DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.5.14

УДК: 677.532

ТЕКСТИЛЬНЫЕ АНТЕННЫ. ЧАСТЬ 1. СПОСОБЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА

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. В данной статье приводится обзор возможных конструкций текстильных антенн и технологии их производства.

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

Текстильные антенны – особый класс антенн, которые частично или полностью изготовлены из текстильных 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.

Микрополосковые антенны, часто называемые патч-антеннами, очень хорошо известны и активно разрабатывались в течение последних четырех десятилетий, хотя первая идея относится к 1950-м годам [26]. Успех микрополосковых и патч-антенн в основном обусловлен их низким профилем и способностью прилегать к изогнутым поверхностям, что изначально сделало их очень подходящими для интеграции на поверхности самолетов, ракет, спутников, кораблей и так далее.

Схема патч-антенны показана на рис. 1. Пространство между патчем и заземляющей плоскостью занято слоем диэлектрического материала, обозначенного как подложка антенны, с определенной диэлектрической проницаемостью Ɛr, тангенсом угла потерь tan d и толщиной h. Большое разнообразие различных топологий патчей уже было предложено и применено конструкторами по всему миру.

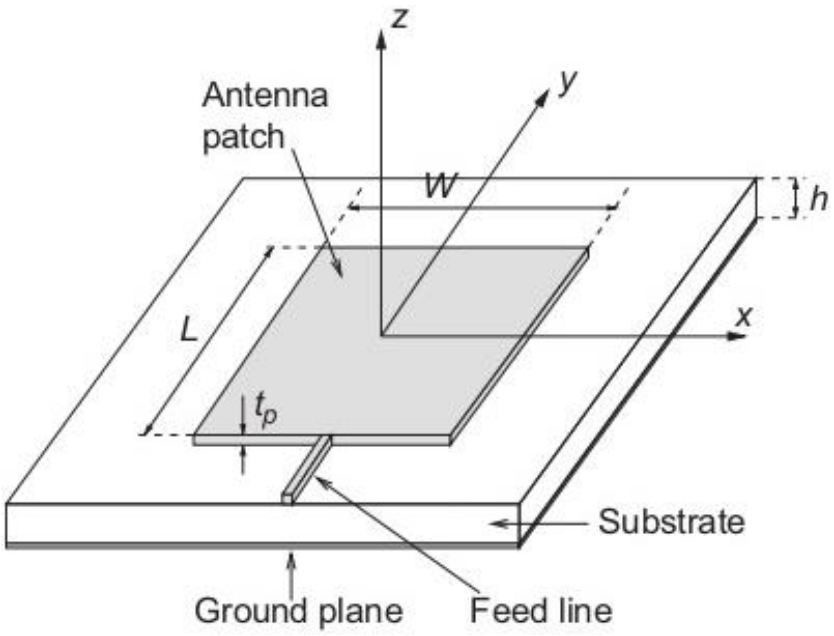

Рис. 1. Схема структуры патч-антенны.

Текстильные антенны имеют разные формы и конструкции, отличаются методом изготовления. Работоспособность и возможность применения в различных сферах деятельности; легкость конструкции, простота изготовления и доступность материалов, устойчивость к стиркам (одежда) и к воздействию окружающей среды – это те преимущества, которые способствовали широкому внедрению

текстильных антенн (особенно в чрезвычайных ситуациях, медицине – датчики исследования параметров тела человека; военной сфере).

Некоторые способы получения:

1) Использование в переплетении металлизированных волокон (например, полиамидное волокно с нанесенным серебряным покрытием или медным, олово-медным покрытием; полиэфирные / полиуретановые волокна с нанесенным медным покрытием, полиэфирные волокна с медно-никелевым покрытием и др.) с обычными текстильными волокнами – диэлектриками при вязании / ткачестве;

2) Вышивка по тканям / трикотажу металлизированными нитями;

3) Использование фольгированного материала на тканях;

4) Аддитивные технологии 3D печати по текстильным материалам;

5) Печать токопроводящими пастами через сетчатые шаблоны (шелкография, печатные машины карусельного типа, плоская и ротационная печать);

6) Печать токопроводящими чернилами;

7) Нанесение металлсодержащих покрытий на текстильный субстрат (волокна / готовые ткани);

Рассмотрим некоторые способы и технологии изготовления, а также положительные и отрицательные стороны.

1. Использование токопроводящих волокон, интегрированных в текстильный материал

1.1. Датчики в одежде

Важные характеристики текстильных материалов, учитываемые при проектировании носимых антенн, определяются свойствами, составом, структурой волокон/пряжи. Это пористые материалы, в которых плотность волокон, объем воздуха и размер пор определяют общие характеристики, например, воздухопроницаемость и теплоизоляцию. Соответственно, ткани представляют собой гибкие и сжимаемые материалы, толщина и плотность

которых могут изменяться при низких давлениях. Более того, основная ориентация волокон вносит внутреннюю плоскую анизотропию общих свойств. [12]

Кроме того, волокна постоянно обмениваются молекулами воды с окружающей средой, что влияет на их морфологию и свойства. Все эти особенности так или иначе трудно контролировать в реальных условиях применения текстильных материалов, поэтому важно знать, как они могут влиять на поведение антенны, чтобы минимизировать любые нежелательные эффекты. Подробно влияние разных внешних факторов, которые необходимо учитывать, конструкции текстильных антенн и их структура рассмотрены в работе [10].

Датчики, носимые на теле человека, повышают эффективность работы и улучшают качество повседневной жизни за счет мониторинга движения, перемещения, физиологических показателей и окружающей среды пользователей в режиме реального времени [1-5]. Для получения данных, полученных с датчиков, непрерывно и удаленно с минимальным воздействием на пользователя, предпочтительно использовать антенный модуль, миниатюрный по размеру или гибкий, для беспроводной передачи данных [6,7]. Для достижения требований к комфорту носимой антенны текстильные материалы считаются наиболее перспективной альтернативой традиционной печатной плате из-за их гибкости, легкости, низкой стоимости и простоты интеграции в одежду [8-11]. Кроме того, некоторые специальные носимые антенны должны иметь хорошую ударопрочность и долговечность, особенно в экстремальных условиях, как например, пожары. Таким текстильным материалом, обладающим хорошей износостойкостью и исключительной прочностью, является арамидное волокно (намного прочнее обычных текстильных материалов), используемое в бронежилетах. Интеграция антенны в материал делает возможной бесшовную и прочную текстильную конструкцию антенны. Концепция трехмерной текстильной антенны была предложена в 2015 году, в этой структуре подложка и проводящие слои были плотно переплетены друг с другом, что обеспечивало антенне низкий риск расслоения, увеличивало устойчивость к механическим повреждениям, тем самым повышая долговечность текстильной антенны [12].

Данная антенна UWB имеет полосу пропускания −10 дБ не менее 500 МГц [13], имеет несколько уникальных преимуществ, таких как очень большая рабочая полоса пропускания, низкое энергопотребление и высокая скорость передачи данных. Это делает антенны UWB желательным выбором для нательного применения, особенно для использования в чрезвычайных ситуациях [14,15]. В этом исследовании была разработана и изготовлена антенна, интегрированная в трехмерные текстильные слои.

Проводящие части и изолирующая подложка антенны были изготовлены из медных / арамидных нитей соответственно. Были смоделированы и измерены основные электромагнитные свойства антенны, включая обратные потери, диаграмму направленности и усиление. Кроме того, было исследовано влияние изгиба на свойства излучения антенны с учетом того, что антенна будет применяться на изогнутых поверхностях.

Конструкция и изготовление антенны

Антенна, предложенная в этом исследовании, была спроектирована, охватывая диапазон от 3,1 до 10,6 ГГц с обратными потерями более 10 дБ. Конфигурация и структура предлагаемой антенны показана на рисунке 2.

Предлагаемая антенна была сделана с использованием трехмерного ткацкого станка; тканая структура состояла из трех групп нитей – основа, уток и Z-нити (скрепляющие всю структуру). Излучающая часть (сверху) изготовлена с использованием медных нитей поверх структуры. Частично покрытая заземляющая плоскость состояла из медных нитей в нижней части структуры. Подложка антенны состояла из трех слоев основных нитей и четырех слоев уточных нитей в середине структуры антенны. Вся структура антенны была плотно связана вместе группой Z-нитей, которые проходили через ось Z. Специальное расположение нитей сделало структуру не только гибкой, но и имеющей низкий риск расслоения. В Таблице 1 представлены параметры пряжи.

После изготовления текстильной структуры на краю излучающей части был припаян коаксиальный разъем для подачи сигнала.

Таблица 1. Параметры пряжи.

Пряжа	Плотность пряжи, кол-во нитей на дюйм	Толщина пряжи	
		Медь, мм	Арамидное волокно (Кевлар 129), масса в г на 10 000 м
Основа	18,4	0,3	1580
Уток	15,4	0,3	1580
Z-ось	18,4	-	445

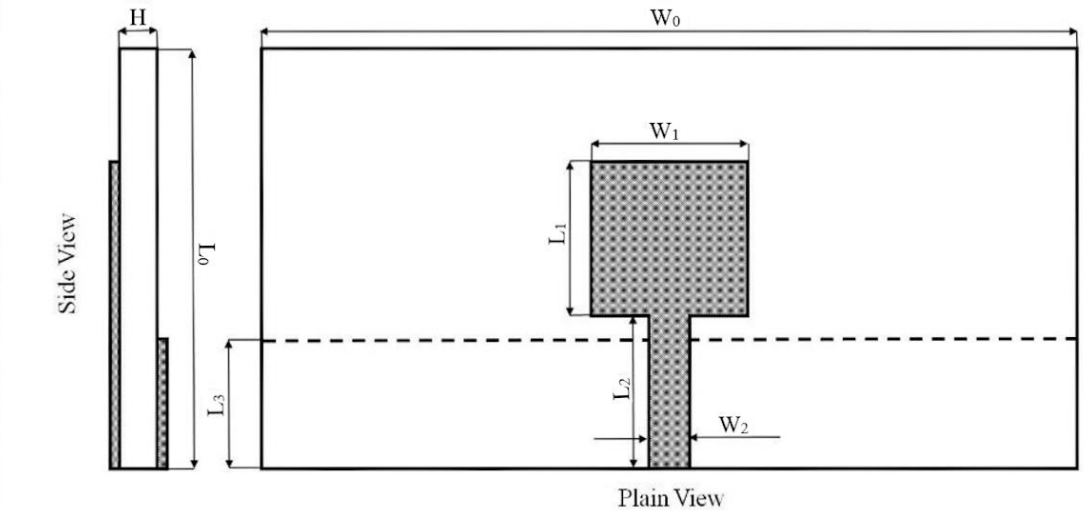

Figure 1. The configuration of the proposed antenna.
Table 1. The size parameters of the proposed antenna.

Parameters	L_0	W_0	L_1	W_1	L_2	W_2	L_3	H
Size (mm)	56.2	160	15.8	18.3	20.4	5.3	19	1.7

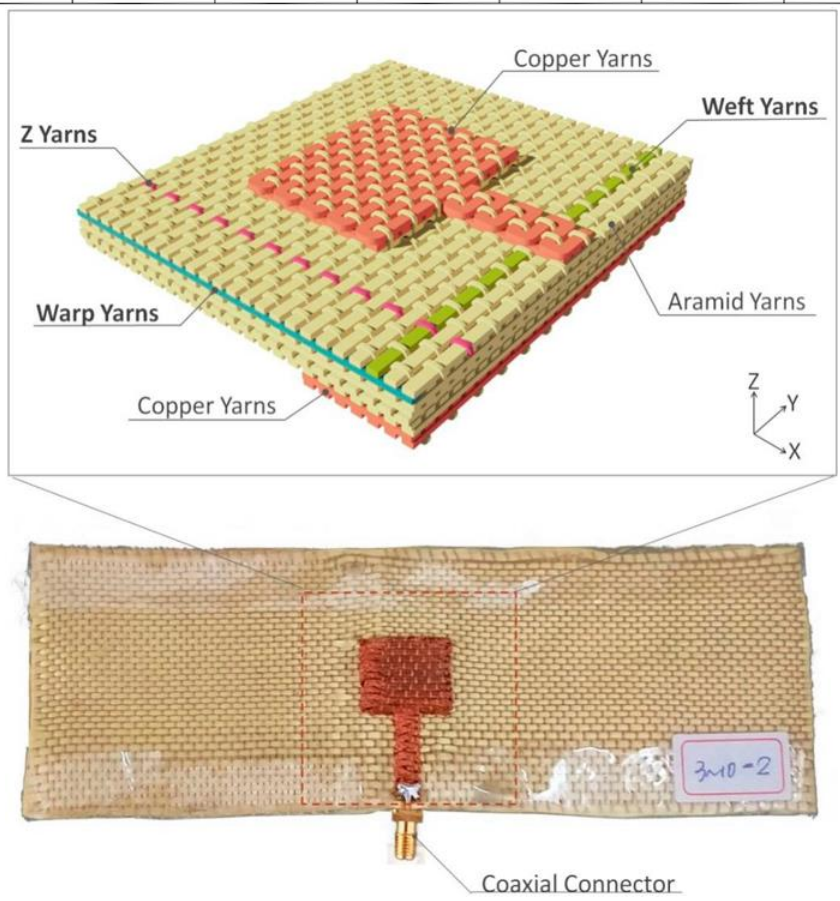

Рис. 2. Конфигурация текстильной трехмерной антенны.

Выводы:

1) Ток имел разное распределение на передней и задней поверхностях проводящего слоя, потому что трехмерная тканая антенна состояла из двух групп ортогонально расположенных нитей. Для линии, используемой для передачи сигнала, ток в основном концентрировался на поверхности внутренних нитей основы. Для участка излучения без заземляющей плоскости на задней стороне подложки, плотности тока были похожи на поверхности внутренних нитей основы и внешних нитей утка. Однако, зазоры между нитями основы были больше, чем зазоры между нитями утка в трехмерной тканой структуре. Поэтому внутренний слой и внешний слой участка излучения по-разному способствовали излучению антенны, а затем приводили к изменениям электромагнитных свойств. Распределение тока антенны изменялось на разных частотах.

2) Испытание на изгиб. Влияние кривизны на характеристики антенны было исследовано путем установки антенны на поверхность пенопластовых цилиндров с различными радиусами. Испытания на изгиб проводились на цилиндрах с радиусами от 5 до 25 см вдоль осей X и Y. Хотя изгиб по оси X показал большее влияние на обратные потери антенны, чем изгиб по оси Y, оба условия изгиба оказали небольшое влияние на полосу пропускания антенны. Кроме того, диаграммы направленности и коэффициенты усиления после изгиба варьировались в разумном диапазоне, что указывает на то, что антенна имела хорошее сопротивление влиянию изгиба [11].

1.2. Электро-текстиль, ткани

Следующая антенна была разработана с частотой 1,575 ГГц, которая была выбрана на основании выделенного спектра для устройств GPS-слежения и может использоваться для различных целей, как отслеживание пациентов, домашних животных, мониторинг здоровья или определение местонахождения военнослужащих во время поисково-спасательных операций. Все работы

по моделированию были выполнены с использованием комплексного 3D программного обеспечения (CST), а проверка результатов проводилась с помощью измерений на стенде и безэховой камере [54].

Ткань была изготовлена путем интеграции проводящих и непроводящих нитей. Проводящие медные нити (диаметром 0,14 мм) изначально были скручены с полиэфирными нитями с использованием крутильных машин. Процесс ткачества на рапирном ткацком станке Sulzer Textil G6300 (Sulzer, Winterthur, Switzerland); уток – 25 нитей/дюйм с использованием токопроводящих нитей; основа – 80 нитей/дюйм, полиэфирные нити (см. рис. 3-5)

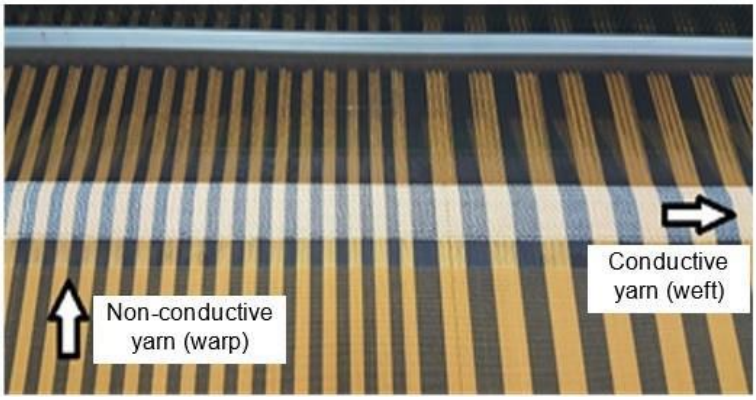

Рис. 3. Ткань, электро-текстиль. Основа – полиэфир (вертикальные нити), уток (горизонтальные нити) – смесь медных (83 %) и полиэфирных нитей (17 %).

(a) (b)

Рис. 4. Прядильно-крутильная машина (a) и ткацкий станок (b).

В конструкции текстильной антенны имеется два элемента: проводящий текстиль, как излучающий элемент (ткань, основа – 100 % полиэфир, уток – 83 %

медные и 17 % полиэфирные волокна; толщина 0.48 мм) и непроводящий текстиль в качестве подложки (100 % полиэфир).

Для анализа была выбрана прямоугольная антенна из-за симметричной геометрии, что упрощало проектирование, изготовление и анализ. На основе электрических свойств проводящего материала и диэлектрических характеристик полиэфирной подложки была спроектирована электро-текстильная антенна 1,575 ГГц, состоящая из прямоугольного излучающего элемента с заземляющей плоскостью. Интеграция верхнего излучателя (проводящий текстиль) и нижней заземляющей плоскости с диэлектрическим слоем (полиэстер) была выполнена с использованием специального клея для ткани, который нагревался с помощью горячего прессования во время сборки антенны, чтобы обеспечить прочное крепление слоев ткани.

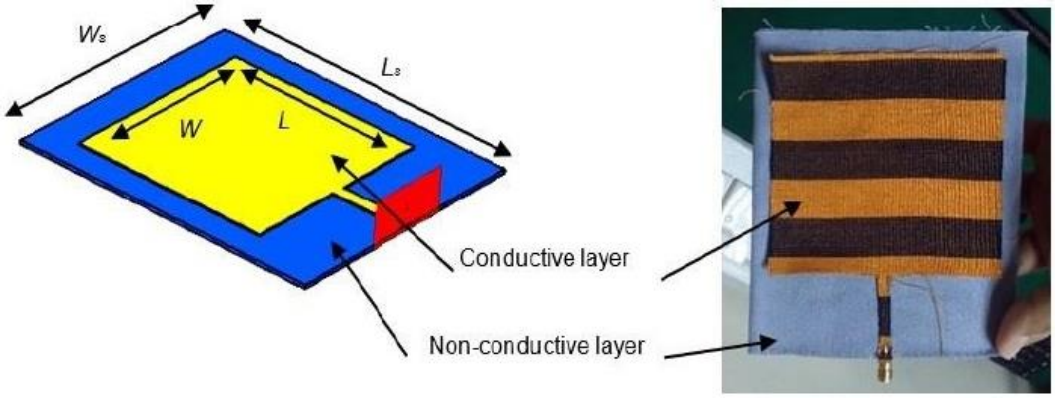

Рис. 5. Геометрия и структура прямоугольной
электро-текстильной антенны 1,575 ГГц.

Проведенные исследования показали хорошие результаты, анализ выявил и подтвердил причины ухудшения работоспособности антенны вблизи тела человека. Также, для проверки способности к отслеживанию прототип антенны был протестирован на испытательном стенде системы GPS-отслеживания. Чтобы продемонстрировать возможность приема, модуль GPS был интегрирован с данной антенной, работающей на частоте 1,575 ГГц и подключен к плате Arduino, в свою очередь подключенной к антенне Wi-Fi/3G для передачи данных на сервер. С сервера отображалось точное местоположение антенны. На основании данных, полученных на компьютере, носимая антенна GPS,

разработанная в исследовании, хорошо работала при приеме данных GPS без потери данных в течение требуемого интервала времени, что указывало на то, что технические характеристики антенны, с точки зрения ее резонансной частоты, импеданса и усиления, были достаточны, чтобы выступать в качестве важной подсистемы для устройства GPS-отслеживания.

1.3. Сетеполотна

Технология массового выпуска металлотрикотажных тканей в виде сетеполотен, связанных из специальной металлической проволоки, разработана инженерами-исследователями московского вуза – РГУ им. А.Н. Косыгина.

Ткани отличаются гибкостью, легкостью и прочностью. Они не переплетаются и не зацепляются друг за друга, свободно растягиваются и отличаются хорошим отражением электромагнитных волн.

Рис. 6. Сетеполотна, связанные из специальной металлической проволоки.

Подобные материалы широко применяются в крупноразмерных антеннах, которыми оснащаются спутники-ретрансляторы, а также в целях размещения различного оборудования на внешних поверхностях космических аппаратов. К примеру, параболические антенны из сетеполотен используются

на модификациях российских телекоммуникационных спутников семейства «Луч-5».

По словам руководителя проекта Никиты Заваруева, разработанный ими металлотрикотажный материал состоит из разных типов петель. За счет изменения их формы, а также способов соединения и размеров, достаточно легко можно менять прочность сетеполотен, отражающую способность и другие характеристики.

Также уточняется, что данная ткань выполняется из проволоки, имеющей толщину от 15 до 20 мм. При этом в основе самой проволоки лежат сплавы, включающие вольфрам, молибден и другие тугоплавкие металлы, а сверху проволока покрывается золотом для повышения отражающего эффекта. *(Ткани для антенн и космоса стали более совершенны. По сообщению пресс-службы РГУ им. А.Н. Косыгина, 11 Апр 2024 г.)*

1.4. Трикотаж. Радиочастотные антенны

Команда инженеров из Колумбийского университета представила проект «одеяла», которое соткано из простой пряжи и гибких тонких радиочастотных антенн. По их задумке, такая носимая электроника позволит в будущем облегчить связь тем, кто находится или путешествует в отдаленных местах.

Инженеры использовали свой опыт в области метаповерхностей – сверхтонких оптических компонентов, которые могут контролировать распространение света, – и недорогую масштабируемую технологию плоской вязки для создания антенн радиочастотной связи, которые легко переносить и развертывать. Выбор остановился на вязании и ткачестве. Исследователи применили новый подход к изготовлению гибких, легких метаповерхностей с сантиметровой длиной волны. Они использовали старую технику цветного вязания (жаккард) и применили коммерчески доступные металлические и диэлектрические нити для производства двух прототипов устройств с отражающей решеткой – линзы метаповерхности (металинзы) и устройства генерации вихревого пучка.

Рис. 7. Трикотажное полотно для радиочастотной антенны.

В технике жаккарда для создания узора используются два или более типов нитей для создания желаемого узора. Объединив текстильное производство и разработку антенн в единый процесс, команда оптимизировала процесс производства и устранила распространенные дефекты антенн. Группа первой адаптировала методы плоской вязки для встраивания антенн непосредственно в процесс производства с низкими затратами и высокой производительностью в промышленных масштабах.

Каждый из прототипов метаповерхностей с площадью основания около 1 квадратного метра был связан в течение 45 минут. Кроме того, устройства, полученные посредством такой вязки, выдерживали многократные стирки и испытания на растяжение.

Исследователи показали, что, когда металинза работает как приемник, она фокусирует падающую сантиметровую волну в узкое (дифракционно-ограниченное) фокусное пятно, а при работе в качестве передающей антенны она преобразует расходящееся излучение от рупорной антенны (обычный источник радиочастот) в волну с плоским волновым фронтом – высоконаправленный луч. Они также продемонстрировали, как выполнить более сложные задачи формирования волнового фронта: метаповерхность создает вихревой луч – луч с волновым фронтом в форме штопора. Из-за особого волнового фронта он может нести независимый целостный канал информации, а совместное использование

вихревого и луча с плоским волновым фронтом позволяет сделать канал связи в два раза эффективнее [12].

2. Вышивка по тканям / трикотажу металлизированными нитями

Широкое применение находят вышитые антенны на текстильной ткани, используемые на одежде людей, вовлеченных в систему мониторинга [15,16]. Для вышивки используются различные «нити»: выпускаемые коммерческими компаниями, как Amberstrand, состоящие из полимерных волокон, покрытых слоем серебра; MCEY, состоящие из медных нитей, покрытых серебром, встроенных в диэлектрик (полиэстер) и др. Такие антенны остаются работоспособными в пределах некоторого ограниченного диапазона частот.

3. Аддитивные технологии 3D печати по текстильным материалам

3.1. Печать металлами

Группа ученых Имперского колледжа Лондона разработала технологию 3D-печати металлами (золото, серебро, платина) по поверхности текстильных материалов, что позволило снизить затраты на изготовление антенн, сенсоров и проч. Этот метод можно использовать для встраивания во фрагменты тканей батареек, сенсоров, беспроводных передатчиков.

В перспективе новую технологию можно применить для производства недорогих устройств для медицинской диагностики, сенсорных наклеек для измерения степени загрязнения воздуха или «умной» одежды, отслеживающей здоровье пользователя.

В ранних исследованиях уже удавалось напечатать металлические элементы на ткани, однако в процессе на поверхность наносили слой пластика, что делало конструкцию хрупкой. Новый подход позволяет создавать металлические детали прямо на волокнах ткани. Сначала ткань покрывают микроскопическими частицами силикона, а затем погружают в раствор с ионами металла – эту технологию называют SIAM. Таким образом металл «пронизывает» ткань, нарастая на частицы силикона – бумага и ткань сохраняют гибкость

и способность поглощать воду. Эти свойства необходимы для работоспособности многих технологий, в частности, аккумуляторов и сенсоров, где ионы в растворах должны взаимодействовать с электронами металлов.

В качестве демонстрации ученые нанесли силиконовые чернила на образцы ткани вручную, однако они подчеркивают, что технологию можно масштабировать для обычных 3D-принтеров. Команда изготовила спиральные антенны из серебра на бумаге, которые можно применять для передачи данных, например, в бесконтактных платежных системах. Ученые также добавили к серебру цинк для создания аккумулятора и ряда сенсоров, включая сенсор на бумажной поверхности для диагностики генетических заболеваний. По словам исследователей, сенсоры на основе натуральной ткани будут дешевле и проще при хранении и транспортировке.

Команде удалось продемонстрировать, что спиральная антенна, изготовленная новым методом, стоит 0,001 доллара, по сравнению с 0,05 доллара при производстве традиционным способом. Ученые подали заявку на патент и занялись поиском промышленных партнеров. Следующим шагом станет применение нового метода в реальных проектах [11].

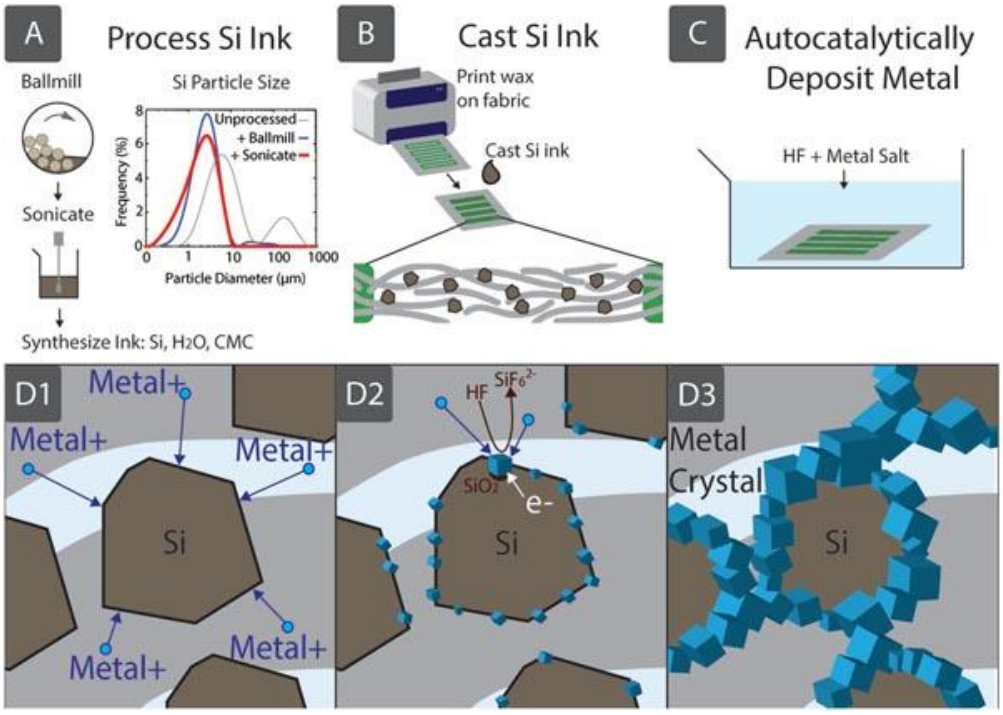

Рис. 8. Схема нанесения металлов на текстильный материал по технологии 3D-печати.

4. Печать токопроводящими пастами через сетчатые шаблоны (шелкография, трафаретная и ротационная печать).

Опубликовано много статей по проектированию, изготовлению и применению текстильных антенн. Много исследовательских работ направлено на получение антенн с меньшими размерами и улучшенными характеристиками. Были предложены различные формы, подложки, технологии. Одна из технологий, имеющих мощный потенциал для производства текстильных антенн – это трафаретная печать. К такому выводу пришел Хертлер С. в своих исследованиях. [17]

Для печати проводящих слоев использовались два разных типа чернил на основе серебра и исследовались эксплуатационные характеристики текстильных антенн и их устойчивость к стиркам. Работоспособность антенн оценивалась путем измерения коэффициента отражения после каждых пяти циклов стирки. [20]

Текстильная антенна состоит из электропроводящей части, электропроводящей заземляющей плоскости и непроводящей текстильной подложки. Для измерения коэффициента отражения разъем SubMiniature Version A (SMA) крепится с помощью электропроводящего клея на основе серебра к микрополосковой линии питания антенны.

Для исследований были выбраны два текстильных субстрата: смешанная ткань 20 %/80 % хлопок/полиэфир (CO/PES) и 100 % полиэфир (PES). Эти два материала были выбраны из-за их низкого процента восстановления влажности (MR) (таблица 2), что необходимо для стабильной работы антенны в условиях изменяющейся относительной влажности окружающей среды. [18,19]

Чтобы обеспечить достаточную толщину подложки антенны, использовалась сборка из нескольких слоев текстиля. Для подложки, изготовленной из CO/PES, четыре слоя текстиля были соединены клеем при нагревании; для подложки PES было объединено шесть слоев.

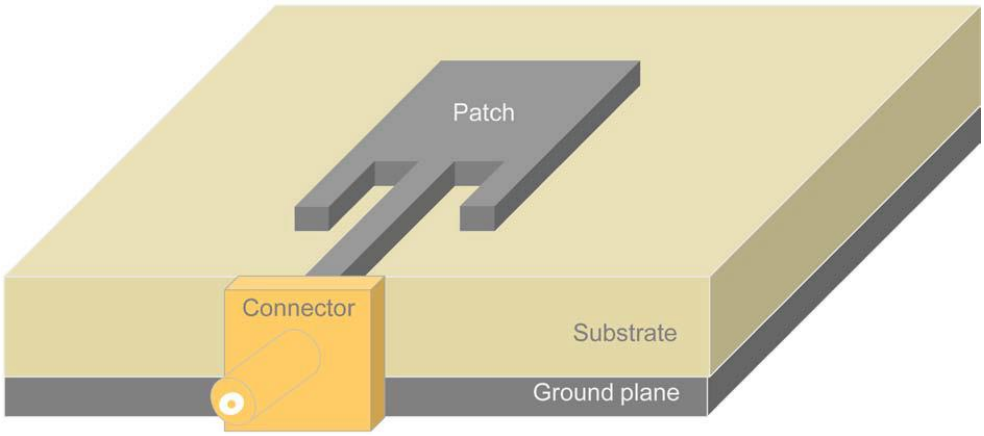

Рис. 9. Микрополосковая патч-антенна.

Таблица 2. Показатели восстановления влажности тканей разных типов.

Текстильный субстрат	Показатель восстановления влажности (MR), %	Толщина, мм	Вес (относительная плотность), г/м^2	Плотность пряжи		Тип переплетения
				Основа (нитей на см)	Уток (нитей на см)	
Хлопок / полиэфир	2,5	0,702	252	39	18	Саржа 4/1
Полиэфир	0,2	0,478	177	21	22	Гладь 1/1

Антенная часть на верхнем слое и заземляющая плоскость на нижнем были напечатаны методом трафаретной печати (рис. 9) проводящими чернилами на основе серебра, поскольку эта технология точно создает любой вид рисунка. Более того, это быстрый и экономически эффективный метод.

Трафаретная печать выполнялась на полуавтоматическом принтере Johannes Zimmer Klagenfurt – Mini MDF 482. Чернила продавливаются через узорчатую сетку на ткань цилиндрическим ракелем диаметром 15 мм. Сетка имеет толщину 115 мкм и отверстие сита 47 %.

Использовались две коммерчески доступные краски на основе серебра для трафаретной печати: DuPont (5025) от компании DuPont и Electrodag PF 410 от компании Acheson. В соответствии с рекомендациями производителей, эти краски возможно наносить на гибкие субстраты. Сухой остаток, температура фиксации, вязкость и другие параметры приведены в Таблице 3.

Для двух различных субстратов были разработаны две антенны, работающие в диапазоне 2,45 ГГц с помощью программного инструмента для 3D-электромагнитного (ЭМ) моделирования – Agilent’s 3D planar EM field solver.

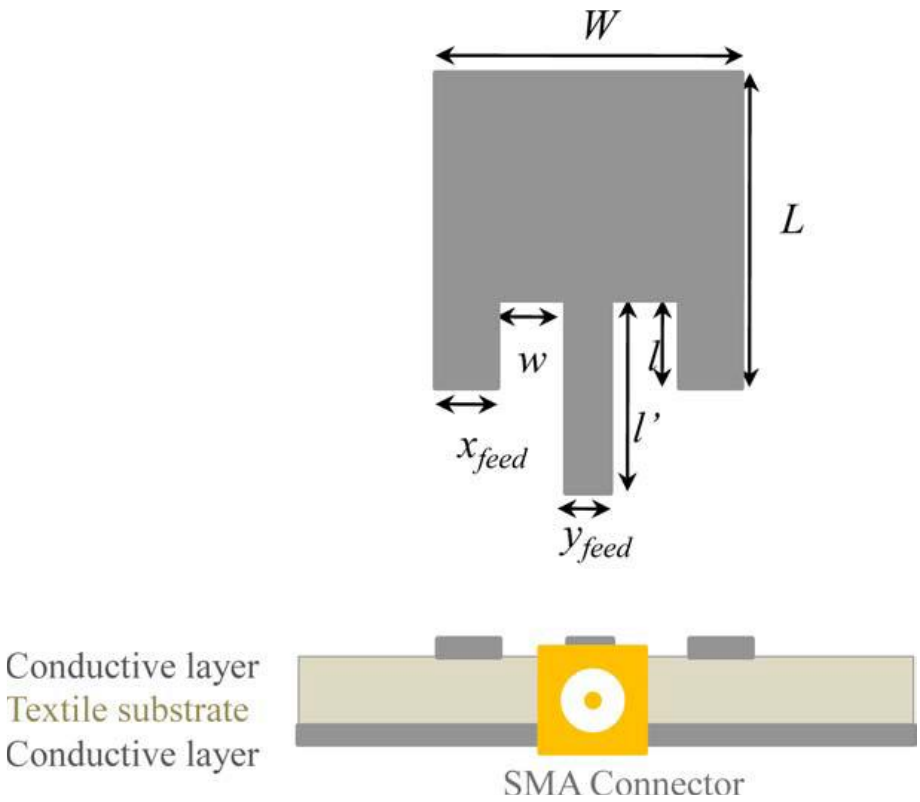

Рис. 10. Вид сверху и сбоку микрополосковой антенны с питанием.

Таблица 3. Сравнительная характеристика чернил разных производителей.

Тип чернил	Чернила DuPont	Чернила Electrodag
Сухой остаток, %	68-72	73.5-76
Условия фиксации при 120 ˚C	5-6 мин	15 мин
Сопротивление, Ω при 25 μm	0,012-0,015	<0.025
Вязкость, Pa.s	20-30	10-25
Смола	эпоксидная	полиэфирная
Размер частиц серебра, μm	≤2.5	≤3

Всего было изготовлено восемь прототипов антенн, в четырех антеннах использовалась подложка хлопок / полиэфир, остальные четыре антенны были напечатаны на полиэфирной подложке. Из каждой группы на двух антеннах в качестве проводящих чернил использовали чернила DuPont, тогда как на других Electrodag в качестве проводящих чернил для формирования антенной части и заземления.

Далее, из каждой группы одна антенна с DuPont и одна антенна с Electrodag в качестве проводящих чернил, были обернуты слоем термопластичного полиуретана от компании Epurex (толщина слоя 80 мкм) и опрессованы при температуре 160-170 °C.

Другие две антенны из каждой группы (снова одна с чернилами DuPont и одна с чернилами Electrodag) остались без покрытия.

Покрытие полиуританом должно было защитить проводящие участки во время процесса стирки, так как ожидалось ухудшение результатов (рис. 11).

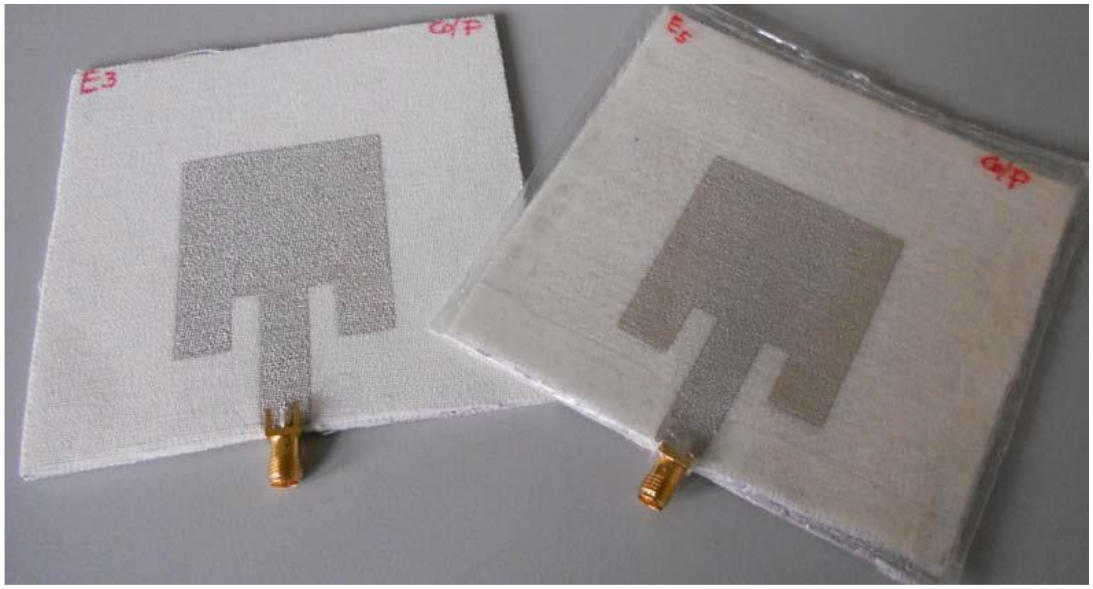

Рис. 11. Печатные антенны с токопроводящей краской;
слева – антенна без покрытия, справа – антенна с покрытием.

На основе проведенных экспериментов исследователи сделали вывод, что покрытие антенны эффективно защищает проводящие чернила от ухудшения и предотвращает расслоение из-за стирки. Покрытие остается эффективным до, как минимум, 20 циклов стирки. Однако некоторые антенны без покрытия оставались рабочими и после 20 циклов стирки, что означает, что процесс стирки не приводит к значительному ухудшению проводящих чернил. Основная проблема, обнаруженная в этом исследовании, заключалась в том, что после 15-го цикла стирки некоторые разъемы ослабли или даже полностью отсоединились от антенны из-за механического напряжения во время процесса стирки.

5. Нанесение металлсодержащих покрытий на текстильный субстрат (волокна / готовые ткани).

Для разработки текстильной антенны проводящая ткань должна удовлетворять перечисленным ниже требованиям; чем лучше ткань соответствует требованиям, тем лучше работает антенна.

∇ Низкое и стабильное электрическое сопротивление (≤1 Ом) ткани желательно для минимизации потерь.

∇ Сопротивление слоев должно быть однородным по всей площади антенны; другими словами, различия в сопротивлении должны быть небольшими.

∇ Ткань должна быть гибкой, чтобы антенна могла деформироваться.

∇ Эластичность ткани поддерживает деформационное поведение антенны.

Электрическое сопротивление ≤1 Ом является разумным выбором для проводящих тканей. С этой точки зрения можно было бы рекомендовать медную фольгу. Однако, такая фольга не обладает драпируемостью и эластичностью, что ограничивает ее использование в одежде [21].

Среди многих видов текстильных материалов для исследований, в соответствии с заявленными требованиями, выбраны 3 варианта:

1) Никель-платированная ткань. Толщина покрытия составляет около 250 нм.
2) Посеребренное трикотажное полотно [22].
3) Посеребренная-медно-никелевая платированная ткань [23].

5.1. Никель-платированная ткань

Хотя никель показывает отличную устойчивость к коррозии, никель-платированные ткани оказались неподходящими для использования в антеннах, поскольку покрытие было нанесено после процесса ткачества, на готовую ткань. Таким образом, волокна оказались не полностью покрыты там, где они пересекаются друг с другом. На рисунке 12 показана платированная ткань с неравномерным нанесением и схема поперечного сечения. Непокрытые участки можно легко распознать. В результате каждое отдельное волокно

не является непрерывно проводящим. Электрический ток не может течь вдоль одного волокна и, вместо этого, должен «перепрыгивать» от волокна основы к волокну утка и наоборот по очень небольшому перекрывающему покрытию пересекающихся волокон. Эти переходы от волокон к волокнам являются основной причиной сопротивления слоя около 5 Ом. Кроме того, измерения показали, что сопротивление слоя неоднородно по площади.

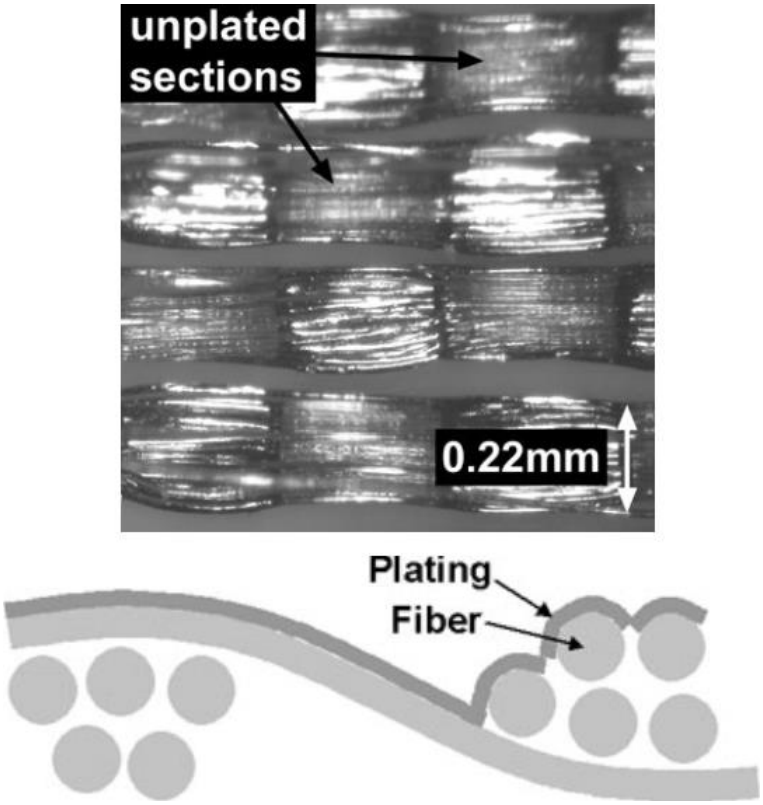

Рис. 12. Никель-платированная ткань. Схема поперечного сечения.

В вариантах 2 и 3 волокна были покрыты перед вязанием и ткачеством соответственно, поэтому в данных образцах сопротивление слоя намного лучше, как показано в Таблице 4, хотя все еще обусловлено в основном сопротивлением перехода от волокна к волокну. Для сравнения, в Таблице 4 также приведена эквивалентная толщина чистой серебряной фольги для получения равной проводимости с тканью.

Таблица 4. Параметры волокон.

Свойства	Трикотаж, вариант 2	Ткань, вариант 3
Толщина ткани	0,55 ± 10 %	0,15 мм
Пряжа, полимер	полиамид	полиамид
Пряжа /нить, толщина	0,35 мм	0,23 мм
Волокон в пряже	6	12
Вес	180 г/м^2	72 г/м^2
Покрытие / платировка	Ag	Ni / Cu / Ag
Сопротивление слоя	<1 Ω	0.02 Ω
Эквивалентная толщина, Ag	16.3 нм	815 нм

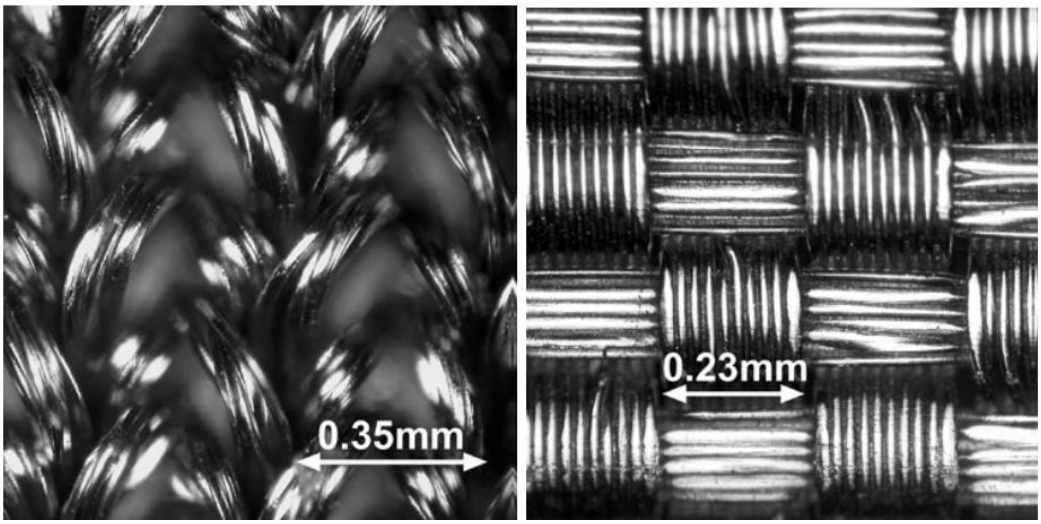

Рис. 13. Трикотажное полотно (слева) и платированная ткань (справа).

5.2. Трикотажное полотно с серебряным покрытием

Трикотажное полотно состоит из полностью покрытых полиамидных волокон. Учитывая, что это трикотаж, образец 2 является упругим, имеющим приблизительный модуль Юнга E = 150 кПа при удлинении более 30 %. Что касается механических свойств, то антенна из этого полотна является гибкой и ее можно легко интегрировать в одежду. Но с точки зрения производства, эластичность является недостатком, поскольку точное формирование, а также сборка антенны затруднены. Изготовленные формы антенн в конечном итоге достигают геометрической точности около ±0,5 мм. А перекосы и изгибы влияют на характеристики антенны и на сопротивление слоя из-за деформации. Но, в общем, этот материал удовлетворяет всем заявленным требованиям.

5.3. Ткань с покрытием серебро/медь/никель

По сравнению с трикотажным полотном, ткань отличается более низкой эластичностью из-за своей тканой структуры (см. рис. 13). В отличие от ткани варианта 1, волокна в варианте 3 покрываются перед ткачеством, что приводит к низкому электрическому сопротивлению (таблица 4). Модуль Юнга около 2,4 ГПа в основном определяется полиамидным материалом нити в ткани. Поэтому форма антенны может быть изготовлена точно, но изгиб такой антенны будет ограничен. Кроме того, края ткани имеют тенденцию легко распускаться. Но этот эффект можно минимизировать, используя различные методы производства. Такая ткань обладает лучшими электрическими свойствами среди трех вариантов образцов для создания антенн с геометрической точностью около ±0,15 мм.

6. Процесс сборки антенны

В процессе изготовления антенны, композиция проводящей антенной части с диэлектрической подложкой имеет решающее значение. Прежде всего, размеры проводящей части должны быть сохранены при прикреплении к подложке. Во-вторых, процедура прикрепления не должна влиять на электрические свойства, например, на сопротивление слоя. Рассмотрим четыре метода:

1) Жидкий текстильный клей (марка: Golden Fix).
2) Точечное нанесение проводящих клеев.
3) Пришивание.
4) Клеевые слои, которые активируются глажкой.

В связи с пропитыванием текстильного материала нанесение тонким равномерным слоем жидкого текстильного клея (способ 1) на проводящие ткани невозможно. В результате клей действует как изолятор проводящих нитей. И из-за неравномерного распределения клея электрическое сопротивление неоднородно и может увеличиваться в десять раз в определенных местах.

Точечное нанесение проводящего клея с расстоянием 1 см (способ 2) не увеличило сопротивление слоя, однако, механическая устойчивость была

значительно хуже по сравнению с текстильным клеем (способ 1). Во-вторых, точное прикрепление антенной накладки не было обеспечено с точки зрения сохранения геометрии. Проводящие клеи нельзя наносить по всей площади на текстильные изделия, поскольку эти типы клеев обычно жесткие и хрупкие.

Аналогично для сшивки (способ 3). В этом случае необходимо уделять внимание предотвращению деформации во время шитья. Во-вторых, расстояние между швами должно быть меньше 2 см, чтобы минимизировать образование складок. Складчатость соответствует неравномерным расстояниям между антенной накладкой и плоскостью заземления, что приводит к искажению характеристик антенны. Стежок проходит как через накладку, так и через плоскость заземления антенны. Электрические измерения выявили замыкания между антенной частью и заземляющей плоскостью, поскольку швейная игла вытягивала небольшие проводящие волокна из проводящей части через подложку и замыкала их с заземляющей плоскостью. Кроме того, шитье нельзя было использовать с подложкой из разделительной ткани, поскольку высокое давление шва сжимало подложку.

Лучшие результаты показывают клеевые слои (способ 4). Клей равномерно наносится тонким слоем на проводящую ткань при глажке. Более того, клей проникает только в поверхность проводящей ткани, так что сопротивление проводящего слоя и диэлектрическая проницаемость подложки не изменяются. Но важно сохранение геометрических размеров, необходимо контролировать при прикреплении проводящей антенной части к подложке. Трикотажное полотно особенно сложно, поскольку имеет тенденцию к скручиванию. Можно использовать временную стабилизацию жесткости полотна до прикрепления. Это делается путем нанесения водорастворимых аппретов на полотно. После проглаживания жесткой, проводящей ткани на подложке аппрет полностью растворяется и вымывается водой.

Как итог, получились текстильные антенны с точными формами, хорошей механической устойчивостью, а также стабильным и низким сопротивлением

слоя за счет использования клеевых слоев и водорастворимого аппрета вместе с подходящими проводящими тканями.

Стандартные методы проектирования антенн хорошо работают даже для текстильных подложек и проводящих тканей. Рассмотренные антенны не только обладают хорошими свойствами, но и просты в изготовлении. Они удовлетворяют спецификациям Bluetooth даже при изгибе до радиуса 37,5 мм. Выбор трикотажного или тканого проводящего текстиля для антенн зависит от конкретного применения и его предпочтительного поведения при деформации.

Следующее исследование 2008 года подтверждает полученные выше результаты. Прототипы текстильных антенн были изготовлены с использованием трех различных видов электро- текстиля: FlecTron®, Shieldit™ Super и Zelt. Эти материалы были выбраны из-за их низкого поверхностного сопротивления (0,10) на микроволновых частотах. Эти виды электро-текстиля, в основном, используются для экранирования. FlecTron® – это тонкая высококачественная нейлоновая рип-стоп ткань с медным покрытием, очень гибкая, легко кроится и сшивается. Zelt – это нейлоновая ткань с медно-оловянным покрытием. Наконец, ткань Shieldit™ Super также представляет собой прочную нейлоновую ткань с медно-оловянным покрытием. Кроме того, эта ткань имеет подложку с термоклеем, с помощью которой ее можно легко приклеить к подложке, что дает идеальный инструмент для обеспечения оптимального контакта между проводящей частью и подложкой [24].

Проводящие части в виде пластин FlecTron® и Zelt были наклеены на подложку и дополнительно прошиты для улучшения фиксации и для предотвращения изменения свойств подложки промежуточным воздушным зазором. Геометрия прямоугольника достаточно проста, чтобы ее можно было легко вырезать из электро-текстиля, однако, надо учитывать толщину нитей утка и основы, поскольку резать ткань можно только между двумя соседними нитями. Более того, точность геометрии влияет на характеристики антенны. Небольшое изменение этих размеров привело бы к сдвигу характеристик. Чтобы закончить прототип, на антенну был аккуратно припаян разъем SMA.

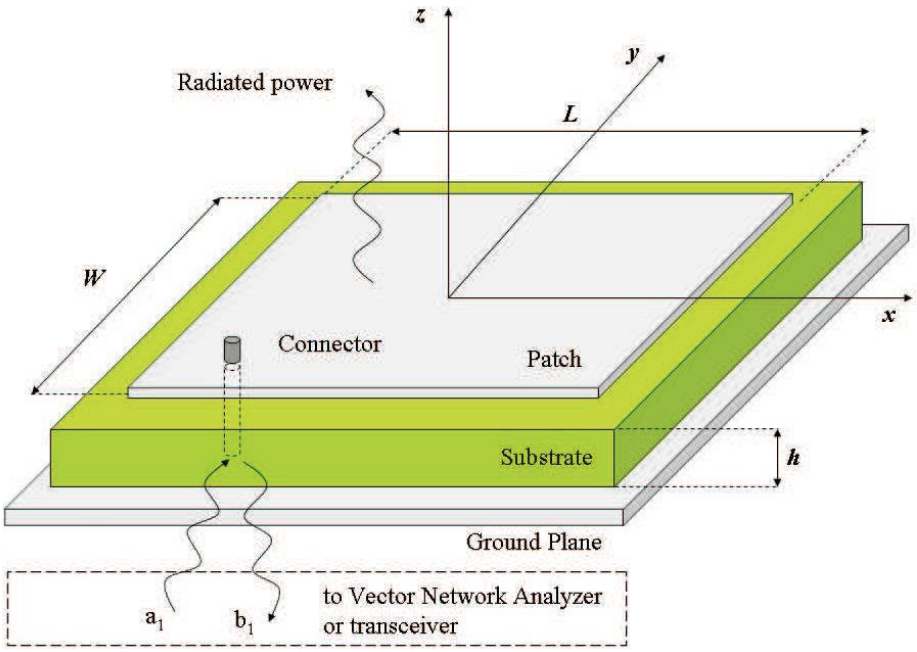

Рис. 14. Микрополосковая антенна.

Для оценки производительности текстильной антенны были проведены два типа измерений. Первоначально характеристики антенн измерялись с помощью векторного сетевого анализатора HP 5810 C, что дало первое представление о возможностях антенн с точки зрения коэффициента отражения мощности. После этого измерения проводились в безэховой камере, что дало дополнительную информацию об усилении, эффективности и поляризации. Поэтому использовались две идентичные текстильные антенны: одна антенна действовала как передатчик, другая как приемник.

Все три текстильные антенны показали полосу пропускания, которая значительно превысила требуемые 83,5 МГц в диапазоне ISM, что окажется полезным при использовании антенны в реальных условиях.

Заключение

Итак, рассмотрев разные варианты получения текстильных антенн, экспериментальные результаты, данные исследований можно сказать с уверенностью, что текстильные антенны могут применяться для беспроводного питания в широких сферах деятельности, демонстрируя высокую функциональность. Техника изготовления воспроизводима, технология доступна.

Литература

1. Bichara, R.M., Costantine, J., Tawk, Y. et al. A multi-stable deployable quadrifilar helix antenna with radiation reconfigurability for disaster-prone areas. Nat Commun 14, 8511 (2023). https://doi.org/10.1038/s41467-023-44189-9
2. 5000 years of textiles / Ed. by Jennifer Harris. – London : Brit. museum press in assoc. with Whitworth art gallery a. Victoria a. Albert museum, cop. 1993. – 320 с. ил., цв. ил., карт.; 28. – ISBN 0-7141-1715-3.
3. Marvin, C. When Old Technologies Were New: Thinking About Electric Communication in the Late Nineteenth Century. Oxford University Press, USA, 1990. https://doi.org/10.2307/1908721
4. Gere, C. and Rudoe, J. Jewellery in the Age of Queen Victoria: A Mirror to the World. British Museum Press, 2010.
5. «ELECTRIC GIRLS». The New York Times. 26 April 1884. Archived from the original on 12 November 2013. https://www.nytimes.com/1884/04/26/archives/electric-girls.html
6. Flood, Kathleen (11 April 2011). «The Original Creators: Diana Dew». VICE Media LLC. Archived from the original on 19 December 2011. Retrieved May 28, 2015. https://www.vice.com/en/article/the-original-creators-diana-dew/
7. Smith, P. Body Covering. Museum of Contemporary Crafts, the American Craft Council, New York, NY, 1968
8. Post, E. R.; Orth, M.; Russo, P. R.; Gershenfeld, N. (2000). «E-broidery: Design and fabrication of textile-based computing». IBM Systems Journal. 39 (3.4): 840–860. https://doi.org/10.1147/sj.393.0840 ISSN 0018-8670. S2CID 6254187.
9. Ye Kuang, Lan Yao, Sheng-Hai Yu, Xiu-Jun Fan, Yi-Ping Qiu. Design and Electromagnetic Properties of a Conformal Ultra Wideband Antenna Integrated in Three-Dimensional Woven Fabrics. Polymers 2018, 10, 861; https://doi.org/10.3390/polym10080861
10. Rita Salvado, Caroline Loss, Ricardo Gonзalves and Pedro Pinho. Textile Materials for the Design of Wearable Antennas: A Survey; Sensors 2012, 12, 15841-15857; https://doi.org/10.3390/s121115841

11. 3D-ПЕЧАТЬ ИЗ МЕТАЛЛА НА ТКАНИ ПОЗВОЛИТ ИЗГОТОВИТЬ НЕДОРОГИЕ АНТЕННЫ И СЕНСОРЫ Источник: https://www.3dpulse.ru/news/nauchnye-razrabotki-tehnologii/3d-pechat-iz-metalla-na-tkani-pozvolit-izgotovit-nedorogie-antenny-i-sensory/
12. Инженеры создали «одеяло» из сложных радиочастотных антенн Источник: https://habr.com/ru/news/862932/
13. Tsolis A. Embroidery and Related Manufacturing Techniques for Wearable Antennas: Challenges and Opportunities / Aris Tsolis, William G. Whittow,, Antonis A. Alexandridis, and J. (Yiannis) C. Vardaxoglou // Electronics. – 2014 – 3, pp. 314-338; https://doi.org/10.3390/electronics3020314
14. J. -S. Roh, Y. -S. Chi, J. -H. Lee, Y. Tak, S. Nam and T. J. Kang, «Embroidered Wearable Multiresonant Folded Dipole Antenna for FM Reception,» in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 9, pp. 803-806, 2010, https://doi.org/10.1109/LAWP.2010.2064281
15. Hertleer C. Design of planar antennas based on textile materials. (2009). pp. 125-137. ISBN 987-90-8578-297-1.
16. Hertleer C, Laere A. V, Rogier H, Van Langenhove L. Influence of Relative Humidity on Textile Antenna Performance. (2009).Textile Research Journal, 80: 177-183. https://doi.org/10.1177/0040517509105696
17. F. Declercq, H. Rogier and C. Hertleer, «Permittivity and Loss Tangent Characterization for Garment Antennas Based on a New Matrix-Pencil Two-Line Method,» in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 8, pp. 2548-2554, Aug. 2008, https://doi.org/10.1109/TAP.2008.927556
18. Kazani, F. Declercq, M. L. Scarpello, C. Hertleer, H. Rogier, D. Vande Ginste, G. De Mey, G. Guxho, L. Van Langenhove. PERFORMANCE STUDY OF SCREEN-PRINTED TEXTILE ANTENNAS AFTER REPEATED WASHING. AUTEX Research Journal, Vol. 14, No 2, June 2014 https://doi.org/10.2478/v10304-012-0049-x © AUTEX

19. ILocher, M. Klemm, T. Kirstein and G. Troster, «Design and Characterization of Purely Textile Patch Antennas,» in *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, vol. 29, no. 4, pp. 777-788, Nov. 2006, https://doi.org/10.1109/TADVP.2006.884780
20. Statex Produktions & Vertriebs GmbH, Bremen, Germany, P130 technical data sheet. http://www.statex.de
21. Statex Produktions & Vertriebs GmbH, Bremen, Germany, Nora technical data sheet. http://www.statex.de
22. Carla Hertleer, Anneleen Tronquo, Hendrik Rogier and Lieva Van Langenhove. The Use of Textile Materials to Design Wearable Microstrip Patch Antennas. *Textile Research Journal* 2008 78: 651. https://doi.org/10.1177/0040517507083726 http://trj.sagepub.com/content/78/8/651
23. 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/B978-0-08-100574-3.00024-2
24. G. A. Deschamps, «Microstrip microwave antennas,» in Third USAF Symp. on Antennas, 1953.
25. M. Tentzeris, A. Georgiadis and L. Roselli, «Energy Harvesting and Scavenging [Scanning the Issue],» Proceedings of the IEEE, vol. 102, no. 11, pp. 1644-1648, Nov. 2014. https://doi.org/10.1016/j.csi.2021.103568
26. C. B. Dietrich, K. Dietze, J. R. Nealy and W. L. Stutzman, «Spatial, polarization, and pattern diversity for wireless handheld terminals,» in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 49, no. 9, pp. 1271-1281, Sept. 2001, https://doi.org/10.1109/8.947018
27. K. Finkenzeller, RFID Handbook Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication, Wiley, 2010. ISBN: 978-04-7069-506-7

28. 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
29. 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
30. F. Declercq, A. Georgiadis and H. Rogier, «Wearable aperture-coupled shorted solar patch antenna for remote tracking and monitoring applications,» in Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Rome, Italy, Apr. 2011. ISBN: 978-88-8202-074-3
31. ITU, «Radio Regulations,» 2012. [Online]. Available: http://www.itu.int/pub/R-REG-RR-2012
32. 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
33. 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
34. 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
35. Smart Textiles and Their Applications. http://doi.org/10.1016/B978-0-08-100574-3.00026-6 Copyright © 2016 Elsevier Ltd.

36. 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

37. 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

38. R. Moro, S. Agneessens, H. Rogier and M. Bozzi, «Wearable textile antenna in substrate integrated waveguide technology,» Electronics Letters, vol. 48, no. 16, pp. 985-987, Aug. 2012. https://doi.org/10.1049/el.2012.2349

39. 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

40. 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

41. 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

42. 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

43. L. Vallozzi, W. Vandendriessche, H. Rogier, C. Hertleer and M. Scarpello, «Design of a protective garment GPS antenna,» Microwave and Optical Technology Letters, vol. 51, no. 6, pp. 1504-1508, 2009. https://doi.org/10.1002/mop.24372
44. 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
45. 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
46. 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
47. 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
48. 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
49. 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

50. 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
51. Analysis on the Effects of the Human Body on the Performance of Electro-Textile Antennas forWearable Monitoring and Tracking Application. Nurul Huda Abd Rahman, Yoshihide Yamada and Muhammad Shakir Amin Nordin. Materials 2019, 12, 1636; https://doi.org/10.3390/ma12101636. www.mdpi.com/journal/materials

Для цитирования:

Вицукаев А.В., Олехнович И.А., Фролов А.Ю. Текстильные антенны. Часть 1. Способы и технологии производства. // Журнал Радиоэлектроники. – 2026. – №. 5. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.5.14