АННОТАЦИЯ

диссертационной работы на тему:
«**Исследование и разработка носимых микрополосковых антенн на текстильной подложке**»,
представленной на соискание степени доктора философии PhD по специальности 8D06201 – «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

Нуржаубаева Гульсая Сакеновна

Актуальность темы исследования

В Казахстане цифровизация и развитие телекоммуникационных технологий относятся к числу основных приоритетов государственной политики. Значимость этого направления подтверждается принятием Правительством Республики Казахстан Концепции цифровой трансформации, развития отрасли информационно-коммуникационных технологий и кибербезопасности на 2023–2029 годы, а также объявлением 2026 года Годом цифровизации и искусственного интеллекта. В условиях цифровой трансформации особое значение приобретает технология Интернета вещей (IoT). В настоящее время IoT применяется при контроле промышленных процессов, управлении транспортными системами, в здравоохранении, городской инфраструктуре и других отраслях.

Одним из динамично развивающихся направлений технологии IoT является развитие носимых (body-centric) устройств, предназначенных для непрерывного контроля параметров человека и окружающей среды. В медицине такие устройства используются для дистанционного мониторинга физиологических показателей, таких как частота сердечных сокращений, артериальное давление и температура тела. В сфере спорта они позволяют регистрировать параметры, связанные с физической активностью человека. В системах умного города и безопасности носимые устройства могут применяться для оперативной связи, контроля местоположения, обеспечения промышленной и социальной безопасности.

Одним из основных компонентов, определяющих качество и надёжность беспроводной связи носимого IoT-устройства, является антенна. Она преобразует электрические сигналы в электромагнитные волны и осуществляет обратное преобразование при приёме, обеспечивая беспроводную связь устройства с внешней сетью. В настоящее время широкое внедрение носимых IoT-решений сдерживается проблемами сохранения стабильности характеристик антенны и выполнения требований электромагнитной безопасности при её размещении вблизи или непосредственно на теле человека.

Возникновению этой проблемы способствует несколько факторов. Прежде всего, при расположении антенны вблизи тела человека часть излучаемой энергии поглощается биологическими тканями. Поэтому необходим контроль удельного коэффициента поглощения (УКП) и его сопоставление с предельными значениями, установленными международными требованиями электромагнитной безопасности: 1,6 Вт/кг на 1 г ткани по FCC и 2 Вт/кг на 10 г ткани по ICNIRP. Вторая важная проблема связана с интеграцией антенны в одежду или аксессуары. В этом случае требуется применение гибких текстильных материалов, диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь которых отличаются от параметров жёстких диэлектрических оснований, широко используемых в микрополосковых антеннах: относительная диэлектрическая проницаемость тканей, применяемых в носимых антеннах, как правило, лежит в пределах 1,1–1,9, тогда как у жёстких оснований она составляет от 2,2 до 12. Низкая диэлектрическая проницаемость может способствовать расширению полосы пропускания, однако мягкая ткань плохо сохраняет форму, что затрудняет обеспечение стабильности геометрии антенны.

В процессе эксплуатации носимые антенны подвергаются также различным механическим воздействиям, к которым относятся изгиб, растяжение и сжатие. Такие деформации приводят к изменению геометрии антенны. Вследствие этого резонансная частота смещается, а основные рабочие характеристики могут ухудшаться. Из видов деформации в настоящей работе исследовался изгиб.

Анализ литературы позволяет выделить два нерешённых вопроса. Во-первых, текстильные микрополосковые антенные решётки исследованы достаточно широко, однако авторы используют различные конструкции и методики измерений, вследствие чего прямое сопоставление влияния различных тканей на характеристики антенны невозможно.

Во-вторых, направленные антенны Яги–Уда с коэффициентом усиления 8–12,4 dBi реализованы на жёстких подложках либо на металлических основаниях с резонансными полостями, что исключает их интеграцию в одежду, тогда как известные текстильные направленные антенны обеспечивают не более 5,3–5,45 dBi. Существующие решения не сочетают одновременно полноразмерную топологию Яги–Уда, высокий коэффициент усиления и полностью текстильное исполнение.

В качестве рабочей частоты разрабатываемых антенн выбрана частота 2,45 ГГц. Эта частота относится к ISM-диапазону, предназначенному для промышленных, научных и медицинских целей. Одной из основных причин такого выбора является совместимость данного диапазона с технологиями беспроводной связи, широко применяемыми в IoT-устройствах, такими как Wi-Fi, Bluetooth и Zigbee. Кроме того, ISM-диапазон не требует лицензирования. Длина волны в свободном пространстве составляет около 122 мм, а резонансная

длина патча на джинсовой ткани — около 48 мм, что позволяет свободно разместить элемент на одежде. Повышение частоты уменьшает размеры антенны, но увеличивает потери в тканях тела. Поэтому данный диапазон рассматривается как подходящее решение при проектировании носимых антенн для различных видов IoT-приложений.

Настоящее диссертационное исследование направлено на решение перечисленных научно-технических проблем. В работе разработаны две текстильные микрополосковые антенны для IoT-приложений, работающие на частоте 2,45 ГГц: двухэлементная линейная антенная решётка и антенна Яги–Уда. Устойчивость решётки к изгибу измерена на прототипе, антенны Яги–Уда — оценена методом моделирования. Для обеих антенн рассчитаны значения УКП при размещении вблизи тела человека и проведено их сопоставление с нормами FCC и ICNIRP.

Цель исследования

Целью работы является установление закономерностей влияния электрофизических свойств подложек на параметры антенны в ходе разработки носимых микрополосковых антенн на текстильной основе, работающих на частоте 2,45 ГГц.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Проанализировать и определить методы разработки носимых микрополосковых антенн.
2. Установить закономерности влияния электрофизических свойств текстильных подложек на параметры антенны путём разработки двухэлементной антенной решётки.
3. Разработать и оптимизировать антенну Яги–Уда на текстильных подложках.
4. Исследовать устойчивость разработанных антенн к механическим деформациям и оценить их электромагнитную безопасность.
5. Исследовать и сравнительно оценить электродинамические характеристики двух топологий разработанных носимых антенн.

Объект и предмет исследования

Объект исследования — носимые микрополосковые антенны на текстильной подложке.

Предмет исследования — закономерности влияния геометрических параметров антенны, электрофизических свойств подложки, изгиба и воздействия тела человека на электродинамические характеристики антенны и удельный коэффициент поглощения.

Методы исследования

Для решения поставленных задач использовались следующие методы:

– полноволновое численное моделирование с параметрической оптимизацией в программном комплексе CST Studio Suite 2024;

– изготовление прототипов на подложках из фетра, джинсовой ткани, полиэстера и хлопчатобумажной ткани с проводящими слоями из токопроводящей ткани и медной ленты;

– измерение коэффициента отражения S_{11} прототипов векторным анализатором цепей NanoVNA 2024; диаграмма направленности, коэффициент усиления и радиационная эффективность определялись только методом моделирования;

– моделирование влияния изгиба на цилиндрических поверхностях радиусом 55–90 мм на резонансную частоту, согласование и диаграмму направленности с экспериментальной проверкой по S_{11};

– оценка электромагнитной безопасности антенны путём численного моделирования удельного коэффициента поглощения на воксельной модели тела человека в CST и проверки его соответствия нормам ICNIRP и FCC.

Научная новизна проведённых исследований

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующих результатах:

1. На основе исследования двухэлементной антенной решётки и антенны Яги–Уда на различных текстильных материалах установлены закономерности влияния электрофизических свойств текстильных подложек на характеристики носимых микрополосковых антенн.

2. Впервые предложена топология носимой микрополосковой антенны Яги–Уда, все элементы которой размещены на слое текстильной подложки, обеспечивающая широкое излучение и высокий коэффициент усиления.

Основные положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие основные положения:

Положение 1. Коэффициент усиления и радиационная эффективность (КПД) двухэлементной антенной решётки на текстильной подложке зависят не от материала проводящего слоя, а от материала подложки, поэтому при взаимной замене проводящих материалов характеристики излучения антенны сохраняются.

Положение 2. Предложенная топология антенны Яги–Уда, все элементы которой размещены на слое текстильной подложки, разработанная без многослойных структур и переходных отверстий, обеспечивает коэффициент усиления 8,3–8,7 dBi в ISM-диапазоне 2,45 ГГц при сохранении гибкости.

Положение 3. Закономерность влияния относительной диэлектрической проницаемости текстильной подложки на характеристики носимых микрополосковых антенн не зависит от топологии: при увеличении ε_r с 1,45 до 1,9 и у двухэлементной решётки, и у антенны Яги–Уда направленность и

коэффициент усиления снижаются, а главный лепесток диаграммы направленности расширяется.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы определяется возможностью непосредственного применения разработанных носимых текстильных микрополосковых антенных конструкций (линейной антенной решётки и антенны Яги–Уда) в области медицины, в системах служб безопасности и спасения, в системах умного города и спортивного мониторинга, а также при проектировании IoT-устройств. Установленные закономерности влияния текстильных материалов антенны, механической деформации и электромагнитной безопасности на её характеристики формируют практическую основу для обоснованного выбора материалов и геометрии антенны. Внедрение результатов настоящей работы подтверждается актом внедрения результатов научно-исследовательских работ от 9 сентября 2025 года, выданным Малайзийским институтом морских инженерных технологий (UniKL MIMET, г. Лумут, Малайзия). Согласно указанному акту, научные результаты и технические решения по повышению коэффициента усиления микрополосковых антенн внедрены в учебный процесс института и используются в лекционных и лабораторных занятиях. Результаты диссертационной работы могут быть в дальнейшем использованы в рамках соответствующих научных проектов по тематике электроники.

Соответствие направлениям развития науки и государственным программам

Работа соответствует приоритетам государственной политики Республики Казахстан в области цифровизации, определённым Концепцией цифровой трансформации, развития отрасли информационно-коммуникационных технологий и кибербезопасности на 2023–2029 годы, утверждённой постановлением Правительства Республики Казахстан от 28 марта 2023 года № 269.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением классических аналитических соотношений теории микрополосковых антенн, моделированием в апробированном комплексе CST Studio Suite с контролем сеточной сходимости, изготовлением физических прототипов и измерением их коэффициента отражения калиброванным векторным анализатором цепей, а также публикацией результатов в рецензируемых изданиях.

Личный вклад автора в получении научных результатов

Все оригинальные результаты, представленные в диссертации, в том числе расчёт геометрических параметров антенн, электродинамическое моделирование в программном комплексе CST Studio Suite, изготовление прототипов,

проведение экспериментальных измерений и сравнительный анализ полученных результатов, выполнены автором лично или при его непосредственном участии.

Апробация работы

Доклад «A review of the multilayered microstrip antennas for IoT applications», содержащий основные результаты и методы представленного в диссертации исследования, был сделан на XII Международной научно-технической конференции «Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование» (г. Алматы, 20–21 октября 2022 г.), а доклад «Comparative Study of Textile Based Wearable Antenna Designs for IoT Applications» — на международной конференции IEEE SIST (г. Астана, 2026 г.).

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих научных изданиях: обзорная статья «Аналитический обзор многослойной микрополосковой антенны Яги-Уда для приложений Интернета вещей (IoT)» в журнале «Научные труды ВИИРЭиС» (2022); статья «A review of the multilayered microstrip antennas for IoT applications» в материалах XII Международной научно-технической конференции (2022); статья «Characterization of high impedance of multilayer coplanar waveguide transmission line design for integration with nanodevices» в журнале Eastern-European Journal of Enterprise Technologies (2022); статья «Evaluation of high frequency behavior of the coplanar waveguide transmission line for integration with self-switching nanodevice» в журнале «Вестник Алматинского университета энергетики и связи» (2022); статья «Design of the Wearable Microstrip Yagi-Uda Antenna for IoT Applications» в журнале International Journal on Communications Antenna and Propagation, IRECAP (2024); статья «The Development and analysis of a wearable textile Yagi-Uda antenna design for security and rescue purposes» в изданиях НАН РК (2024); статья «Comparative Study of Textile Based Wearable Antenna Designs for IoT Applications» в материалах конференции IEEE SIST (2026); коллективная монография «Интеллектуальные телекоммуникационные решения для сетей 5G/6G и Smart City в условиях ультраплотной городской среды» (Алдашева Л.С., Амирова А.С., Тусупов А.Д., Нуржаубаева Г.С., Әбдіраман Ә.С., издательство «Дарын», Алматы, 2026); статья «Performance Evaluation of Wearable Antenna Arrays for IoT Applications in Smart City» в журнале International Journal of Antennas and Propagation (2026); обзорная статья «Wearable Microstrip Antennas for IoT: A Comprehensive Review of Application Areas, Textile Materials, and Body-Centric Design Techniques» в журнале «Вестник Алматинского университета энергетики и связи» (2026). Публикации включают работы в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus (процентили 47–63 %), а также в изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан. Всего по теме диссертации и смежным вопросам опубликовано 10 научных

трудов, в том числе 3 статьи в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus, 4 статьи в изданиях, рекомендованных КОКСНВО МНВО РК, 2 доклада в материалах международных конференций и 1 коллективная монография.

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка научных трудов, списка использованных источников и приложения. Объём работы составляет 109 страниц, включая 42 рисунка и 13 таблиц; список использованных источников содержит 123 наименования.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены цель и задачи работы. Определены объект и предмет исследования, сформулированы научная новизна и положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе автора, апробации работы, практической значимости и публикациях.

В первой главе описаны электрофизические свойства текстильных материалов и основные области применения носимых микрополосковых антенн для технологий IoT, на основе литературных данных проведён обзор видов текстильных материалов и технологий их изготовления. Проанализированы электрофизические свойства использованных в исследовании текстильных и проводящих материалов, рассмотрены закономерности их влияния на электродинамические характеристики антенны. Кроме того, проведён обзор существующих носимых антенн для IoT-систем и обоснован выбор используемых в исследовании топологий антенн.

Во второй главе изложена общая методика проектирования антенн. Обоснован выбор способа питания излучающих элементов, приведены аналитические соотношения для расчёта геометрических параметров излучателя и линии питания. Сформулированы количественные критерии оценки характеристик антенны (коэффициент отражения, коэффициент стоячей волны по напряжению и эффективность излучения). Также предложен обобщённый алгоритм проектирования и параметрической оптимизации конструкции антенны в программном комплексе CST Studio Suite.

В третьей главе рассмотрены работа и результаты по разработке и оптимизации двухэлементной линейной антенной решётки на текстильной подложке. Сначала рассчитываются основные геометрические параметры решётки. Затем в среде CST Studio Suite проводятся электродинамическое моделирование и параметрическая оптимизация шести конфигураций, образованных сочетаниями трёх текстильных подложек (фетр, джинсовая ткань, полиэстер) и двух проводящих материалов (токопроводящая ткань, медная лента). Результаты моделирования сопоставляются со значениями S_{11}, измеренными векторным анализатором цепей NanoVNA. Кроме того, исследуются характеристики решётки при изгибе с радиусами 55–90 мм и

рассчитывается удельный коэффициент поглощения на воксельной модели тела человека.

В четвёртой главе приведены работа и результаты по разработке и оптимизации микрополосковой антенны Яги–Уда, выполненной на полностью текстильной подложке. Определяются геометрические параметры активного элемента, рефлектора и директоров, и в среде CST Studio Suite проводится электродинамическое моделирование конфигураций на трёх подложках (полиэстер, джинсовая ткань, хлопчатобумажная ткань). Расчётные результаты проверяются по данным измерений S_{11}. Устойчивость антенны к изгибу и удельный коэффициент поглощения на воксельной модели тела человека оцениваются по методике третьей главы.

В пятой главе двухэлементная линейная антенная решётка и антенна Яги–Уда сопоставляются по направленности, коэффициенту усиления, ширине главного лепестка и радиационной эффективности. Показано, что при увеличении относительной диэлектрической проницаемости подложки с 1,45 до 1,9 у обеих топологий направленность и коэффициент усиления снижаются, а главный лепесток расширяется, т. е. закономерность влияния подложки не зависит от топологии.

В заключении обобщены основные результаты диссертационной работы и показано, что цель исследования достигнута. Подведены итоги решения поставленных задач, сформулированы основные научные и практические результаты работы. Намечены также перспективные направления дальнейшего исследования и совершенствования текстильных антенн для IoT-приложений.

В приложении приведён акт внедрения результатов научно-исследовательской работы, выданный Малайзийским институтом морских инженерных технологий (UniKL MIMET).