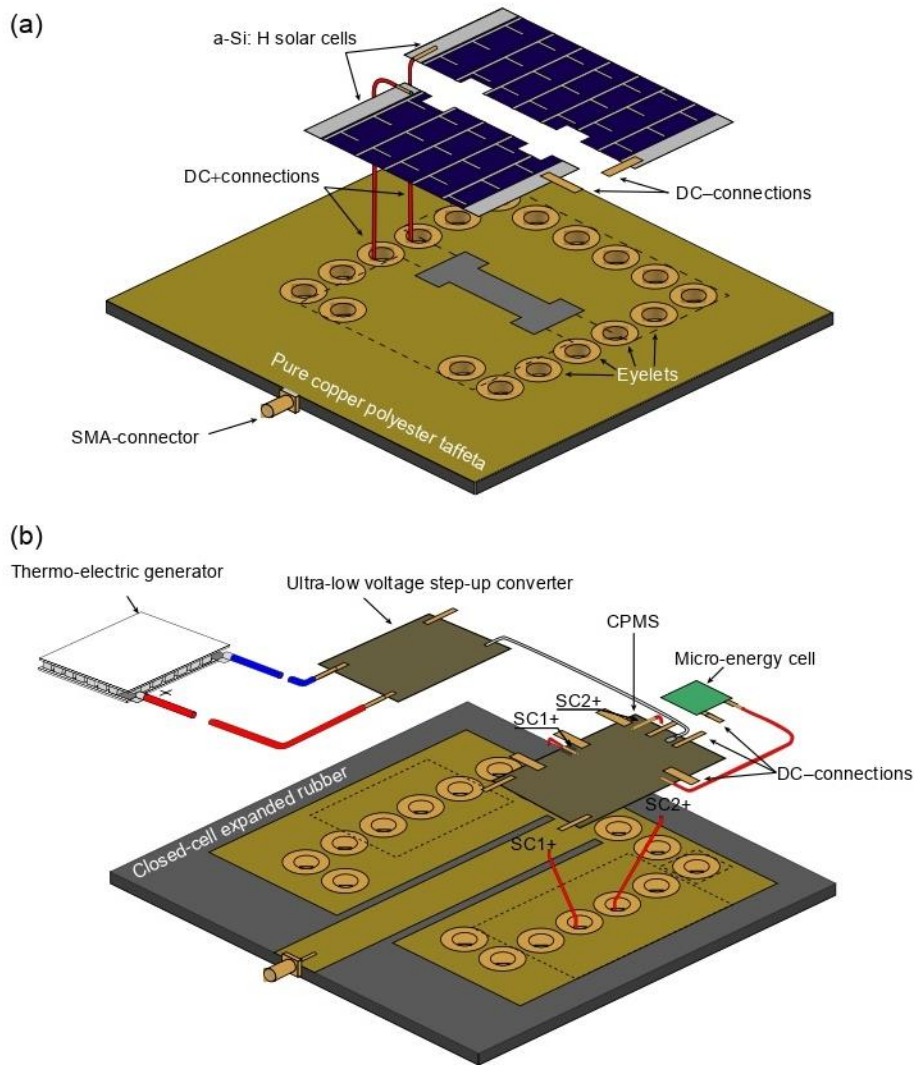


Рис. 3. Щелевая антенна с интегрированной платформой сбора энергии.
(a) вид спереди и (b) вид сзади.

4. Диапазон 5,8 ГГц

Что касается других диапазонов частот ISM, диапазон ISM 5,8 ГГц (5,725-5,875 ГГц) получил относительно меньшее внимание со стороны исследовательского сообщества. Меньше участников предложили носимые текстильные антенны, работающие только в диапазоне 5,8 ГГц.

Здесь выделен только один пример предложенного излучателя, работающего в таком диапазоне. Носимая антенна для работы в диапазоне 5,8 ГГц (для HiperLAN/2), полностью изготовлена из текстильного материала, была предложена Санкаралингамом и др. [10]. Она состоит из круглой проводящей части, изготовленной из электротекстиля Zelt, пришитой к верхней стороне изолирующей полиэфирной тканевой подложки (толщина $h = 2,85$ мм, $\epsilon_r = 1,44$)

и заземляющей плоскости Zelt на нижней стороне подложки. Размеры компактные, в частности, заземляющая плоскость имеет размеры 120×120 мм, а радиус проводящей части имеет оптимизированное значение $a = 11,4$ мм. Производительность была оценена с помощью моделирования и измерений: последнее привело к резонансной частоте 5,91 ГГц, максимальному усилению вне тела около 11 dBi на частоте 5,8 ГГц и эффективности 74 %, что делает предлагаемый излучатель подходящим кандидатом для внетелесной связи в целевом применении.

5. Двухдиапазонные антенны (2,45 ГГц и 5,8 ГГц)

Носимые на теле антенны с возможностью работы в двух диапазонах привлекли больше внимания, чем однодиапазонные антенны для 5,8 ГГц.

Агнессенс и др. предложили в 2014 году новую полуромбовидную двухдиапазонную текстильную антенну [14], использующую технологию интегрированного волновода с полумодовой подложкой (HMSIW). В отличие от антенны HMSIW 2,45 ГГц, описанной ранее, этот излучатель способен работать как на 2,45 ГГц, так и на 5,8 ГГц, используя очень компактный, носимый антенный элемент с надежной производительностью на теле. Для носимых антенн технология SIW (субстрат, интегрированный в волновод) обеспечивает более высокий уровень экранирования тела человека с меньшей заземляющей плоскостью по сравнению с обычными патч-антеннами, которые требуют заземляющих плоскостей с гораздо большими размерами, чем излучающий элемент. Полуромбовидная двухдиапазонная антенна (рис. 4) имеет в конструкции две щели / слота для реализации двух резонансов. Производительность реализованного прототипа была определена в безэховой камере, как в автономном режиме, так и в различных конфигурациях на теле, получив измеренную полосу пропускания коэффициента отражения -10 dB равную 4,9 % и 5,1 %, максимальные усиления на теле 4,4 и 5,7 dBi и эффективность 72,8% и 85,6 % для диапазонов 2,4 ГГц и 5,8 ГГц соответственно. Более того, максимальные значения SAR 0,55 и 0,90 Вт/кг для входной мощности 500 мВт,

полученные в результате измерений на частотах 2,4 и 5,8 ГГц соответственно, ниже предельного значения 1,6 Вт/кг (усредненное на 1 г ткани), установленного международными рекомендациями. На основании этих результатов эта компактная и недорогая антенна представляет собой удобный излучатель с превосходной двухдиапазонной производительностью и надежностью для использования в приложениях, ориентированных на тело человека, таких как носимые биодатчики для медицинского мониторинга или системы мониторинга и координации спасателей.

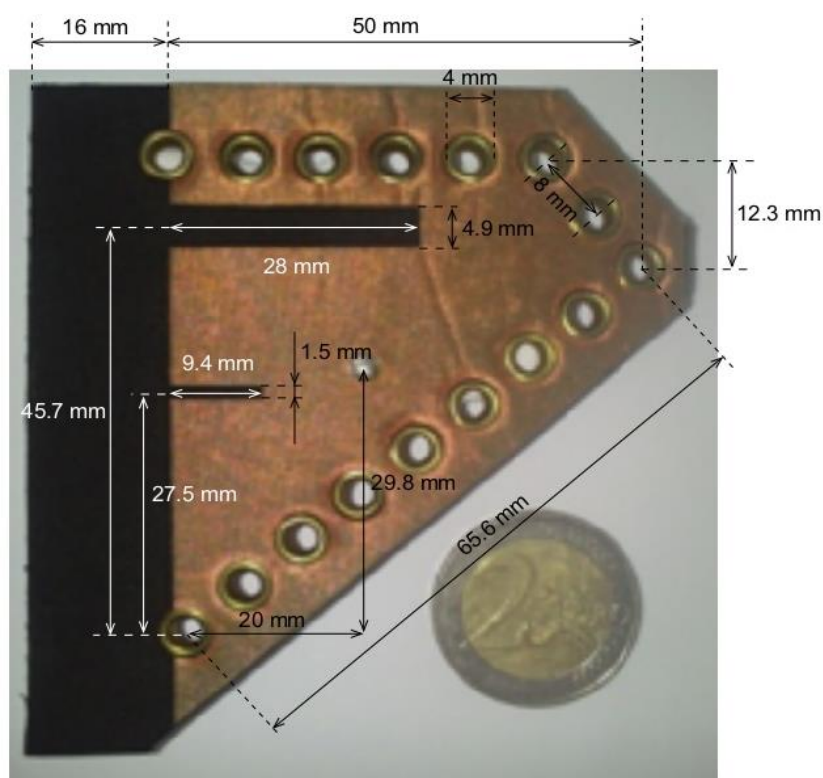


Рис. 4. Прототип двухполосной текстильной антенны в форме полуромба.

В другой недавней публикации Мишры и др. [15] представлена носимая двухдиапазонная патч-антенна с круговой поляризацией, сконструированная с использованием проводящей металлизированной нейлоновой ткани (Zelt) для патча и заземляющей плоскости и джинсовой подложки. Ее круговая поляризация превосходит линейную поляризацию, поскольку она максимизирует мощность передачи/приема, благодаря ее независимости от ориентации. Топология состоит из модифицированной прямоугольной щелевой патч-антенны с особой L-образной топологией для подачи, с окружающим копланарным

заземлением, отделенным от подачи периферийным слотом, развернутым на верх подложки.

Топология такой антенны обеспечивает относительно широкую полосу пропускания. В частности, результаты моделирования показали большую полосу пропускания $-10 \text{ dB } |S_{11}|$ 2017 МГц при 2,45 ГГц и 1759 МГц при 5,8 ГГц и осевое соотношение полосы пропускания 800 МГц и 2343 МГц на 2,45 и 5,8 ГГц соответственно. Моделируемые эффекты тела человека на коэффициент отражения оказались весьма умеренными. Экспериментальные измерения производительности дали аналогичные результаты.

Другая предложенная многополосная антенна, Чен и др. [16], способна работать также в третьем диапазоне, расположенном около 4,725 ГГц, в дополнение к двум рассматриваемым ISM-диапазонам. Это достигается за счет модифицированной топологии U-образного паза для патча, реализованного в нейлоновой ткани RIPSTOP с серебряным покрытием, на гибкой диэлектрической пене в качестве материала подложки, с заземляющей плоскостью на нижней стороне.

6. Диапазоны спутниковой связи: GPS, Galileo, Iridium

Носимые текстильные антенны особенно удобны для спутниковой связи. Например, полезное применение включает координацию действий группы спасателей, работающих в спасательной операции. Каждый человек может быть оснащен носимой текстильной системой, в которой текстильная антенна подключается к спутниковой системе позиционирования, такой как GPS, Galileo или Глобальная навигационная спутниковая система (GNSS). С помощью таких антенн каждый спасатель может получать информацию о своем местоположении, которая может быть передана на базовую станцию, отслеживающую положение и позволяющую оптимально координировать действия команды. Первоначальная работа по проектированию и внедрению носимой текстильной антенны GPS была выполнена Валлоцци и др. в 2009 г. [17]. В этой работе носимая антенна для работы в диапазоне частот GPS-L1 (1,56342-

1,58742 ГГц) была впервые спроектирована и внедрена на носимой защитной пенопластовой подложке, обычно используемой в одежде спасателей. Принятая топология антенны представляет собой патч-антенну с усеченной угловой топологией для излучающего элемента, как показано на рис. 5, оптимальные размеры которой обеспечивают правую круговую поляризацию, как того требует стандарт GPS. Материалы, используемые для этой антенны, состоят из высокопроводящего электротекстиля Flectron®, как для излучающей пластины, так и для заземляющей плоскости и гибкой амортизирующей, огнестойкой пены для подложки. Оптимизированные размеры для излучающей пластины составляют около 8×8 см, а общие минимальные размеры заземляющей плоскости составляют 12×12 см, что можно считать достаточно компактными для нательных антенн.

Антенна была сначала спроектирована и оптимизирована с помощью EM solver ADS Momentum®. Затем было построено несколько прототипов. Экспериментальная оценка характеристик антенны проводилась в безэховой камере с учетом трех различных рабочих ситуаций: автономно, с покрытием текстилем (на излучающем элементе) и встроенной в куртку, надеваемую на тело человека. Три параметра производительности были экспериментально проверены, включая коэффициент отражения, диаграмму усиления и осевое отношение (по поперечной стороне), что продемонстрировало возможность такой топологии устанавливать надежный прием сигнала GPS, при этом обеспечивая достаточную устойчивость к близости тела человека и одежды.

Позже были предложены другие, более сложные носимые антенны с улучшенными характеристиками для спутниковой связи. В частности, Кайванто и др. [18] в 2011 году представили носимую антенну с круговой поляризацией для работы в спутниковых диапазонах GPS и Iridium 1621,35-1626,50 МГц, таким образом, служащую как для позиционирования, так и для целей связи. Охват обоих диапазонов обеспечивается относительно широкой рабочей полосой пропускания, достигаемой с помощью многоугольной щели на квадратном кольцевом патче в качестве излучающего элемента. Излучающий патч

реализован на подложке, сделанной из гибкого текстильного материала, такого как Cordura и арамид с соответствующими механическими свойствами. Электротекстиль, изготовленный из нейлоновой ткани с серебряным и медным покрытием, использовался для патча и заземляющей плоскости. Экспериментальный анализ доказал способность антенны работать достаточно хорошо в обоих диапазонах частот, с точки зрения коэффициента отражения, даже в условиях изгиба, с правой круговой поляризацией (RHCP), поддерживаемой в диапазоне 53 МГц.

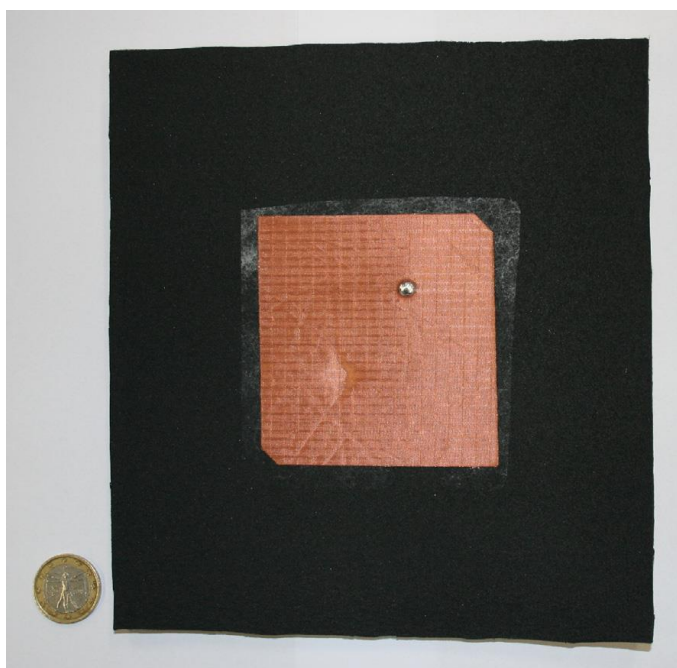


Рис. 5. Реализованный прототип нательной текстильной GPS-антенны.

Однако, для расширения полосы пропускания требуются более сложные методы подачи. Дальнейшее улучшение этой проблемы представлено в работе Дирка и др. [20]. Предлагаемая антенна, которая обеспечивает двухдиапазонную работу в диапазонах GPS и Iridium, дополнительно оснащена активной схемой, содержащей микросхему малошумящего усилителя (LNA), удобно интегрированную в плоскость подачи на задней стороне конструкции, что повышает общую производительность. Более того, вместо используемого зондового фидера, ограничивающего механическую прочность и полосу пропускания, предлагается использовать в антенне гибридный ответвитель в сочетании с апертурно-связанным фидером, как показано на рис. 6,

что обеспечивает широкую полосу пропускания с коэффициентом отражения -10 dB равную 340 МГц и полосу пропускания круговой поляризации 3 dB AR около 183 МГц, что намного шире, чем у любой другой носимой антенны на тех же частотах, которые встречаются в текущей литературе. Апертурно-связанный фидер также повышает гибкость и механическую прочность конструкции, поскольку нет никаких металлических структур (таких как зонды). Насколько известно авторам, такая антенна представляет собой единственную активную носимую антенну с чипом LNA и гибридным ответвителем, компактно интегрированными в структуру антенны.

Структура состоит из трех металлизированных слоев и двух подложек, т. е. пенополиуретановой подложки для излучающей части (материал, обычно используемый в наплечниках защитной одежды) и арамидной подложки толщиной $0,4$ мм для питающей цепи. Верхний слой представляет собой прямоугольную излучающую накладку, вытравленную на медно-полиимидной пленке. Между двумя подложками развернута заземляющая плоскость с двумя ортогональными прямоугольными отверстиями, которые реализуют связь между питающим и излучающим патчами. Характеристики реализованного прототипа с точки зрения коэффициента отражения и усиления (RHCP и LHCP) были тщательно проверены посредством измерений в безэховой камере для различных ситуаций, т. е. для активных и пассивных версий антенны, а также в трех сценариях: свободное пространство, изгиб и интеграция в нательную куртку.

Оценка пассивной антенны привела к полосе частот $|S_{11}| < 10$ dB ($1,512$ – $1,8$) ГГц в свободном пространстве, которая существенно не меняется при изгибе в разных направлениях или интегрируется в защитную куртку, надеваемую на человека. В заключение, эта антенна представляет собой современное состояние, с точки зрения производительности и надежности, для использования в носимых устройствах и работы как в диапазонах GPS, так и в диапазонах Iridium.

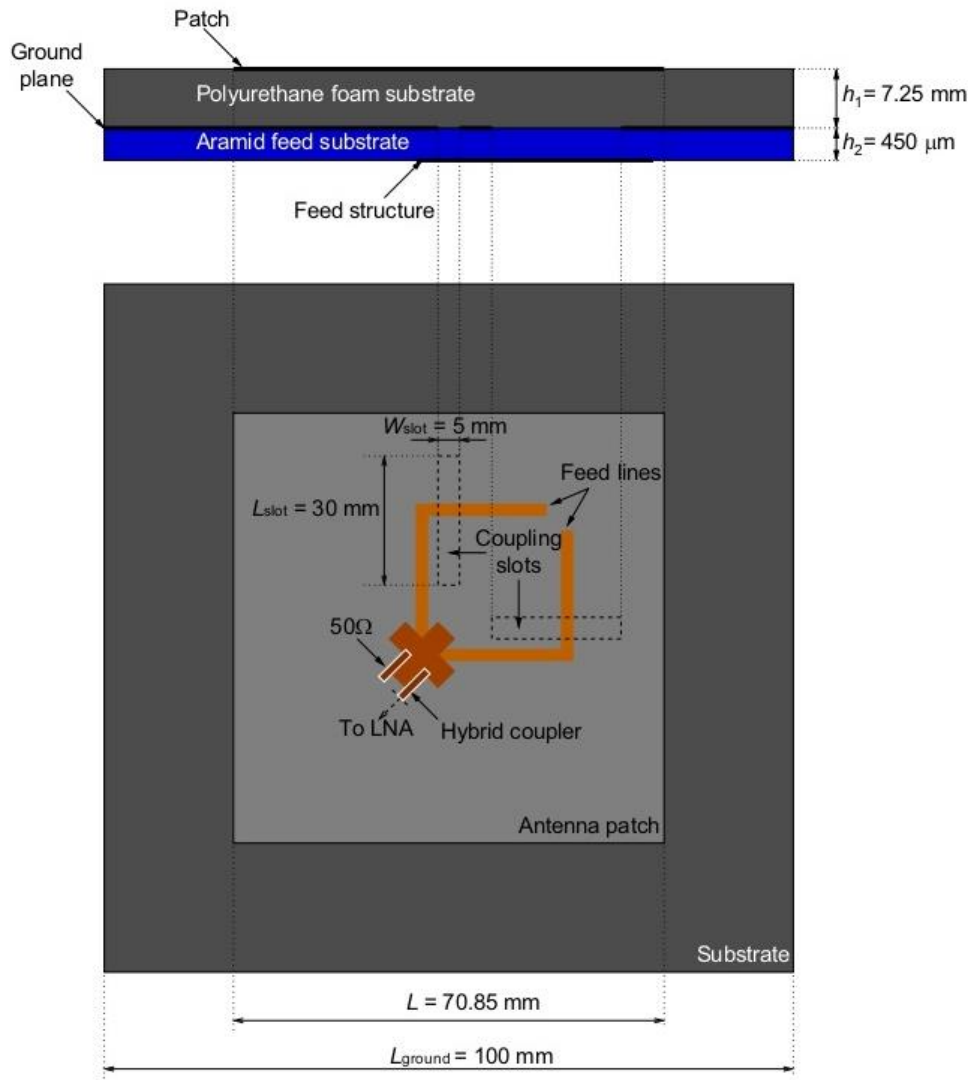


Рис. 6. Схема активной носимой антенны для спутниковой связи GPS и Iridium.

7. Сверхширокая полоса

С момента выделения полос частот сверхширокополосной связи (UWB) Федеральной комиссией по связи (FCC) в Соединенных Штатах (3,1,-10,6 ГГц) и Европейской комиссией (EC) в Европе (6,-8,5 ГГц) начались обширные исследования по проектированию и созданию прототипов антенн для работы на таких частотах. UWB-связь потенциально предлагает несколько преимуществ по сравнению с обычными узкополосными, такими как более высокие достижимые скорости передачи данных и повышенная помехоустойчивость, благодаря более низкой спектральной плотности мощности. Также для телесно-ориентированной связи преимущества UWB особенно привлекательны и это стимулировало обширные исследования новых носимых текстильных

антенн UWB в последнее время. Наиболее показательны два примера последних современных носимых антенн UWB. В обоих примерах было выполнено сложное требование к носимой антенне UWB, то есть наличие заземляющей плоскости между излучающими элементами и телом пользователя, которая направляет излучение от тела человека. Эта особенность представляет собой новинку по сравнению с ранее предложенными носимыми текстильными антеннами UWB, основанными, в основном на очень популярной топологии Vivaldi, которая страдает от характеристик всенаправленной диаграммы направленности излучения, в которой большая часть излучаемой мощности поглощается телом человека [20, 21].

В 2014 году Зарич и др. [22] предложили носимую антенну UWB с очень компактным профилем однонаправленной диаграммы направленности и высокой точностью воспроизведения для работы в диапазоне UWB EC (6,-8,5 ГГц). Антенна подходит для импульсного радио-применения UWB (IR-UWB) для точной локализации человека. Предлагаемая структура, показанная на рис. 7, строго говоря, не является текстильной. Однако ее очень компактные размеры и низкий профиль, а также ее высокая устойчивость к близости тела человека, делают ее носимой антенной. В будущих реализациях фактические жесткие материалы могут быть легко заменены электротекстилем и диэлектриками.

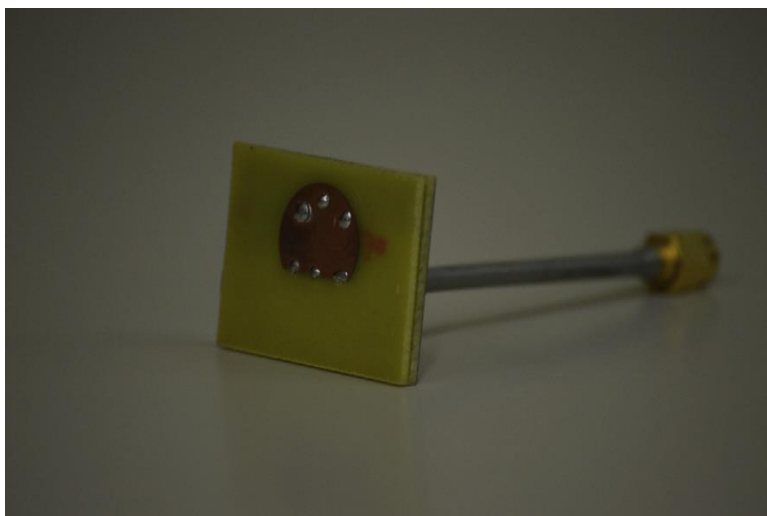


Рис. 7. Низкопрофильная UWB антенна с направленной диаграммой направленности.

Такая антенна очень устойчива к присутствию тела человека, поскольку производительность остается стабильной даже при ее прямом контакте с кожей.

Еще одна полностью текстильная UWB-антенна с заземляющей плоскостью и однонаправленной диаграммой направленности излучения была представлена Самалом и др. [23]. Эта антенна состоит из плоской патч-структуры на текстильной подложке из войлока. Заземляющая плоскость и излучающая часть выполнены с использованием популярного электротекстильного материала, называемого ShieldIt™. Предлагаемое устройство представляет собой первую полностью текстильную UWB-антенну с полной заземляющей плоскостью и направленной диаграммой направленности, которая будет реализована. Это было достигнуто с помощью сложной топологии патча, состоящего из комбинации нескольких геометрических форм, создающих несколько резонансов на разных частотах, чтобы получить $|S_{11}| < -10$ dB по всему диапазону частот FCC UWB (3,1,-10,6 ГГц). Экспериментальная проверка показала удовлетворительные характеристики, такие как максимально достижимый коэффициент усиления 6,89 dBi, очень низкую мощность излучения, направленного на тело человека и нечувствительность к близости тела, что делает антенну отличным кандидатом для UWB-связи вне тела.

8. Диапазон 60 ГГц

В последние несколько лет миллиметровая тело-ориентированная связь вокруг центральной частоты 60 ГГц начала получать значительное внимание со стороны исследовательского сообщества, благодаря нескольким неотъемлемым преимуществам. Чахат и др. [24] сообщают о трех главных преимуществах. Во-первых, могут быть достигнуты более высокие скорости передачи данных, учитывая широкий доступный спектр частот 7 ГГц (57,-64 ГГц) во всем мире. Во-вторых, возможность использования более низкой спектральной плотности мощности в беспроводной связи в этом широком диапазоне частот, что приводит к высокому уровню устойчивости к помехам

и высокому уровню безопасности. Наконец, размеры антенн резко уменьшены, что особенно привлекательно для носимых приложений.

Предлагается два интересных примера для носимых антенн 60 ГГц. Первый из них – это четырехэлементная патч-антенная решетка для внетелесной связи в диапазоне 60 ГГц. Излучающие элементы антенны были изготовлены путем лазерной резки гибкой медной фольги толщиной 0,07 мм, развернутой на хлопковой подложке с заземляющей плоскостью ShieldIt™. Характеристики антенны были проверены в экстремальных условиях в свободном пространстве и в условиях нахождения на теле человека, а также при изгибе и смятии. В свободном пространстве измеренный $|S_{11}|$ остается ниже 10 dBi в диапазоне 57-64 ГГц, а максимальный измеренный коэффициент усиления на частоте 60 ГГц составляет 8,0 dBi. Характеристики изменяются лишь незначительно, когда антенна развернута на теле человека, поскольку заземляющая плоскость изолирует ее от тканей человека, а также при изгибе и смятии.

Вторая предлагаемая антенна для размещения на теле – это планарная Яги-Уда, обеспечивающая излучение с торца. В свободном пространстве антенна согласована по всему диапазону 60 ГГц и демонстрирует максимальный коэффициент усиления 11,8 dBi на частоте 60 ГГц. Близость тела человека влияет на производительность в зависимости от расстояния. Однако антенна также работает удовлетворительно при размещении на теле человека и в условиях изгиба.

Заключение

В этой статье был представлен обзор некоторых типичных современных носимых текстильных антенн на основе частотного диапазона, в котором они работают. За последнее время технология носимых на теле антенн развивалась от простых прямоугольных патч-антенн узкополосных до более сложных топологий для излучающего элемента с широкополосными характеристиками, а также новыми материалами и перспективными технологическими решениями.

Это позволяет изготавливать более прочные, удобные и бесшовные структуры антенн. Носимые текстильные антенны теперь доступны для многих различных рабочих частот, от нижних диапазонов УВЧ до самого последнего миллиметрового диапазона волн 60 ГГц. Было решено множество проблем, связанных с телесно-ориентированной коммуникацией и присутствием человеческого тела, таких как нечувствительность к телу пользователя, изгибу и стирке, были рассмотрены более успешные решения.

Беспроводная связь, ориентированная на тело, по-прежнему представляет собой популярную область исследований вместе с носимыми на теле человека текстильными антеннами. Будущие исследования могут быть сосредоточены на новых структурах и топологиях, обеспечивающих лучшую производительность, а также на материалах и практических применениях. Например, механическая прочность и комфорт по-прежнему остаются проблемами, необходимо провести много исследований, чтобы добиться полной интеграции в одежду.

Литература

1. K. Finkenzeller, RFID Handbook Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication, Wiley, 2010. 2013. [Online]. Available: <https://www.gs1.org/epcglobal>
2. K. Koski, E. S. Lohan, L. Sydänheimo, L. Ukkonen and Y. Rahmat-Samii, "Electro-textile UHF RFID patch antennas for positioning and localization applications," 2014 IEEE RFID Technology and Applications Conference (RFID-TA), Tampere, Finland, 2014, pp. 246-250, <https://doi.org/10.1109/RFID-TA.2014.6934237>
3. M. Hirvonen, C. Böhme, D. Severac and M. Maman, "On-Body Propagation Performance With Textile Antennas at 867 MHz," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 61, no. 4, pp. 2195-2199, April 2013, <https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2234713>

4. F. Declercq, A. Georgiadis and H. Rogier, "Wearable aperture-coupled shorted solar patch antenna for remote tracking and monitoring applications," Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Rome, Italy, 2011, pp. 2992-2996.
5. ITU, "Radio Regulations," 2012. [Online]. Available: <http://www.itu.int/pub/R-REG-RR-2012>
6. C. Hertleer, H. Rogier, L. Vallozzi and L. Van Langenhove, "A Textile Antenna for Off-Body Communication Integrated Into Protective Clothing for Firefighters," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 57, no. 4, pp. 919-925, April 2009, <https://doi.org/10.1109/TAP.2009.2014574>
7. L. Vallozzi, H. Rogier and C. Hertleer, "Dual Polarized Textile Patch Antenna for Integration Into Protective Garments," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 7, pp. 440-443, 2008, <https://doi.org/10.1109/LAWP.2008.2000546>
8. F. -X. Liu, T. Kaufmann, Z. Xu and C. Fumeaux, "Wearable Applications of Quarter-Wave Patch and Half-Mode Cavity Antennas," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 14, pp. 1478-1481, 2015, <https://doi.org/10.1109/LAWP.2014.2383399>.
9. Smart Textiles and Their Applications. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100574-3.00026-6> Copyright © 2016 Elsevier Ltd.
10. S. Sankaralingam, S. Dasgupta, S. S. Roy, K. Mohanty and B. Gupta, "A fully fabric wearable antenna for HiperLAN/2 applications," 2011 Annual IEEE India Conference, Hyderabad, India, 2011, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/INDCON.2011.6139490>
11. L. Vallozzi, P. Van Torre, C. Hertleer, H. Rogier, M. Moeneclaey and J. Verhaevert, "Wireless Communication for Firefighters Using Dual-Polarized Textile Antennas Integrated in Their Garment," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 58, no. 4, pp. 1357-1368, April 2010, <https://doi.org/10.1109/TAP.2010.2041168>

12. Moro, R. & Agneessens, Sam & Rogier, Hendrik & Bozzi, Maurizio. (2012). Wearable textile antenna in substrate integrated waveguide technology. *Electronics Letters*. 48. 985–987. <https://doi.org/10.1049/el.2012.2349>
13. S. Lemey, F. Declercq and H. Rogier, "Textile Antennas as Hybrid Energy-Harvesting Platforms," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 11, pp. 1833-1857, Nov. 2014, <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2355872>
14. S. Agneessens and H. Rogier, "Compact Half Diamond Dual-Band Textile HMSIW On-Body Antenna," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 5, pp. 2374-2381, May 2014, <https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2308526>
15. S. K. Mishra, V. Mishra and N. Purohit, "Design of wide band circularly polarized textile antenna for ISM bands at 2.4 and 5.8 GHz," 2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES), Kozhikode, India, 2015, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/SPICES.2015.7091368>
16. S. J. Chen, T. Kaufmann and C. Fumeaux, "Wearable textile microstrip patch antenna for multiple ISM band communications," 2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), Orlando, FL, USA, 2013, pp. 1860-1861, <https://doi.org/10.1109/APS.2013.6711588>
17. Vallozzi, Luigi & Vandendriessche, W. & Rogier, Hendrik & Hertleer, Carla & Scarpello, Maria. (2009). Design of a protective garment GPS antenna. *Microwave and Optical Technology Letters*. 51. 1504 - 1508. <https://doi.org/10.1002/mop.24372>
18. E. K. Kaivanto, M. Berg, E. Salonen and P. de Maagt, "Wearable Circularly Polarized Antenna for Personal Satellite Communication and Navigation," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 12, pp. 4490-4496, Dec. 2011, <https://doi.org/10.1109/TAP.2011.2165513>
19. GS1 : [Электронный ресурс] : URL: <https://www.gs1.org/home2013>. (дата обращения 21.02.2013).

20. A. Dierck, H. Rogier and F. Declercq, "A Wearable Active Antenna for Global Positioning System and Satellite Phone," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 61, no. 2, pp. 532-538, Feb. 2013, <https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2223441>
21. J. Bai, S. Shi and D. W. Prather, "Modified Compact Antipodal Vivaldi Antenna for 4–50-GHz UWB Application," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 59, no. 4, pp. 1051-1057, April 2011, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2011.2113970>
22. A. Zaric, J. R. Costa and C. A. Fernandes, "Design and Ranging Performance of a Low-profile UWB Antenna for WBAN Localization Applications," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 62, no. 12, pp. 6420-6427, Dec. 2014, <https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2360207>
23. P. B. Samal, P. J. Soh and G. A. E. Vandenbosch, "UWB All-Textile Antenna With Full Ground Plane for Off-Body WBAN Communications," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 62, no. 1, pp. 102-108, Jan. 2014, <https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2287526>
24. N. Chahat, M. Zhadobov and R. Sauleau, "Antennas for Body Centric Wireless Communications at Millimeter Wave Frequencies," in Progress in Compact Antennas, D. L. Huitema, Ed., InTech, 2014. <https://doi.org/10.5772/58816>

Для цитирования:

Вицукаев А.В., Олехнович И.А., Фролов А.Ю. Текстильные антенны. Часть 3. Современные разработки текстильных антенн. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.8.9>