



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.6.15>

УДК: 677.532

ТЕКСТИЛЬНЫЕ АНТЕННЫ. ЧАСТЬ 2. КРИТЕРИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

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 данной статье рассмотрены разработки в области текстильных антенн с точки зрения интеллектуальных текстильных систем. А также показаны критерии проектирования текстильных антенн, проблемы их работоспособности и эксплуатации и перспективы развития.

Ключевые слова: текстильная антенна, проектирование и конструирование текстильной антенны, особенности конструкции текстильной антенны.

Автор для переписки: Олехнович Ирина Александровна,

olekhnovich.i@otd40.niip.ru

Введение

Причина использования текстильных материалов в антеннах заключается в применении, для которого они предназначены, являясь интеллектуальными текстильными системами и телесно-ориентированной коммуникацией. Интеллектуальные текстильные системы представляют собой концепцию одежды, которая, в дополнение к традиционным функциям, таким как защита тела человека от окружающей среды, также предлагает дополнительную функциональность, как сенсорная чувствительность, функция срабатывания на определенные условия, коммуникативность, реализуемые носимыми устройствами, интегрированными в «умную» одежду. Сенсорные функции реализуются с помощью датчиков, встроенных в текстильный материал и предназначены для определения состояния пользователя (т. е. температуры тела, частоты сердечных сокращений, положения тела) и/или состояния окружающей среды (т. е. внешней температуры и влажности). Исполнительные функции включаются встроенными в одежду приводами, которые подают сигналы определения состояния и/или сигналы тревоги, чтобы информировать, отдавать определенные команды или предупреждать пользователя об определенных событиях, касающихся его/ее состояния или состояния окружающей среды. Наконец, связь реализуется беспроводным способом с помощью встроенной носимой текстильной антенны в сочетании с носимым приемопередатчиком. Такой вид беспроводной связи происходит между телом человека и окружающей средой и называется телесно-ориентированной связью, которая параллельно с текстильными антеннами, стала очень популярной областью исследований за последние десятилетия, начиная от мониторинга жизненных показателей пациентов до координации и мониторинга спасателей, а также в секторе развлечений и в спорте. Большинство существующих текстильных антенн являются микрополосковыми или патч-антеннами

1. Области применения «умных» текстильных систем

Важным этапом в создании «умных» текстильных систем является внедрение интеллекта в одежду. Ключевые этапы интеграции электронных устройств с одеждой возможны на различных стадиях производственного процесса. Если датчики и микропроцессоры интегрированы в саму пряжу, они не будут мешать нормальному процессу производства одежды. Технология основана на инкапсуляции, способствующей изготовлению электронно-активных и сенсорных волокон [1].

Текстиль, чтобы вести себя интеллектуально, должен иметь датчик, привод (для активного интеллектуального текстиля) и блок управления (для очень интеллектуального текстиля). Этими компонентами могут быть оптические волокна, материалы с фазовым переходом, материалы с памятью формы, термохромные красители, миниатюрные электронные элементы и т. д. Эти компоненты образуют неотъемлемую часть текстильной структуры и могут быть включены в субстрат на любой стадии, а именно: на стадии прядения волокна, на стадии формирования пряжи/ткани и на стадии заключительной отделки.

Активный (интеллектуальный) материал может быть включен в прядильный раствор или полимерные чипсы перед прядением, например, волокно лиоцелл может быть модифицировано добавками электропроводящих компонентов во время производства для получения электропроводящего целлюлозного волокна. Датчики и активаторы также могут быть встроены в текстильную структуру во время формирования ткани, например, во время ткачества. Большинство активных отделок были разработаны для придания тканям определенных свойств непосредственно на стадии заключительной отделки. Электронные блоки управления могут быть синхронизированы с друг с другом во время отделки. Такое техническое решение, как микрокапсулирование, обычно предпочтительно для интеллектуального текстильного субстрата.

Широкое применение интеллектуальные ткани нашли в медицинской сфере. Например, разработка носимых систем мониторинга для здравоохранения

в виде «телемедицины». Носимые устройства позволяют непрерывно контролировать физиологические сигналы во время обычной повседневной деятельности [2]. Это может решить проблему клинических визитов и дать краткий обзор физиологического состояния пациента. Типичные примеры, например: беспроводная одежда со встроенными текстильными датчиками для одновременного получения и непрерывного мониторинга ЭКГ, дыхания, EMG и физической активности. «Умная одежда» со встроенными датчиками деформации ткани на основе пьезорезистивных нитей и тканевых электродов выполнена с использованием металлизированных нитей. Сенсорный жилет, включающий полностью тканые текстильные датчики для ЭКГ, портативную электронную плату для оценки движения и предварительной обработки сигнала и Bluetooth подключение для передачи данных. Носимая сенсорная одежда измеряет сердечный ритм и дыхание человека с помощью жилета с отведениями для ЭКГ. Проводящая волоконная поверхность и датчики полностью интегрированы в одежду (Smart Shirt) (рисунок 1).



Рис. 1. Носимые устройства в здравоохранении.

Спасательный жилет – это еще одно медицинское устройство, которое носит пациент и с которого впоследствии считывается информация по его кровяному давлению и мониторингу частоты сердечных сокращений;

информация передается на компьютер и анализируется медицинским персоналом. Артериальное давление также измеряется с помощью артериальной тонометрии посредством использования этого спасательного жилета.

Специализированная камера в головном уборе была разработана для ношения фельдшерами. Визуальная информация, полученная камерой, может быть передана непосредственно медицинскому персоналу в больнице, что позволяет мгновенно рекомендовать соответствующее лечение.

Армия/оборона: во всем мире военные силы изучают, как интеллектуальная одежда может использоваться для повышения безопасности и эффективности военных сил. В экстремальных условиях окружающей среды и опасных ситуациях необходимы информационные технологии в реальном времени для повышения защиты и выживаемости людей, работающих в сложных условиях. Улучшения производительности и дополнительные возможности окажут огромную помощь в обороне и службам чрезвычайного реагирования. Требования для таких ситуаций заключаются в мониторинге жизненных показателей и облегчении травм, а также мониторинге опасностей окружающей среды, таких как токсичные газы, например. Беспроводная связь с центральным блоком позволяет медикам проводить удаленную консультацию и оказывать помощь для более быстрого реагирования. [3].

Спорт – это область важных разработок интеллектуальной одежды, в которой ряд важных функций может быть реализован с помощью умных устройств. Например, мониторинг частоты сердечных сокращений, дыхания, температуры тела и других физиологических параметров; измерение активности, определение количества сделанных шагов, общего пройденного расстояния; действие для активной стимуляции мышц, как использование электрической стимуляции мышц; работа для обеспечения «умных» силовых тренировок; запись аспектов производительности, таких как давление стопы или определенные движения суставов; защита от травм.

Умная спортивная обувь – глобальные системы позиционирования (GPS), встроенные в обувь для ходьбы, которые позволяют горноспасательным

службам отслеживать пользователя. Их также можно использовать для контроля местонахождения маленьких детей.

2. Проектирование текстильных антенн

Основные рекомендации по проектированию и анализу текстильных антенн взяты из учебной литературы [4].

Параметры производительности текстильных антенн:

- ▽ Входное сопротивление, коэффициент отражения и обратные потери
- ▽ Коэффициент усиления и направленность
- ▽ Диаграммы направленности излучения
- ▽ Эффективность
- ▽ Поляризация
- ▽ Удельный коэффициент поглощения (SAR)

Критерии проектирования и оптимизации текстильных антенн:

Обычно цель проектирования текстильной антенны состоит в определении геометрии антенны, которая соответствует некоторым заданным критериям, которые налагаются на один или несколько описанных параметров производительности. Проектирование антенны обычно состоит из первого этапа, на котором выполняется грубый расчет размеров антенны с использованием аналитических формул (например, для прямоугольных патч-антенн). Затем размеры тонко настраиваются (т. е. оптимизируются) для соответствия критериям проектирования.

2.1. Типовые критерии проектирования:

- ▽ Частота (ы) резонанса: применение, для которого предназначена антенна, будет определять частоту или несколько частот резонанса антенны. Например, антенны ISM-диапазона должны резонировать на одной (или нескольких) частотах ISM-диапазона (868 МГц, 2,45 ГГц, 5,8 ГГц). Для работы антенны требуется, чтобы входное сопротивление антенны было оптимально согласовано с сопротивлением источника,

таким образом, вводимая мощность максимально преобразуется в форму излучаемого поля. Понятие резонанса строго связано с коэффициентом отражения.

- ▽ Коэффициент отражения: типовой критерий проектирования, обеспечивающий резонанс антенны на заданной частоте.
- ▽ Усиление: типовое требование к усилению текстильной патч-антенны заключается в том, что максимум диаграммы усиления, должен быть больше заданного значения для любой частоты внутри интервала полосы пропускания.
- ▽ Эффективность: чтобы максимизировать излучаемую мощность, конструкция антенны будет стремиться к большой эффективности излучения. Общая эффективность является произведением двух членов (первый – коэффициент рассогласования импеданса может быть максимизирован путем минимизации коэффициента отражения; второй – эффективность проводимости и выбор диэлектрика, может быть максимизирован путем использования текстильных материалов с низкими омическими и диэлектрическими потерями, т. е. электротекстиля с высокой проводимостью и текстильных диэлектрических подложек с низким коэффициентом $\tan\delta$).
- ▽ Поляризация: в некоторых конкретных применениях может потребоваться определенный тип поляризации, как например, линейная поляризация легко достигается с помощью простой прямоугольной накладки с точкой питания, размещенной вдоль одной из осей симметрии; круговая поляризация требуется в таких применениях, как например, спутниковая связь GPS.
- ▽ SAR (удельный коэффициент поглощения): критерии проектирования обычно устанавливают SAR ниже максимального предела, установленного правилами. Несколько стран устанавливают пределы безопасности для максимального уровня допустимого SAR. Например, такой предел установлен на уровне 2,0 мВт/г (в среднем на 10 г ткани) в Европе. В текстильных антеннах наличие заземляющей плоскости, расположенной

между излучающим элементом и телом пользователя, в любом случае рекомендуется, поскольку она действует как электромагнитный экран для тканей тела человека и, таким образом, позволяет значительно снизить SAR.

2.2. Проблемы и побочные эффекты, связанные с текстильными антеннами:

▽ Близость человеческого тела

Нахождение тела человека в непосредственной близости от носимой текстильной антенны является наиболее частой причиной ухудшения ее производительности, поскольку излучатель встроен в одежду и, следовательно, находится в непосредственной близости от поверхности носителя. Обычно носимые антенны носят в непосредственной близости от рук, ног, груди или спины тела человека, на максимальных расстояниях порядка нескольких сантиметров. Это влияет на обратные потери, диаграммы излучения и эффективность излучения.

▽ Изгиб

Изгиб антенны представляет собой еще один очень важный неблагоприятный эффект, который следует учитывать при проектировании и анализе носимых антенн. Поскольку текстильная антенна по своей природе гибкая, при интеграции в одежду, как правило, в область руки, ноги или груди, она принимает форму ее поверхности. Это явление вызывает значительное изменение некоторых параметров производительности, являясь сдвигом резонансной частоты и деформацией диаграммы направленности излучения. Для узкополосных антенн настройка резонансной частоты в рабочем диапазоне имеет решающее значение для обеспечения максимального качества и надежности связи. Поэтому для инженера-конструктора очень важно уметь моделировать и прогнозировать эффекты изгиба на текстильных антеннах.

▽ Стирка

Текстильные антенны должны стать полностью интегрированной частью будущей интеллектуальной одежды,

и, следовательно, они подвержены загрязнению из-за пыли и пота. Таким образом, их нужно будет стирать, вместе с одеждой или отдельно. В течение многих лет влияние стирки игнорировалось научным сообществом, которое больше сосредотачивалось на проблемах проектирования и реализации. Однако в последние годы некоторые исследователи учли стирку и изучили влияние на стабильность характеристик после нескольких циклов стирки, а также методы реализации для создания водостойких и устойчивых к стирке антенн.

∇ Энергоэффективность

Для носимых систем, включая текстильные антенны, энергоэффективность представляет собой решающий вопрос, особенно для так называемых автономных систем, где необходимая для работы системы мощность в идеале получается полностью за счет сбора энергии из окружающей среды и не требуется никакого дополнительного источника питания [5]. Даже в случае носимых систем, оснащенных носимыми аккумуляторными блоками, очень важно поддерживать потребление энергии как можно ниже. Для этой цели было предусмотрено несколько методов с помощью инновационных текстильных антенн, таких как активные антенны, а также использование метода разнесения нескольких антенн.

Активные антенны. Концепция активных антенн долгое время использовалась с обычными антеннами и недавно была применена к текстильным носимым антеннам. В недавних работах были предложены новые текстильные антенны с интегрированной активной схемой, достигающие заметно более высоких коэффициентов усиления при низких показателях шума с очень компактной и носимой структурой. Использование текстильных антенн, которые напрямую усиливают принимаемый сигнал, с небольшим добавленным шумом, увеличивает уровень мощности принимаемых сигналов в беспроводных коммуникациях вне тела, без необходимости увеличения уровней мощности на передающей стороне.

Метод разнесения. Известный неблагоприятный эффект в телесно-ориентированных коммуникациях вызван затуханием и затенением сигнала, принимаемого движущимся субъектом, оснащенным носимой антенной системой. Эти явления являются следствием многолучевого распространения и отрицательно влияют на потребление энергии. В частности, эти случайные колебания принимаемого сигнала приводят к увеличению частоты ошибок по битам. Чтобы справиться с этим пагубным эффектом и гарантировать заданный уровень передаваемая мощность должна быть существенно увеличена по сравнению со случаем без затухания и затенения, что, очевидно, не является энергоэффективным решением проблемы. В качестве альтернативы, более энергоэффективный подход заключается в использовании нескольких принимающих носимых антенн, распределенных по разным местам на теле человека, реализуя метод разнесения [6]. Этот метод основан на главном принципе, что вероятность одновременного получения очень низких уровней сигнала на нескольких антеннах существенно меньше, чем на одной антенне. Разнесение классифицируется в соответствии с характеристиками, которые отличают сигналы нескольких антенн друг от друга, в частности, пространство (т. е. местоположение антенны), частота, диаграмма направленности и поляризация. Таким образом, разнесение позволяет увеличить уровень сигнала без дополнительного увеличения мощности или, что эквивалентно, получить ту же принимаемую мощность, что и в случае с одной антенной, но при значительно более низкой мощности.

Заключение

Растущий спрос на интеллектуальный и интерактивный текстиль со стороны транспортной отрасли, вероятно, станет одним из основных факторов роста рынка. Кроме того, ожидается, что рост в медицине и здравоохранении приведет к более высокому спросу на интеллектуальный текстиль в течение прогнозируемого периода. Однако рост рынка, вероятно, будет медленным из-за высоких цен на готовую продукцию интеллектуального текстиля

по сравнению с обычными текстильными материалами. Ожидается, что рост числа научно-исследовательских и технологических мероприятий и инноваций предоставит новые возможности для роста рынка. Ожидается, что сегмент промышленного применения будет лидировать на мировом рынке в ближайшем будущем. Обширные исследования и разработки привели к коммерциализации интеллектуального текстиля для пожарных; однако все еще существует разрыв между коммерциализацией и разработкой прототипа.

Литература

1. Md. Syduzzaman, Sarif Ullah Patwary, Kaniz Farhana, Sharif Ahmed Smart Textiles and Nano-Technology: A General Overview Syduzzaman et al., J Textile Sci Eng 2015, 5:1 <https://doi.org/10.4172/2165-8064.1000181>
2. Smart and Interactive Textiles: Materials and Applications <http://textilelearner.blogspot.com/2013/04/applications-of-smart-andinteractive>.
3. Kuypers, Marijke (11 March 2013) «New technologies for innovative sportswear» <http://www.stitchprint.eu/news/new-technologies-for-innovative-sportswear/>
4. Luigi Vallozzi, Carla Hertleer and Hendrik Rogier. Chapter: Latest developments in the field of textile antennas. Smart Textiles and Their Applications, pages 599–626. 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100574-3.00026-6>
5. M. M. Tentzeris, A. Georgiadis and L. Roselli, "Energy Harvesting and Scavenging [Scanning the Issue]," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 11, pp. 1644-1648, Nov. 2014, <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2361599>

Для цитирования:

Вицукаев А.В., Олехнович И.А., Фролов А.Ю. Текстильные антенны. Часть 2. Критерии проектирования. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.6.15>