

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

На правах рукописи

Дмитриева Виктория Викторовна

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ
ПОСТРОЕНИЯ НАТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ И ПИКОСОТ ДЛЯ КОСТЮМОВ
ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ**

2.2.15 Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук
Волков Артём Николаевич

Санкт-Петербург – 2026

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СВЯЗИ В ОБЛАСТИ СЕТЕВЫХ ВСЕЛЕННЫХ.....	14
1.1 Современное состояние исследований в области сетевых вселенных.....	14
1.2 Анализ концепции перехода к сетям связи 2030.	19
1.3 Сетевая вселенная как инфокоммуникационная среда последующих поколений сетей	25
1.4 Цифровые двойники	28
1.5 Международная стандартизация в области технологий костюмов телеприсутствия, цифровых двойников и сетевых вселенных	32
1.6 Костюмы телеприсутствия в качестве новых пользовательских устройств.	35
1.6.1 Использование пикосот для обеспечения радиодоступа костюмов телеприсутствия	36
1.6.2 Беспроводные нательные сети (WBAN).....	37
1.6.3. Эксплуатационные ограничения беспроводных нательных сетей для костюмов телеприсутствия	39
1.6.4 Назначение и область применения стандарта IEEE 802.15.6	40
Выводы.	42
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С АВАТАРОМ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ В СЕТЕВОЙ ВСЕЛЕННОЙ НА ОСНОВЕ ДАТЧИКОВ ЭМГ.....	44
2.1 Модель сигналов и помех нательной сети на основе датчиков электромиографии.....	44
2.1.1 Метод выделения движений пользователя в костюме телеприсутствия	44

2.1.2 Сигнал электромиограммы: особенности.....	48
2.1.3 Метод обработки ЭМГ-сигнала для управления аватаром.....	51
2.2 Сравнение адаптивных алгоритмов	53
2.2.1 Алгоритм LMS.....	55
2.2.2 Алгоритм NLMS	58
2.2.3 Алгоритм VSS-NLMS	59
2.2.4 Разработанный двухкомпонентный алгоритм	60
2.4. Сравнение с существующими методами	63
2.4.1. Сравнительные критерии методов	63
2.4.2. Анализ преимуществ разработанного метода.....	64
Выводы.	65
ГЛАВА 3. МОДЕЛЬ КОСТЮМА ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ И МЕТОД ОРГАНИЗАЦИИ БЕСПРОВОДНЫХ КАНАЛОВ НАТЕЛЬНОЙ СЕТИ КОСТЮМА ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАПОВЕРХНОСТИ.....	66
3.1 Модель пользователя в костюме телеприсутствия на основе цилиндрической системы координат.....	66
3.2 Модель радиоканала вблизи тела пользователя	69
3.3 Модель радиоканала пользователя в костюме телеприсутствия с внешней БС.	72
3.4 Особенности излучателей WBAN.	73
3.5. Методы организации каналов нательной сети.....	75
3.6 Анализ структуры метаматериала для костюмов телеприсутствия	79
3.7 Моделирование и анализ ячейки метаматериала для костюма телеприсутствия на частоте 5 ГГц.....	84
Выводы	92

ГЛАВА 4. МОДЕЛЬ И МЕТОД ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ В КОСТЮМЕ ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ С АВТОНОМНЫМИ СЕТЕВЫМИ РОБОТАМИ.....	94
4.1 Существующие направления исследований и разработки международных стандартов в области автономных сетевых роботов.	95
4.2 Модель подключения пользователя в костюме телеприсутствия к сетевым роботам.....	99
4.3 Методы кластерной организации сети сетевых роботов	102
4.4 Задача оптимального маршрута сетевого робота.	110
4.5 Выбор алгоритма оптимизации маршрута сетевого робота.....	112
4.6 Результаты моделирования.	116
Выводы	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	120
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ	133

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований. Развитие телекоммуникационных систем привело к возможности подключения к сети пользователя практически из любой точки мира. В некоторых странах развитие произошло скачкообразным способом, что может говорить о высокой скорости развития и внедрения новых технологий в данной области.

Переход к новым поколениям сетей связи постоянно способствовало увеличению скорости передачи данных, предоставлению новых сценариев и концепций услуг. Например, концепция сетей 5G/IMT-2020 предполагает поддержку высокоскоростной мобильной связи с высокой степенью надежности и малой задержкой передачи данных, а также формирование и внедрение технологии Интернета вещей.

Развитие концепции Интернета вещей о взаимосвязи цифровых объектов с физическими способствовало развитию новых цифровых сред и сетевых вселенных. Концепция сетевых вселенных формирует совершенно новое представление пользователя о взаимодействии друг с другом и с цифровой средой. Одним из ключевых составляющих новых технологий взаимодействия являются цифровые двойники (аватары) пользователей. Кроме того, уже сформированы концепции и типы сетевых вселенных.

В настоящее время ведется разработка нормативно-технических документов и уже существуют международные стандарты, направленные на развитие сетевых вселенных. Одним из главных документов является Резолюция 105 принятая в рамках Всемирной Ассамблеи Электросвязи (ВАСЭ-24) поощряющая и укрепляющая процессы стандартизации в данной области.

Новая концепция технологий связи предполагает разработку перспективных технических устройств. Для взаимодействия с цифровым аватаром пользователя предложена концепция пользовательского оборудования – костюм телеприсутствия. В документах Международного Союза Электросвязи (МСЭ) костюм телеприсутствия фигурирует в роли примера пользовательского

устройства. Костюм телеприсутствия совершенно новая технология, обеспечивающая полное погружение пользователя в цифровую среду.

Таким образом, одним из перспективных направлений развития услуг является внедрение иммерсивных технологий. К иммерсивным технологиям относятся голографические коммуникации, системы дополненной реальности или тактильный Интернет с малой задержкой.

Концепция формирования перспективных сетей 6G/IMT-2030 предполагает повсеместное внедрение совершенно новых технологий и расширение предоставляемых услуг. Если ранее поколения связи были преимущественно направлены на увеличение скорости передачи данных и расширение подключенных пользовательских устройств, в сетях шестого поколения меняется инфраструктура взаимодействия в целом. Предполагается комплексная интеграция средств связи и вычислительных ресурсов с использованием агентов искусственного интеллекта (ИИ).

Использование ИИ-агентов предполагает включение в будущие сети распределенные интеллектуальные функций в сетевой инфраструктуре и на абонентских устройствах для управления ресурсами и адаптации параметров передачи данных. Такой переход указывает на новый этап развития инфокоммуникационных технологий.

В этой связи возникает ряд научных задач, посвященных развитию новых технологий в области сетевых вселенных в том числе. Это в первую очередь уменьшение общей задержки передачи и обработки данных для синхронизации движений пользователя и цифрового аватара. Важным остается необходимость обеспечения и поддержки высокого уровня качества связи, предъявляемого в сетях 6G/IMT-2030. Также необходимо определение новых архитектурных решений и способов организации натальных сетей костюма телеприсутствия. Поскольку элементы костюма телеприсутствия взаимодействуют непосредственно с пользователем. При движении пользователя условия распространения радиоволн непрерывно изменяются. Деформация элементов костюма и влияние окружающих объектов могут привести к снижению уровня принимаемого сигнала. В этой связи

необходима разработка методов повышения отношения сигнал/шум в беспроводном канале. Поскольку эти характеристики непосредственно оказывают влияние на восприятие пользователя.

Степень разработанности темы. Развитие новых технологий в области телекоммуникаций и связи посвящено много научных работ отечественных и зарубежных авторов. В том числе развитию сетей пятого и перспективных поколений с внедрением новых алгоритмов оптимизации.

Среди работ отечественных и зарубежных ученых можно выделить работы В.М. Вишневого, К.Е. Самуйлова, А.Е. Кучерявого, Е.А. Кучерявого, А.И. Парамонова, А.Н. Волкова, А.С.А. Мутханны, Е.И. Глушанкова, С.Н. Степанова, В.Г. Карташевского, В.О. Тихвинского, Б.С. Гольдштейна, В.К. Сарьяна, А.С. Ковтуненко, М.А. Сиверса, Т.М. Татарниковой, М.С. Степанова, Abdelhamied A Ateya, Dush Nalin Jayakody, A.Abd El Latif, Mohammad Hammoudeh, Latva-Aho M.

В области сетевых вселенных и их приложений научных работ пока еще не так много, но уже можно отметить исследования А.Е. Кучерявого и его научной школы у нас в стране, а также работы профессора I.F. Akyildiz за рубежом.

Работы отмеченных авторов внесли весомый вклад в развитие будущих систем телекоммуникаций, включая направления архитектуры сетей, управления сетевыми ресурсами, граничных вычислений, услуг телеприсутствия, математическому моделированию и оптимизации ресурсов инфокоммуникационных технологий.

Работы ученых позволили существенно продвинуться в развитии перспективных технологий в том числе в направлении будущих технологий связи.

Объект исследования. Сети связи пятого и последующего поколений

Предмет исследования. Модели и методы предоставления услуг телеприсутствия на основе натальных сетей, в том числе при использовании костюмов телеприсутствия.

Решаемая научная задача. Разработка моделей и методов построения натальных сетей и пикосот, обеспечивающих передачу и обработку сигналов

электромиограмм пользователя в костюме телеприсутствия в условиях сетей пятого и последующих поколений.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является разработка моделей и методов построения нательных сетей и пикосот для передачи и обработки сигналов электромиограмм пользователя в костюме телеприсутствия на основе адаптивных алгоритмов и нечеткой кластеризации.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- 1) Анализ существующих исследований в области сетей связи шестого поколения, в частности нательных сетей в костюмах телеприсутствия
- 2) Анализ существующих тенденций в области международной стандартизации, включая рекомендаций МСЭ по сетевым вселенным, костюмам телеприсутствия как интерфейса между сетевыми вселенными и пользователями
- 3) Анализ существующих методов уменьшения взаимного влияния помех в нательных сетях для предоставления услуг телеприсутствия
- 4) Разработка модели и метода взаимодействия с аватаром в метавселенной на основе нательной сети ЭМГ-датчиков с обработкой сигналов электромиограммы пользователя
- 5) Разработка модели костюма телеприсутствия и метода организации беспородных каналов нательной сети с использованием миниатюрных ячеек метаповерхности
- 6) Разработка модели и метода организации связи в пикосоте группы костюмов телеприсутствия с использованием сетевых роботов-ретрансляторов

Научная новизна. Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

- 1) Предложен метод взаимодействия пользователя с аватаром метавселенной, отличающаяся от известных тем, что команды управления формируются на основе ЭМГ сигналов, прошедших адаптивную фильтрацию двухшаговым LMS алгоритмом с коэффициентом

корреляции 0.82 и соотношением сигнал/шум 20.38 дБ; доказано, что такой подход обеспечивает снижение влияния артефактов движений при сохранении информативных компонентов сигналов ЭМГ.

- 2) Предложена модель костюма телеприсутствия и метод организации беспроводных каналов отличающиеся от известных тем, что в качестве элементов управления полем использованы метаповерхности. При этом разработанная миниатюрная ячейка метаповерхности позволяет учитывать кривизну подложки равной 30 мм с сохранением характеристик беспроводных каналов связи костюма телеприсутствия на частоте 5 ГГц.
- 3) Предложена модель сети и метод организации связи в пикосоте при взаимодействии пользователей в костюмах телеприсутствия, отличающиеся от известных тем, что в качестве ретрансляторов использованы сетевые роботы. Предложено совместное применение нечёткой кластеризации и муравьиного алгоритма для адаптивного выбора траектории мобильной пикосоты, обслуживающей группу костюмов телеприсутствия, с учётом перехода пользователей между кластерами и требований к качеству связи и обеспечивающих при заданных параметрах радиуса зоны обслуживания сетевого робота усредненное значение покрытия выше на 5.8%.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии аппарата адаптивной фильтрации ЭМГ-сигналов за счёт введения двухшагового алгоритма LMS с переменным шагом адаптации, учитывающим характеристики и динамику ЭМГ-сигналов при движениях пользователя.

Сформулирована и решена задача построения беспроводных каналов нательной сети для костюма телеприсутствия при использовании метаповерхности с сохранением характеристик каналов, что расширяет теоретический аппарат проектирования и моделирования нательных сетей в условиях 6G/IMT-2030.

Сформулирована и решена задача оптимизации траектории движения робота-ретранслятора, что расширяет теоретический аппарат моделирования

мобильных малых сот (пикосот) в сетях шестого поколения, в частности для услуг телеприсутствия.

Практическая значимость работы состоит в том, что предложенный алгоритм может быть реализован в виде программного или аппаратно-программного модуля для обработки ЭМГ-сигналов.

Предложены модель и метод, который позволяет учитывать расположение сенсоров на костюме телеприсутствия с учетом физических особенностей пользователей. Предложенные решения могут быть использованы при проектировании костюмов телеприсутствия и других нательных коммуникационных систем.

Разработан метод позволяющий рассчитывать траекторию мобильной пикосоты, сопровождающей группу пользователей в костюмах телеприсутствия, с обеспечением заданных требований к качеству связи (задержка, SINR).

Реализация результатов работы.

Полученные в диссертационной работе результаты внедрены в рамках выполнения работ для Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации по научному и экспертно-аналитическому обеспечению функций администрации связи Российской Федерации (АС России) в части международно-правовой защиты интересов Российской Федерации в области электросвязи и радиосвязи в виде предложений (вкладов) от имени АС России в Сектор стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи (МСЭ-Т).

В ООО «НТЦ РАССВЕТ» при разработке инструментов моделирования специализированной версии платформы «Аврора: Многоцелевая платформа имитационного моделирования и прототипирования системного уровня для разработки протоколов, оборудования и сетей связи».

При чтении лекций и проведении практических занятий по курсам «Самоорганизующиеся сети», «Современные проблемы науки в условиях перехода к сетям шестого поколения (6G)» и «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» в СПб ГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.

Методология и методы исследования. Исследования, выполненные в данной диссертационной работе, основаны на теории массового обслуживания, математической статистике, цифровой обработке сигналов. Имитационное моделирование производилось с использованием среды MATLAB и специализированного специального комплекса Ansys HFSS.

Основные положения, выносимые на защиту.

- 1) Метод взаимодействия с аватаром в метавселенной на основе натальной сети ЭМГ-датчиков с адаптивной обработкой сигналов электромиограммы с помощью адаптивного двухкомпонентного алгоритма с переменным шагом позволяющим учитывать динамику пользователя, а также снизить влияние артефактов движений пользователя при сохранении полезного сигнала ЭМГ с коэффициентом корреляции 0.82.
- 2) Модель костюма телеприсутствия на основе цилиндрической системы координат и метод организации беспроводных каналов натальной сети с использованием миниатюрных ячеек метаповерхности, позволяющей учитывать кривизну подложки равную 30 мм, с сохранением характеристик беспроводных каналов связи на частоте 5 ГГц
- 3) Модель и метод организации связи в пикосоте группы костюмов телеприсутствия, отличающийся от известных тем, что в качестве БС используются мобильные роботы-ретрансляторы, следующие по оптимальному маршруту, определяемому по алгоритму АСО с учетом характеристик каналов связи и обеспечивающих при заданных параметрах радиуса зоны обслуживания сетевого робота, усредненное значение покрытия выше на 5.8%

Степень достоверности и апробация результатов. Степень достоверности результатов диссертационной работы обоснована выбором апробированного математического аппарата теории связи, математической статистики и теории вероятностей, теории оптимизации, а также метаэвристических алгоритмов и результатами имитационного моделирования. При разработке моделей и методов

учитывались положения стандартов IEEE 802.15.6, определяющих особенности функционирования беспроводных сетей на теле человека, включая положения концепции перспективных сетей 5G/IMT-2020 и 6G/IMT-2030, а также широким спектром публикаций и выступлений как на российских, так и на международных научных конференциях

Апробация результатов исследования. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научно-технических конференциях: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2024). Материалы XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции. СПбГУТ (Санкт-Петербург, 2024); на 9-й Международной конференции по перспективным сетям и распределённым системам *International Conference on Future Networks and Distributed Systems* (Дубай, ОАЭ, 2025); научно-технической конференции (НТК ППС) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича «Перспективы развития инфокоммуникаций и телекоммуникаций» (2025); Международной конференции *International Conference on Soft Computing: Theories and Applications* (Индия, публикация в сборнике Cham: Springer Nature Switzerland, 2025); Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио, 2026; Международная конференция *Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications* (DCCN, ИПУ РАН – Москва, 2026), в рамках Workshop on Agentic AI and Digital Twins for Secure IoT-Enabled Smart Cities конференции The 23rd ACS/IEEE International Conference on Computer Systems and Applications (Шарджа, ОАЭ).

Публикации по теме диссертации. По теме работы опубликовано 9 работ, из них 4 статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК Министерства высшего образования и науки Российской Федерации; 2 статьи в рецензируемых изданиях, входящих в международные базы данных SCOPUS и WoS; 2 статьи в других изданиях; 1 свидетельство о результатах интеллектуальной деятельности.

Соответствие специальности. Работа соответствует пунктам 1, 2, 3, 7, 8, 9, 18 паспорта специальности 2.2.15 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

Личный вклад автора. Результаты теоретических и экспериментальных исследований получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит основная роль при постановке и решении задач, а также обобщении полученных результатов.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СВЯЗИ В ОБЛАСТИ СЕТЕВЫХ ВСЕЛЕННЫХ

В первой главе на основе анализа технологий связи в области сетевых вселенных, устройств, в частности, характеристик и функционирования костюмов телеприсутствия, выделены особенности таких сетей и систем. Определены перспективные направления развития и обосновывается актуальность решаемых задач, а также осуществляется общая постановка задачи диссертационного исследования.

1.1 Современное состояние исследований в области сетевых вселенных

Развитие телекоммуникационных сетей характеризуется улучшением технологий связи и новыми сценариями их применения. Одним из активно развивающихся направлений последнего десятилетия считалось внедрение технологий Интернета вещей (Internet of things (IoT)). [110-111]. Данные технологии реализуют услуги сетей связи для взаимодействия объектов физического мира с объектами виртуального мира и к 2026 году уже используется повсеместно. Концепция Интернета вещей способствовала к формированию новой инфраструктуры «умных» городов, обеспечивающей функционирование интеллектуальных транспортных систем, мониторинг безопасности и здоровья людей и др.

Дальнейшее развитие технологий Интернета вещей и сетей связи привело к совершенно новой концепции – сетевых вселенных. Концепция цифровых вселенных объединяет физические объекты с помощью цифровых двойников.

В этой связи с развитием данного направления предложены новые услуги сетей связи. Услуги и приложения метавселенных могут быть реализованы за счет взаимосвязанного множества информационно-коммуникационных технологий.

Таким образом, переход к технологиям сетевых вселенных предвещает новую эру сетей и услуг. Поэтому внедрение с совершенно новыми услугами и сценариями, а также изменение взаимодействия пользователей в коммуникационной среде ведет к необходимости анализа и разработке решений в данной области.

Ввиду всего выше сказанного рассмотрим развитие технологий, ориентированных на формирование у пользователя ощущения полного погружения в цифровую среду и нахождения в виртуальном/цифровом или удалённом пространстве в режиме реального времени. [28-30] Новые технологии помимо простой видеоконференцсвязи, стремятся воспроизвести особенности тактильного восприятия, обеспечивая более насыщенный и реалистичный эффект присутствия.

Для взаимодействия с цифровым миром определены новые иммерсивные (от англ. *immersive* – погружение) технологии, включающие тактильный интернет, системы голографической связи, расширенной и виртуальной реальности, позволяющие формировать у пользователя эффект присутствия в удалённой или виртуальной среде за счёт одновременного воздействия на зрительные, слуховые и тактильные ощущения, а также за счёт передачи силовых и кинематических характеристик взаимодействия. [45, 42, 43, 44,27]

В наши дни основными видами передачи данных являются аудио и видео сигналы. В качестве основного направления развития сетей перспективных поколений сформирована концепция перехода от пятого поколения (5G) к шестому (6G), которая ориентированна на развитие и внедрение иммерсивных приложений для использования в широком доступе. [36, 37, 38,39]

Между тем в отличие от предыдущих поколений развитие концепции связи шестого поколения (6G), характеризующейся новыми, иммерсивными приложениями, предъявляет значительно более строгие требования к надёжности и задержке, а также к скорости передачи данных, безопасности и работе в режиме реального времени.

Пользовательским оборудованием являются шлемы виртуальной реальности, воздействующие на органы слуха и зрения человека. Также группы инженеров и

ученых в рамках научных исследований разработали костюмы телеприсутствия, позволяющие передавать тактильные и силовые воздействия, а также обеспечивать двустороннее взаимодействие пользователя с удалённой средой.

Костюм телеприсутствия представляет собой сложную систему, реализующую сверхплотную носимую сеть из большого числа датчиков и устройств, размещённых на теле пользователя. Для погружения в цифровую среду необходимо обеспечить непрерывный сбор кинематической информации пользователя (положение, изменение тела в пространстве) в режиме реального времени. Также необходимо обеспечить управление массивами модулей обратной связи (силовых, тепловых и др.).

На сегодняшний день существует ряд костюмов для погружения в цифровую сетевую вселенную. Одним из первых описаний костюма телеприсутствия как интерфейса взаимодействия «пользователь – цифровой аватар» можно считать разработки, выполненные в лаборатории СПбГУТ «MEGANETLAB 6G», где костюм телеприсутствия рассматривается как носимый интерфейс с бортовой сетью и средствами обратной тактильной и силовой связи. [2, 40, 41] К зарубежным разработкам можно отнести костюмы фирм: Tesla Suit, Senso Suit, Perception Neuron 3, OWO Skin Haptic Suit. Костюмы телеприсутствия ориентированы на разные области применения, включая медицинский мониторинг, спорт, а также индустрию игр.

В зависимости от целевого назначения и области применения костюмы отличаются техническими характеристиками. Каждый костюм оснащён массивом датчиков, предназначенных для регистрации движений пользователя и воспроизведения тактильных ощущений и силовой обратной связи.

Несмотря на уже созданные костюмы телеприсутствия остается ряд нерешенных технологических задач, связанных как с сетевой составляющей, так и с конструктивными особенностями носимых устройств.

Для достижения требуемого качества обслуживания (QoS/QoE) и субъективного качества восприятия необходима дальнейшая доработка архитектуры костюмов, протоколов связи и алгоритмов обработки сигналов.

Одним из ключевых показателей качества является общая задержка от момента действия пользователя до воспроизведения цифровым аватаром. Суммарная задержка складывается на разных участках линии передачи [1]:

$$N_L = D_P + D_Q + D_T + D_{PR} \quad (1)$$

Где D_P – задержка обработки сигнала, D_Q – задержка постановки в очередь, D_T – задержка передачи (определяется размером пакета и скоростью передачи данных) и D_{PR} – задержка распространения (зависит от расстояния между узлами и скорости распространения электромагнитной волны в среде).

Такое разложение позволяет учитывать вклад каждого компонента задержки при проектировании сетей телеприсутствия и иммерсивных сервисов (приложений).

Для сетей будущих поколений (6G, IMT-2030), ориентированных на поддержку тактильного интернета и иммерсивных услуг [3-4], международные рабочие группы и стандартизирующие организации указывают предельно допустимые значения суммарной задержки на уровне порядка 1 мс [5]. Необходимость ультрамалой задержки связаны с требованиями к техническим системам, обеспечивающим взаимодействие в режиме реального времени, которые зависят от задействованных органов чувств человека. Дело в том, что взаимодействие с технической системой пользователю кажется естественным только в том случае, если обратная связь системы адаптирована к скорости реакции человека. Например, при отображении движений пользователя на мониторе или в очках дополненной реальности асинхронность между действиями пользователя и реакцией виртуальной среды приводит к визуальному запаздыванию. Такие задержки ухудшают качество восприятия и скорее всего вызовут у пользователя дискомфорт.

Таким образом, задача разработки новых архитектур сетей, механизмов распределения ресурсов и алгоритмов обработки сигналов, позволяющих

минимизировать совокупную задержку на всех участках и её вариативность (джиттер), является актуальной задачей.

При проектировании носимых устройств таких как костюмы телеприсутствия необходимо учитывать анатомические особенности тела человека и изменение электромагнитных характеристик среды вблизи тела пользователя и при его движении.

Исходя из этих требований, формулируются следующие задачи в диссертационной работе:

1. Анализ существующих исследований в области сетей связи шестого поколения, в частности нательных сетей в костюмах телеприсутствия
2. Анализ существующих тенденций в области международной стандартизации, включая рекомендаций МСЭ по сетевым вселенным, костюмам телеприсутствия как интерфейса между сетевыми вселенными и пользователями
3. Анализ существующих методов уменьшения взаимного влияния помех в нательных сетях для предоставления услуг телеприсутствия
4. Разработка модели и метода взаимодействия с аватаром в метавселенной на основе нательной сети ЭМГ-датчиков с обработкой сигналов электромиограммы пользователя
5. Разработка модели костюма телеприсутствия и метода организации беспородных каналов нательной сети с использованием миниатюрных ячеек метаповерхности
6. Разработка модели и метода организации связи в пикосоте группы костюмов телеприсутствия с использованием сетевых роботов-ретрансляторов

1.2 Анализ концепции перехода к сетям связи 2030.

За последние несколько десятилетий сети связи претерпели динамичные и сложные изменения. Эволюционное развитие сетей связи на протяжении развития всегда сопровождалось ростом числа пользователей и объёма трафика в каждом десятилетии (рис 1).

Сети мобильной связи первого поколения (1G) берут начало 1980-х годов и использовали аналоговую передачу только для голосовых услуг. Переход от аналоговых систем 1G к цифровым 2G обеспечил массовую доступность голосовой связи и SMS-услуг; введение 3G позволило реализовать мобильный доступ к данным, а 4G мобильный широкополосный доступ с возможностью пакетной передачи данных и предоставлением мультимедийных сервисов.

Развёртывание 5G/IMT-2020 способствовало формированию и внедрению концепции Интернета вещей. В перспективных системах 6G/IMT-2030 предполагается помимо роста пропускной способности и качества предоставляемых услуг, расширение классов (видов) предоставляемых услуг. Сети 6-го поколения в первую очередь направлены на интеграцию сетей “земля-воздух-космос”, что, впрочем, и повлияло на их название - интегрированные сети. Если в предыдущих поколениях улучшались технические характеристики, переход к сетям шестого поколения обеспечит естественное внедрение технологий искусственного интеллекта: от простых моделей нейросетей до сетей агентов ИИ, конвейеров моделей ИИ. Такое представление обозначает новую эру развития телекоммуникационных услуг. [112]

В перспективных системах возможно, что коммуникации среди ИИ-агентов, а также взаимодействие аватаров будут превалировать над другими сферами и услугами.

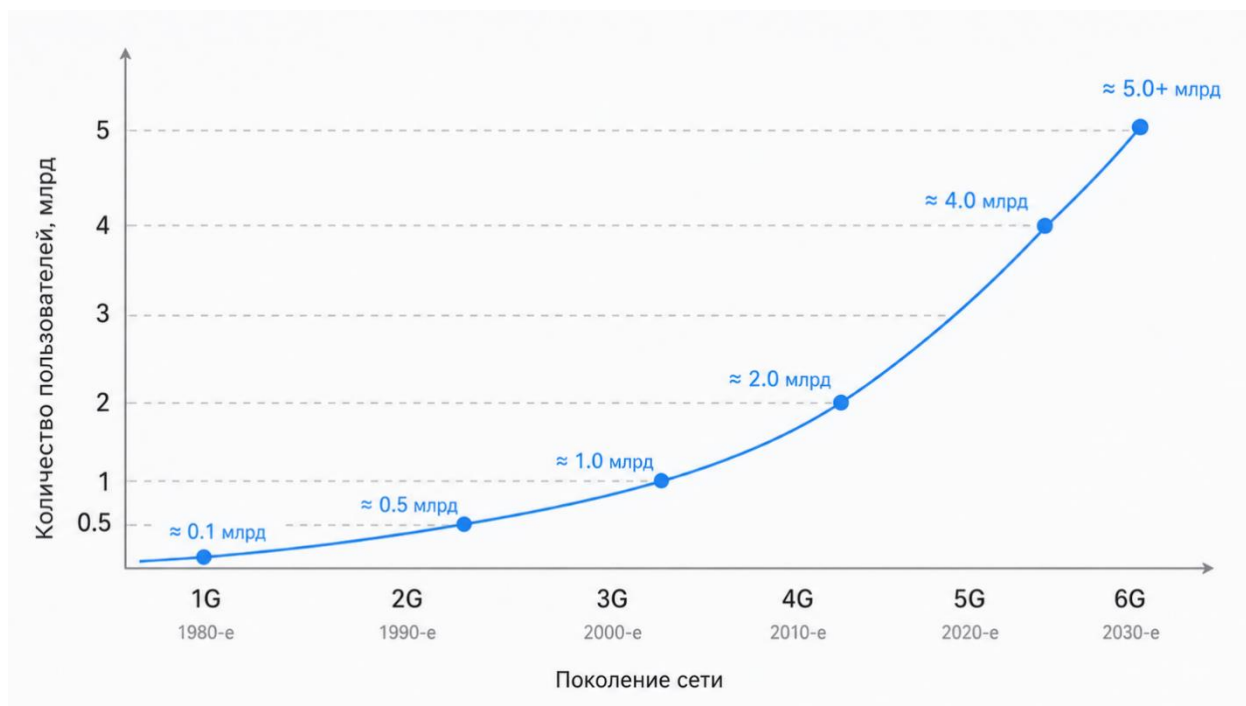


Рис. 1 Отображение роста подключенных пользователей

В рамках 13-й Исследовательской комиссии МСЭ-Т создана фокус группа по технологиям Network-2030 (FG NET-2030), которая в период 2018-2020 гг провела исследование и подготовила прогноз развития сетей фиксированной связи на период 2030 г и далее. [6] В документах представлены аспекты новых сетевых технологий, архитектур и принципов, ориентированных на будущие услуги с особыми требованиями к качеству обслуживания [7].

Новые поколения сетей связи должны удовлетворять требованиям общества в области коммуникационных услуг. Концепция «Сети 2030» в документах МСЭ-Т (Международный союз электросвязи, сектор стандартизации) рассматривается как модель перспективной коммуникационной инфраструктуры, включающей фиксированные и мобильные компоненты, облачные и туманные вычисления, а также интеграцию элементов искусственного интеллекта. [8]

Параллельно МСЭ-R (сектор радиосвязи) формирует концепцию IMT-2030 для мобильных систем шестого поколения, которая представляет собой дальнейшую эволюцию IMT-2020/5G-Advanced и должна обеспечивать новые возможности и обеспечить сосуществование прежних сервисов. [9,10]

Таким образом, сети связи последующих поколений ориентированы не только на улучшение характеристик качества связи (пропускная способность, задержка, надежность), но и на расширение сценариев взаимодействий пользователей и увеличение спектра предоставляемых услуг. [32] На рисунке 2 приведена диаграмма объединяющая возможные сценарии развития технологий будущих систем. На диаграмме показано расширение сценариев в относительно прежней концепции (IMT-2020).

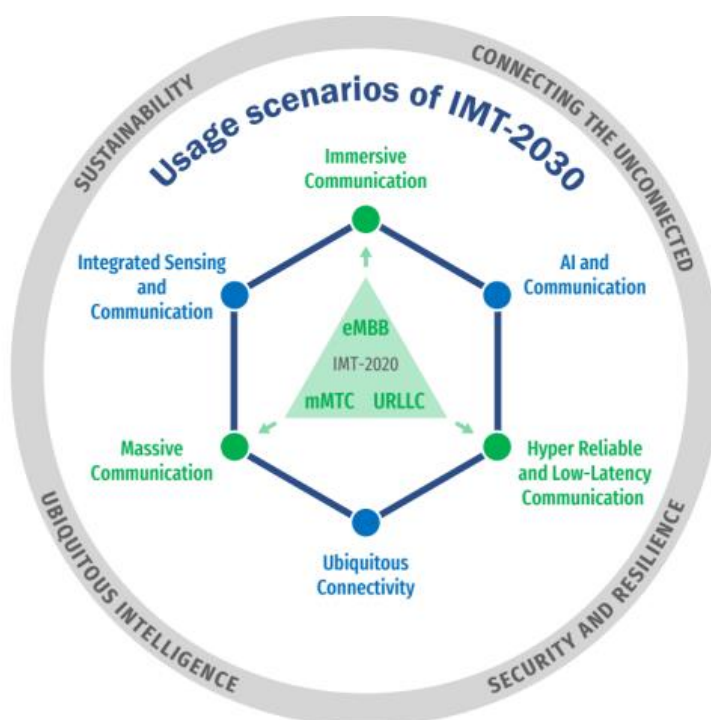


Рис. 2 Сценарии сетей связи IMT-2030

Перспективные сети объединяют следующие новые возможности предоставления услуг:

Immersive Communication (с англ. Иммерсивные коммуникации) – это услуги, обеспечивающие эффект присутствия и расширенный интерактивный визуальный, аудиальный и тактильный опыт. Иммерсивные технологии позволяют создавать эффект полного присутствия пользователя в удаленной от него среде за счет создания трехмерных моделей и пространства, а также воздействия на все органы чувств человека. [18] К таким технологиям относятся:

- НТС (аббр. с англ. Holographic Type Communications) – голографические коммуникации, позволяющие представлять в интерактивном режиме цифровые 3D-изображения.[21]

- системы виртуальной и дополненной реальности (VR/AR/MR/XR), использующие объёмную визуализацию, пространственный звук и отслеживание движений пользователя

- тактильный интернет и системы с обратной связью усиливающие ощущение взаимодействия с виртуальными или удалёнными объектами.

В настоящее время ведутся интенсивные исследования и создаются прототипы систем передачи по сетям связи голографических изображений и других иммерсивных видов коммуникаций, которые рассматриваются как один из ключевых классов сервисов перспективных сетей связи в 6G/IMT-2030. [19-20]

Hyper Reliable and Low-Latency Communication (HRLLC, с англ. Гипер надёжные сети связи с ультра-малой задержкой) – технология является развитием концепции URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications) и ориентирована на сверхнадёжные сервисы с еще более высокими требованиями для сервисов сетей 2030 [25-26]

Massive Communication (с англ. Массовые коммуникации) – расширенный сценарий сетей пятого поколения массовых подключений по сравнению с mMTC (massive Machine-Type Communications), включающий масштабируемую поддержку устройств Интернета вещей и сенсорных узлов в различных отраслях.

Ubiquitous Connectivity. (с англ. повсеместная подключённость) – данное направление ориентировано на сельские, удалённые и малонаселённые труднодоступные регионы, которые все еще нуждаются в подключении связи.

Artificial Intelligence and Communication (с англ. Искусственный интеллект и связь). интеграция технологий искусственного интеллекта в сети, например, распределённый сбор данных, обучение и применение моделей, оркестрация вычислительных ресурсов, а также интеллектуальное управление трафиком и услугами.

Integrated Sensing and Communication (ISAC, с англ. Интегрированное зондирование и связь). совмещение функций связи и высокоточного радиолокационного позионирования (оценка дальности, угла, скорости, характеристик объектов, локализация) для задач навигации, мониторинга среды, отслеживания движений и других приложений.

Требования к услугам использования иммерсивных коммуникаций (рис 3) можно свести в **диаграмму к приложениям 6G** по основным характеристикам: задержка и пропускная способность.

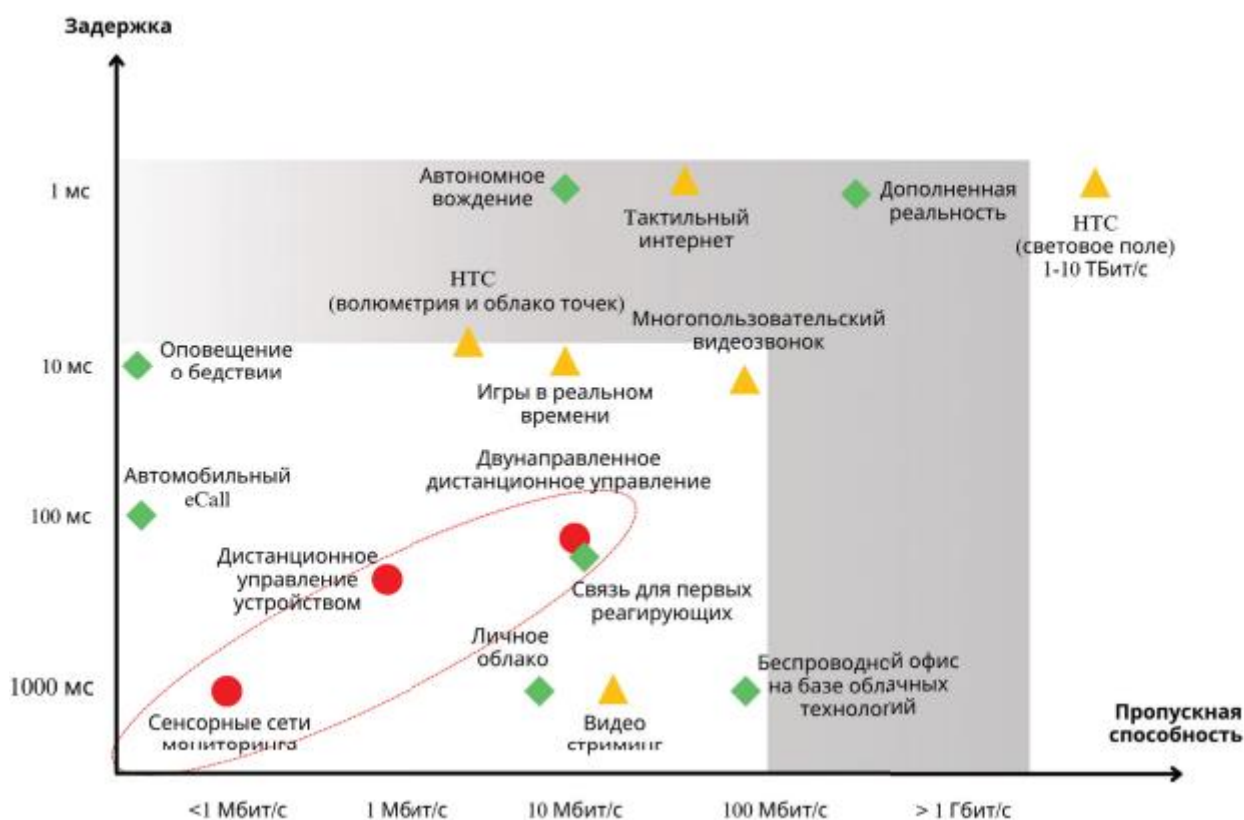


Рис. 3 Требования для новых приложений 6G [108]

Также с учетом перехода к сетям 2030 выделены следующие принципы при разработке новых систем и услуг [11]:

1. *Простота и совместимость.* Архитектура сети должна оставаться по возможности простой и иметь эволюционный характер развития, обеспечивая совместимость с уже развёрнутыми сетями и сервисами,

чтобы переход к новым иммерсивным приложениям не требовал полного пересмотра инфраструктуры.

2. Программно-конфигурируемые сети.

Сеть должна иметь возможность гибко изменять поведение программными средствами без полной перестройки инфраструктуры.

3. *Гетерогенность*. Обеспечение не только передачи данных, но использование различных устройств связи для вычислениями, хранения и др. в единой телекоммуникационной инфраструктуре.

4. *Сетевой слайсинг*. Деление сети на сегменты для оптимизации и настройки под конкретные задачи (преимущество технологии 5G) для обеспечения требуемых показателей качества обслуживания

5. Однозначная адресация и именование

Имена должны быть независимы от конкретного местоположения или сервера, на котором обрабатываются данные, что важно для масштабируемой маршрутизации и управления распределённой инфраструктурой

6. Встроенная безопасность и анонимность.

7. Устойчивость инфраструктуры

8. *Детерминизм сети*. Гарантированная доставка пакетов данных за определенное время.

9. Поддержка интегрированной спутниковой и наземной сети

Одним из сценариев развития услуг в сетях перспективных поколений связи могут выступать сетевые вселенные. При этом качество обслуживания и опыт пользователя должны быть центральными элементами архитектуры, в этой связи требуется гибкое, почти без потерь управление, учитывающее не только общесетевые показатели, но и индивидуальные характеристики восприятия услуг пользователем.

1.3 Сетевая вселенная как инфокоммуникационная среда последующих поколений сетей

Переход к распределенным цифровым средам является современным этапом развития инфокоммуникационных сетей и систем. В отличие от классической концепции передачи данных новый этап развития обеспечит создание вычислительных, сенсорных, иммерсивных и сервисных ресурсов.

В связи с развитием коммуникационная инфраструктура начинает выполнять функцию интеграции физических объектов, цифровых моделей, пользователей и программных сервисов в едином пространстве взаимодействия. Данное направление формирует предпосылки для развития сетевых вселенных. [12]

Концепция сетевых вселенных широко развивается и определены 4 типа, которые, формируют представление пользователя: включены Виртуальные миры, Зеркальные миры, Дополненная реальность и Логгирование (с англ. Lifelogging). [46]. Здесь формируются разные уровни и концепции взаимодействия с сетевыми вселенными. Выделенные типы цифровых вселенных описывают различные способы интеграции с цифровой средой.

Существующие реализации метавселенных имеют ограниченную связь с физической средой в следствие чего в значительной степени остаются автономными по отношению к физическому миру, формируя самостоятельные цифровые пространства и среды. При развитии сетевых вселенных необходимо учитывать социальные последствия их внедрения, таких как особенности восприятия и поведения пользователей. Важным направлением остается требования к защите персональных данных пользователей. [108]

Согласно официальному термину «сетевые вселенные» от Международного Союза Электросвязи (специального агентства ООН), определенном в совершенно новом стандарте Y.4238: «Требования к интеграции виртуального и физического

миров посредством цифровых двойников в метавселенной», который был утвержден в конце 2025 г.:

Метавселенная: совокупная виртуальная среда, в которой происходит конвергенция физического и виртуального миров и которая обеспечивает пользователям возможность взаимодействия в общих цифровых пространствах, с объектами и услугами.

Примечание: метавселенная может быть виртуальной, дополненной, представлять физический мир или быть связанной с ним).

Рассмотрим еще один термин, который имеет более расширенный характер. Представлен в технической спецификации Фокус группы МСЭ по метавселенным – Technical Specification ITU FGMV-20: [13]

«Метавселенная: интегрированная экосистема виртуальных миров, предоставляющая пользователям иммерсивный опыт и обеспечивающая трансформацию существующих ценностей, а также создание новых ценностей в экономическом, экологическом, социальном и культурном аспектах.

Последнее определение существенно расширяет инженерный контекст исследования. Если в Y.4238 основной акцент сделан на механизмах интеграции физического и виртуального миров через цифровые двойники, то в FGMV-20 метавселенная рассматривается как экосистема взаимосвязанных виртуальных миров, ориентированная на иммерсивное взаимодействие и создание новой ценности. Таким образом, совмещение этих двух подходов позволяет рассматривать метавселенную как распределённую сетевую среду, обладающую одновременно инфраструктурными, сервисными и прикладными свойствами.

Далее наиболее целесообразно использовать термин «сетевые вселенные» как направленное развитие концепции метавселенной. Под сетевыми вселенными далее будем понимать многоуровневые распределённые инфокоммуникационные среды, в которых зеркальные и полно связанные миры, цифровые двойники, пользователи и их аватары, вычислительные платформы, коммуникационные сети и сенсорно-исполнительные устройства интегрируются в единую систему обмена данными. [46] Такое понимание подчёркивает, что объектом исследования

является не только визуальная среда присутствия, но прежде всего архитектура межсистемного взаимодействия, обеспечиваемая средствами телекоммуникаций.

Сетевые вселенные представляют собой комплексную систему, включающую распределённые вычислительные ресурсы, сети связи, а также уровни представления и взаимодействия, реализуемые через аватары, костюмы телеприсутствия и сенсорные интерфейсы.

На основе всего выше сказанного представим структуру сетевых вселенных как иерархическую архитектуру (рис 4), включающую несколько функциональных уровней. На нижнем (физическом) уровне располагаются физические объекты: датчики, актуаторы (исполнительные механизмы, носимые устройства, костюмы телеприсутствия), отвечающие за выделение сигналов и управляющих данных.

Следующий уровень организации доступа сети (уровень сетевого доступа), включающего персональные, локальные сети; мобильные сети и транспортные сегменты.

Над ними располагается уровень распределённой вычислительной обработки, отвечающий за агрегацию, синхронизацию, аналитику и хранение данных.

Верхний уровень составляют виртуальные и зеркальные миры, включающие цифровые двойники (аватары) и прикладные сервисы взаимодействия.

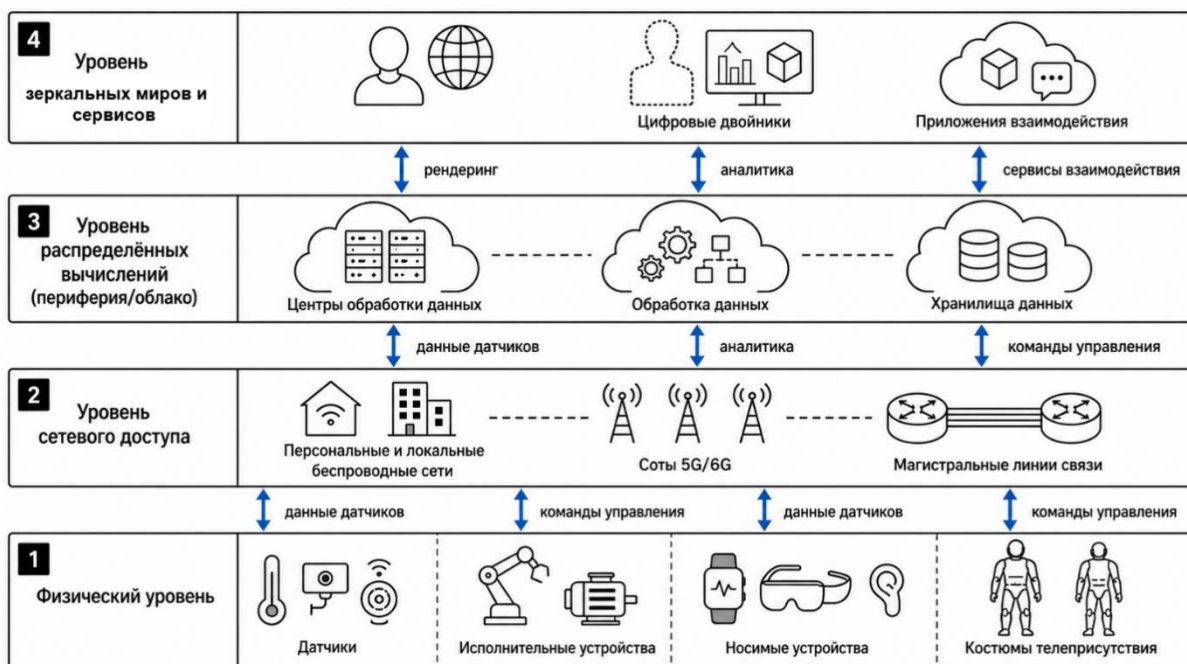


Рис. 4 Концепция сетевых вселенных

1.4 Цифровые двойники

Одним из ключевых механизмов функционирования сетевой (зеркальной) вселенной является цифровой двойник. Цифровой двойник – это виртуальная копия или модель любого физического объекта (физического двойника), которые связаны между собой посредством обмена данными в режиме реального времени. [47]

В материалах МСЭ показаны требования к цифровому двойнику во время различных сценариев эксплуатации для некоторых классов интеллектуальных систем. Также показано взаимодействие в умных городах (рис 5). Но остается пробел в разработке полной архитектуры взаимодействия сетевых вселенных и цифровых двойников на всех уровнях.

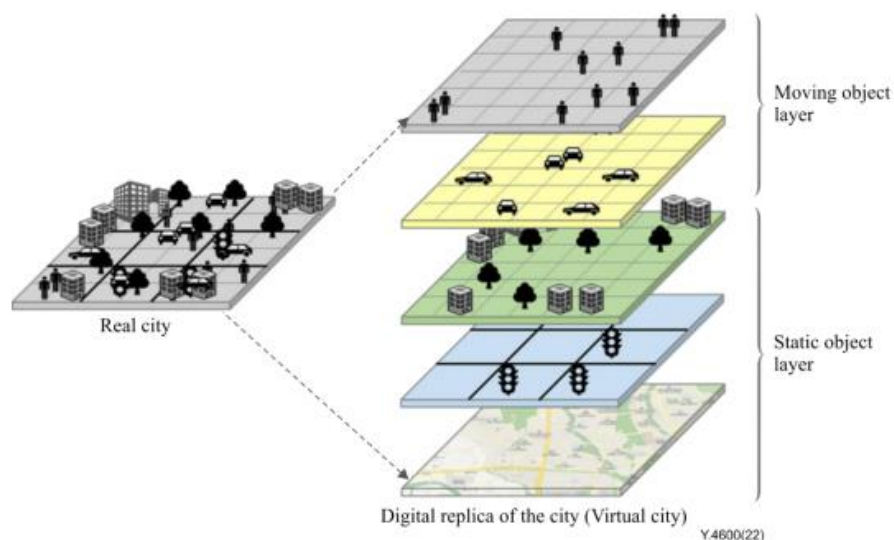


Рис. 5 Пример цифрового представления города [12]

Структура сетевых вселенных с поддержкой цифровых двойников (рис 6) предложена группой авторов [49]. Различные модули предлагаемой платформы с поддержкой цифровых двойников интегрированы в распределенную архитектуру. Это взаимодействие поддерживается различными компонентами системы и передается через новую инфраструктуру, а именно 6G.

На рисунке представлен подробный обзор предлагаемой платформы с использованием цифровых двойников. Предлагаемая платформа состоит из различных уровней и компонентов, к основным можно отнести:

- 1) уровень Интернета вещей,
- 2) уровень цифровых двойников и агентов ИИ,
- 3) Представления метавселенной (объекты и сети аватаров)

Каждый уровень фокусируется на наборе заданных задач. Связь между различными модулями этих уровней и компонентами основана на сети 6G для обеспечения требуемого качества обслуживания и обмена данными между сервисами.

Важнейшим элементом этой архитектуры является радиоканал от физического устройства уровня Интернета вещей к базовой станции, поскольку его

пропускная способность непосредственно определяет характеристики передачи данных для последующей обработки данных.

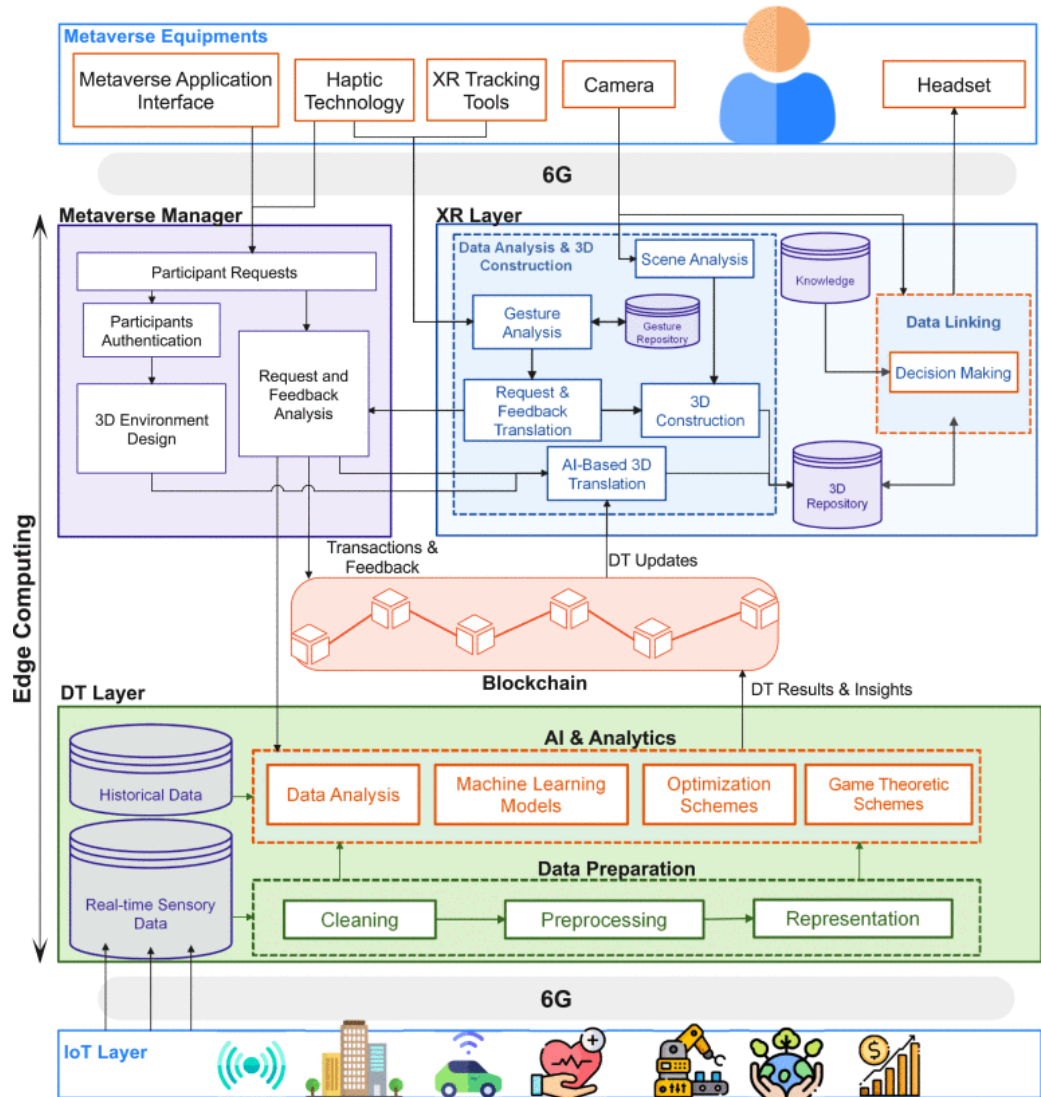


Рис. 6 Концепция цифровых двойников в сетевых вселенных [49]

Для канала передачи данных от физического устройства к базовой станции используется выражение Шеннона [14]:

$$R_{k,b} = W \log\left(1 + \frac{h_{k,b} p_{k,b}}{\sigma^2}\right) \quad (2)$$

где W – полоса частот, $h_{k,b}$ – коэффициент канала, $p_{k,b}$ – мощность передачи, σ^2 – мощность шума.

Полученная пропускная способность ($R_{k,b}$) определяет минимально достижимое время передачи объема данных D :

$$T = \frac{D}{R_{k,b}} \quad (3)$$

Таким образом, ёмкость канала ограничивает скорость обновления состояния цифрового двойника.

Параметр, определяющий характеристики для сетевых вселенных является задержка системы, поскольку взаимодействие пользователей в реальном времени напрямую влияет на качество функционирования такой системы. [31]

Точность цифрового представления в сетевой вселенной одновременно зависит от коммуникационных, транспортных и вычислительных ресурсов, так как задержка взаимодействия физического объекта и его цифрового двойника задаётся суммарной задержкой по всем стадиям обработки и передачи данных

При проектировании системы цифровых двойников важно учитывать влияние задержки, потерь данных и джиттера, поскольку важной составляющие является взаимодействие пользователя с аватаром.

Уменьшение временной задержки считается важной задачей в сетях тактильного интернета. Порог обнаружения задержки зависит от параметров движения пользователя (амплитуды и частоты). Например, в работе [15] для гармонической волны определен порог обнаружения задержки и определяется оценкой:

$$\tau \approx \frac{\Delta f}{kA\omega} \quad (4)$$

Где Δf – фиксированный порог восприятия силы, A – амплитуда движения, ω – круговая частота, k – коэффициент жесткости

В цифровых средах пользователь может сделать вывод о задержке на основе смещения объекта от его первоначально ожидаемого положения, вызванного задержкой между движением и визуальной обратной связью.

Таким образом, допустимая задержка в тактильном канале сетевой вселенной не является фиксированной постоянной, а определяется динамикой взаимодействия пользователя с удалённым или виртуальным объектом.

Суммарная сквозная задержка может быть представлена следующим образом [16-17]:

$$T_o = T_{\text{изм}} + T_{\text{тр}} + T_{\text{в}} + T_{\text{д}} \quad (5)$$

Где $T_{\text{изм}}$ описывает время формирования и оцифровки измерений, $T_{\text{тр}}$ — задержка транспортировки данных по сети связи, $T_{\text{в}}$ — задержка вычислительной обработки и обновления цифрового двойника, а $T_{\text{д}}$ — задержка доставки управляющего воздействия и реакции исполнительного устройства.

1.5 Международная стандартизация в области технологий костюмов телеприсутствия, цифровых двойников и сетевых вселенных

Активно развивающаяся концепция сетевых вселенных подтверждается научными разработками и международной деятельностью в области стандартизации данного направления.

Развитие международной стандартизации в области костюмов телеприсутствия, цифровых двойников и сетевых вселенных подчеркивает актуальность и обоснованность развития сетей 2030 в данном направлении. В настоящее время деятельность МСЭ-Т определяется в текущем исследовательском периоде 2025–2028 гг рядом обновленных Резолюций, учитывающих актуальные вызовы, в том числе была принята совершенно новая Резолюция 105 «Поощрение и укрепление деятельности по стандартизации метавселенной», принятая в октябре 2024 года Всемирной ассамблеей по стандартизации электросвязи ВАСЭ-2024 в Нью-Дели. Именно она определила направления работы МСЭ-Т в области сетевой вселенной.

В постановляющей части Резолюция 105 принимает ключевые решения об открытии исследовательского периода (2025-2028гг), создание координационной группы и, как прямое следствие, уже в первый год были открыты 29 проектов стандартов в исследовательских комиссиях (рис. 7): ИК11 - отвечает за вопросы сигнализации, протоколов, тестирования и требований к сетям; ИК20 отвечает за стандартизацию Интернета вещей (IoT) и технологий для «Умных городов и сообществ» и ИК21 отвечающая за разработку международных стандартов в области мультимедийных технологий, доставки контента и кабельного телевидения. В совокупности три комиссии охватывают полный технологический стек – от протокола до пользовательского опыта. Другие же ИК сектора стандартизации электросвязи также имеют задачи, приуроченные в том числе к метавселенным. Например, вопросы связанные с безопасностью в ИК 17. Стоит также отметить немаловажную работу, идущую в секторе развития (ITU-D, Development), которая связана с определением связанных с метавселенными вопросами новых экономических моделей в экономике телекоммуникаций, в частности в ИК 1 и ИК 2.

Сектор стандартизации электросвязи определяет уже ряд фундаментальных стандартов, рассмотрим некоторые из них. Стандарт ITU-T Y.4238 «Requirements for integrating virtual and physical worlds through digital twins in the metaverse» вышедший в ноябре 2025 года [12] определяет основные характеристики взаимодействия в сетевых вселенных физического мира с цифровым через интеграцию цифрового двойника пользователя. В соответствии с ITU-T Y.4238, к цифровому двойнику пользователя предъявляются следующие ключевые группы требований:

- функциональная полнота (отражение физических, поведенческих и биометрических характеристик пользователя);
- пространственно-временная согласованность (синхронизация состояния цифрового двойника с реальным объектом в реальном времени);
- интероперабельность (совместимость при взаимодействии между различными платформами и метавселенными);

- масштабируемость (поддержка большого числа пользователей и устройств);
- безопасность и конфиденциальность данных;
- надежность и устойчивость к сетевым задержкам;
- поддержка данных (видео, аудио, тактильные);
- энергоэффективность (особенно для носимых устройств);
- адаптивность к условиям сети и вычислительным ресурсам.

Особое значение данные требования приобретают при разработке костюмов телеприсутствия, которые выступают в качестве интерфейса между физическим пользователем и его цифровым двойником. Такие системы включают распределенные сенсорные и исполнительные элементы (например, датчики ЭМГ, инерциальные модули, тактильные актуаторы), объединенные в рамках беспроводных нательных сетей.

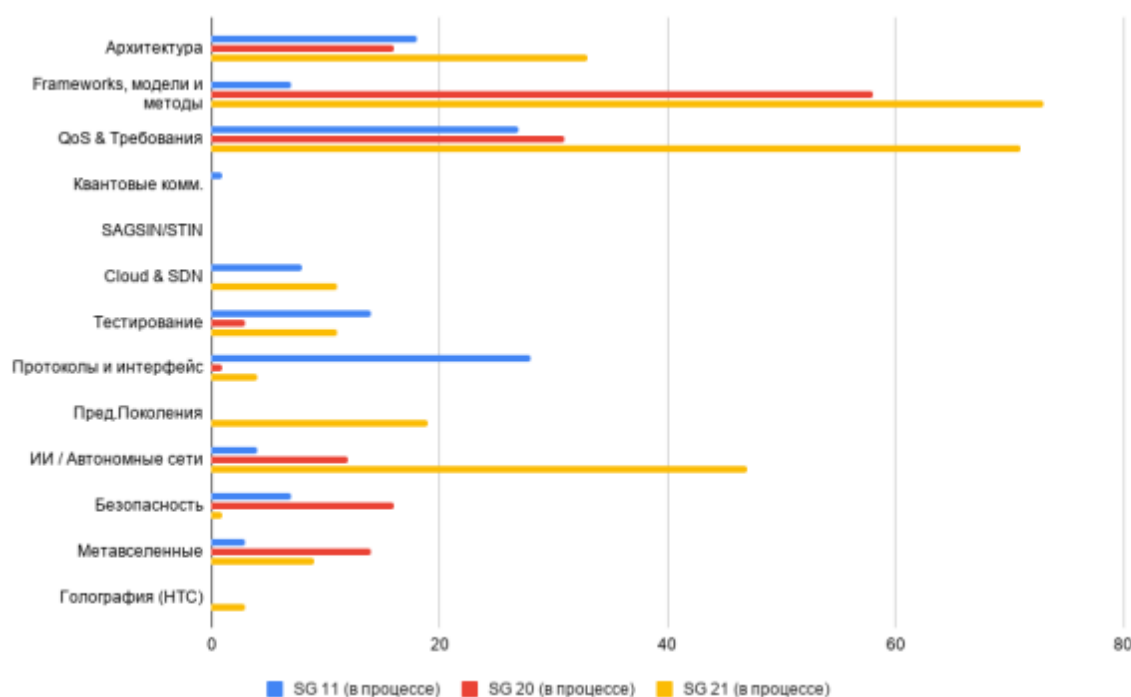


Рис. 7 Актуальные направления стандартизации МСЭ, в том числе в области сетевых вселенных [109]

1.6 Костюмы телеприсутствия в качестве новых пользовательских устройств

Развитие иммерсивных коммуникаций привело к возможности повсеместного использования шлемов виртуальной реальности. Данные устройства главным образом воздействуют на органы слуха и зрения пользователя. Следующим этапом эволюции таких систем является полное погружение пользователя в цифровую среду с задействованием на как можно большего числа органов чувств, в том числе посредством передачи тактильных данных.

Стоит отметить, что в материалах МСЭ костюм телеприсутствия рассматривается как пример технологии иммерсивного взаимодействия, предназначенной для передачи прикосновений и движений пользователя в удалённой среде. Таким образом, костюм телеприсутствия выступает интерфейсом между пользователем и инфраструктурой сетевой вселенной.

Такие устройства могут включать следующие составляющие для взаимодействия с сетевой вселенной:

- инерционные датчики: акселерометры, гироскопы, магнитометры. Они необходимы для восстановления движений пользователя в цифровой среде (отображение угла, ускорения)
- датчики определяющие физиологические особенности: дыхания, электромиографии и др.
- система кинестетической обратной связи, например, для отображения давления или тепла/холода
- система коммуникационной составляющей включает нательную сеть, интерфейсы связи (с телефоном, 5G)

1.6.1 Использование пикосот для обеспечения радиодоступа костюмов телеприсутствия

Применение малых сот становится необходимостью, поскольку в зонах повышенного спроса часто необходимо увеличение емкости связи. Под малой сотой в соответствии с общепринятой терминологией ITU/3GPP понимается базовая станция с низкой выходной мощностью и ограниченным радиусом действия, включающая фемто-, пико- и микро-соты (рис. 8). Пикосоты имеют радиус покрытия до 100–200 м и предназначены для обслуживания абонентов внутри помещений с повышенным спросом на услуги высокоскоростной передачи данных. [33,34,35].

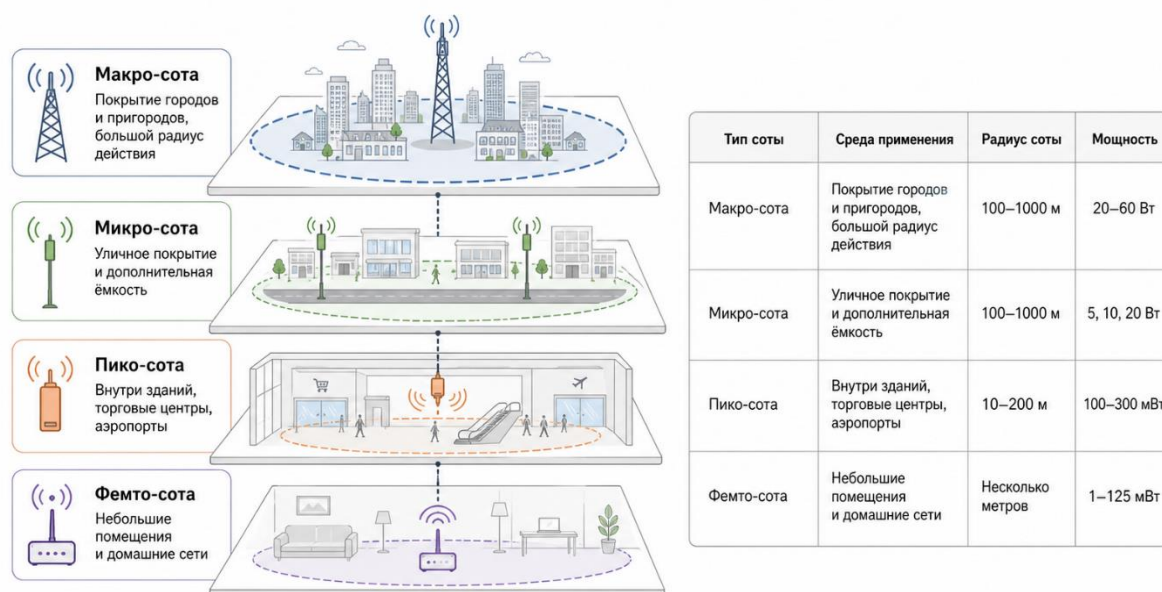


Рис. 8 Иерархия сот по радиусу действия

Для эксплуатации костюмов телеприсутствия в помещениях важным является наличие стабильного подключения. В условиях сложной застройки, экранирующих конструкций и высокой плотности пользователей стандартное покрытие от макросот операторской сети зачастую оказывается недостаточным: сигнал ослабляется, возникают «зона тени», увеличивается вероятность потерь.

Для компенсации этих эффектов возможно применение малых БС, например, пикосоты, создающие локальные зоны повышенного качества связи.

Пикосота представляет собой миниатюрную базовую станцию операторского класса, установленную в помещении и подключённую к сети через проводной широкополосный канал.

Таким образом, пикосоты в инфраструктуре сетей 5G/6G выполняют роль локальных точек радиодоступа, обеспечивающих требуемые условия для работы костюмов телеприсутствия: уменьшение задержки и стабильность параметров канала в ограниченном пространстве. Это особенно важно для устройств интернета вещей и приложений, чувствительных к временным характеристикам связи и к потере пакетов, где нарушение параметров канала непосредственно влияет на качество взаимодействия пользователя с цифровой средой.

1.6.2 Беспроводные нательные сети (WBAN)

Класс беспроводных нательных сетей (с англ. wireless body area network, WBAN) предназначен для организации сети малого радиуса в непосредственной близости к телу пользователя.

Сети WBAN изначально ориентированы на медицинский мониторинг [52] состояния пациента, где требуется длительное наблюдение с минимальным вмешательством и высокими требованиями к энергоэффективности системы. Однако дальнейшее развитие носимой электроники и распределённых сенсорных платформ привело к расширению области их применения, включая интеллектуальные системы реабилитации, спортивный мониторинг, человеко-машинное взаимодействие и костюмы телеприсутствия. [50, 51]

В костюмах телеприсутствия функциональное назначение сетей WBAN расширяется: помимо мониторинга, необходимо обеспечивать сбор кинематических и тактильных данных с элементов костюма (датчиков или сенсоров). (рис. 9)

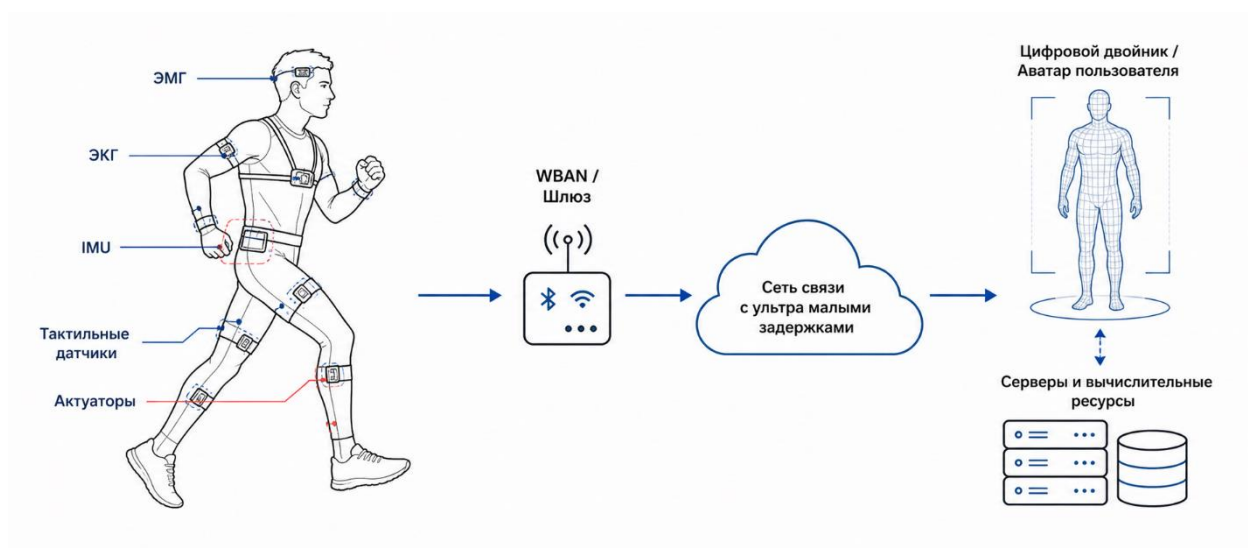


Рис. 9 Концепция архитектуры WBAN для костюма телеприсутствия

Для организации связи нательных датчиков выделим технологии малого радиуса действия. Сравнение технологий связи для беспроводной нательной сети представлено в таблице 1.

Стандарт IEEE 802.15.6 разработан специально для нательных сетей, в первую очередь медицинского назначения. Стандарт описывает системы беспроводной связи малого радиуса действия, работающие в непосредственной близости от человеческого тела.

Технология Bluetooth Low Energy (BLE) получила широкое распространение благодаря интеграции со смартфонами и носимыми устройствами, обеспечивая низкое энергопотребление и достаточную скорость передачи данных для отслеживания физической формы и мониторинга пациентов.

UWB (Ultra-Wideband), хотя и более требовательный к энергопотреблению, обеспечивает высокую скорость передачи данных, что делает его идеальным для мониторинга в режиме реального времени.

Беспроводной стандарт связи ZigBee также имеет низкое потребление мощности. Обычно применяют для создания персональных сетей.

Таблица 1. Сравнение технологий связи для WBAN

Название	Скорость передачи данных	Дальность связи	Потребляемая мощность
ZigBee	(20–250) кбит/с	(10–100) м	Низкая
BLE	125 кбит/с–2 Мбит/с	(10–100) м	Очень низкая
IEEE 802.15.6	75 кбит/с–15 Мбит/с	≤ 10 м	Низкая
UWB	110 кбит/с–480 Мбит/с	(1–10) м	Высокая

1.6.3. Эксплуатационные ограничения беспроводных нательных сетей для костюмов телеприсутствия

При проектировании костюмов телеприсутствия необходимо учитывать особенности работы с WBAN. Функционирование такой сети происходит в условиях постоянной динамики пользователя, что приводит к изменению взаимного расположения сенсорных узлов. Кроме того, необходимо учитывать экранирование радиосигнала, в следствие чего происходит искажение диаграммы направленности антенны и ухудшение характеристик радиоканала. Дополнительно возможна частичная потеря контакта сенсоров (датчиков) с кожей. [48] Поэтому для таких сетей важны не только точность измерений, но и обеспечение постоянной связи, низкая задержка, малое энергопотребление и способность сохранять передачу данных при изменении условий работы.

Одной из основных задач при проектировании WBAN является обеспечение длительного автономного функционирования сенсорных узлов. Энергетическая эффективность в данном случае определяется не только параметрами элементной базы, но и режимами функционирования протокола, и объёмом передаваемых данных

Кроме того, важной задачей при разработке носимых устройств является уменьшение удельного поглощения электромагнитного поля (SAR) в тканях тела человека. Уровень SAR должен быть ниже 1,6 Вт/кг на 1 г ткани согласно

американскому стандарту и ниже 2 Вт/кг на 10 г ткани согласно европейскому стандарту [53]. Удельный коэффициент поглощения (SAR) в тканях вычисляется:

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} \quad (6)$$

Где σ – удельная проводимость ткани, См/м; E – среднеквадратичное значение напряженности электрического поля в ткани, В/м; и ρ – удельная плотность ткани, кг/м².

Как уже отмечалось, движение пользователя влияет на взаимодействие датчиков и, соответственно, на формируемые сигналы. Поэтому при проектировании таких систем необходимо учитывать эти особенности и разрабатывать их с учётом соответствующих требований.

1.6.4 Назначение и область применения стандарта IEEE 802.15.6

Международная группа экспертов в области телекоммуникационных технологий в 2012 году утвердила протокол IEEE 802.15.6, определяющий технические требования к персональным беспроводным сетям [23].

Стандарт IEEE 802.15.6 представляет собой нормативно-техническую основу, определяющую общие требования к нательным сетям: малое энергопотребление, надёжность передачи, ограниченную дальность связи и поддержку медицинских данных

Технология WBAN характеризуется ограниченной зоной покрытия и ультранизким энергетическим профилем. Протокол охватывает широкий спектр прикладных решений: клиническую диагностику, нейротехнологии, биомедицинские имплантаты и интеллектуальные протезные системы.

Архитектурная реализация персональной беспроводной нательной сети требует интеграции множественных сенсорных модулей или исполнительных компонентов, которые осуществляют коммуникацию с центральным координационным узлом. Сетевая архитектура построена по принципу топологии

звезда, где все периферийные устройства напрямую взаимодействуют с главным контроллером [22].

Основная цель стандарта: создание надежной, безопасной и энергоэффективной сети для обмена данными между датчиками (узлами), размещенными на теле человека или в непосредственной близости от него [24].

Структура беспроводной нательной сети представлена на рисунке 10 (а): концентратор (X1) выполняет координацию на соответствующих узлах (У1-У3) в качестве средства доступа к физическому каналу и управления мощностью передачи. В системе со звездой с одним переходом (рис 10 а) предполагается, что передача фреймов данных осуществляется непосредственно между узлами и концентратором (хаб) к конечной точке (К), которая является средством отображения информации (ПК, смартфон). Однако, может существовать расширенная структура сети, с использованием нескольких точек доступа WBAN (рис 10 б), который обменивается пакетами данных, используя дополнительные узлы-ретрансляторы (Р). В WBAN достаточно одного концентратора, в то время как количество узлов может варьироваться в зависимости от необходимости (до 64).

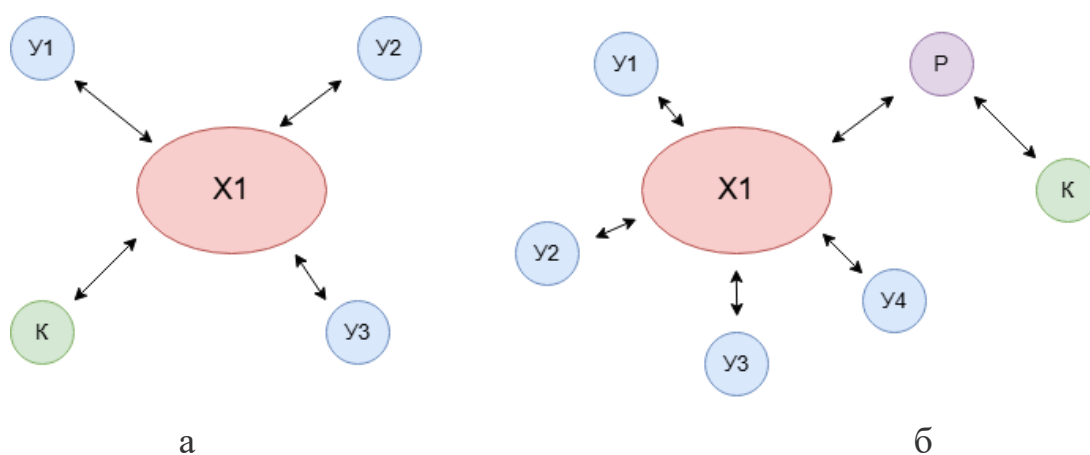


Рис. 10 Топология сети WBAN а) с одним переходом б) с узлом-ретранслятором

Согласно стандарту IEEE 802.15.6 – прямое соединение между одним сенсорным узлом и концентратором осуществляется на уровне РНУ и подуровне МАС. Стоит отметить, что уровень РНУ и подуровень МАС концентратора или сенсорных устройств в любой момент времени должны использовать только один рабочий канал.

На рисунке 11 представлены варианты подключения натальной сети WBAN. Данные, считываемые с датчиков, агрегируются в центральном натальном хабе, после чего передаются либо через точку доступа (локальный шлюз), либо непосредственно по беспроводному каналу связи к пикосоте.

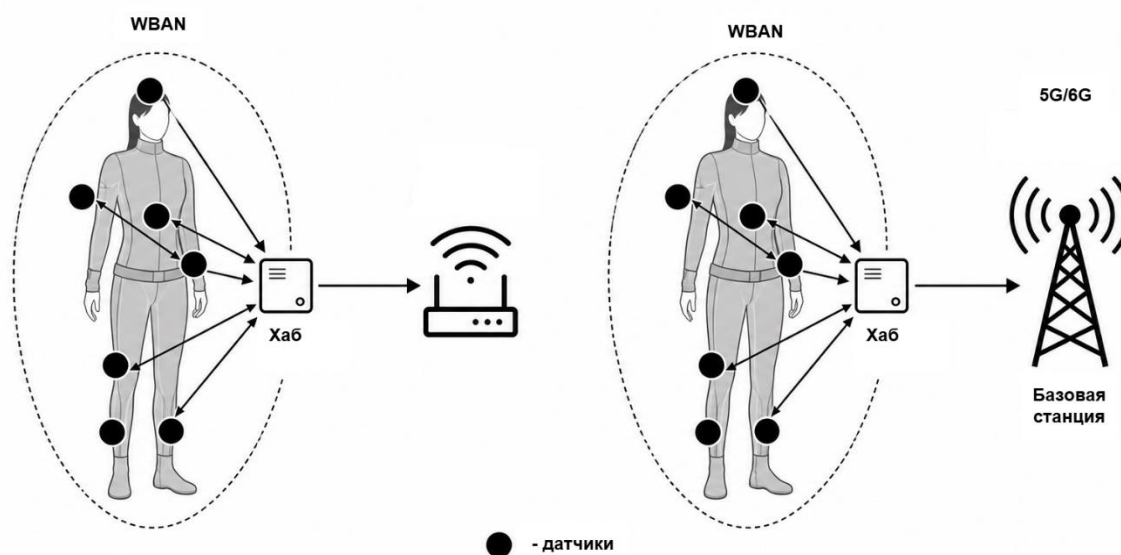


Рис. 11 Схемы функционирования WBAN с костюмом телеприсутствия

Выводы.

В первой главе произведен анализ развития коммуникационных услуг. Развитие и разработка пользовательских устройств для предоставления услуг является одной из актуальных задач для перспективных сетей 2030.

Проведённый анализ показал, что развитие сетей связи IMT-2030 ориентировано на поддержку иммерсивных, гипернадёжных сетей с ультрамалыми задержками.

Установлено, что пользовательские устройства для таких сервисов становятся центральным элементом сетевой архитектуры, поскольку именно они формируют требования к задержке, надёжности, энергопотреблению и качеству взаимодействия.

Показано, что костюмы телеприсутствия и нательные сети относятся к классу перспективных пользовательских устройств, для работы и поддержки новых услуг ИМТ-2030.

Анализ литературы и материалов МСЭ подтверждает актуальность данной тематики и развитие в данном направлении, поскольку уже ведутся разработки для реализации таких устройств.

Таким образом, разработка и исследование моделей и методов построения пользовательских устройств и сетей для предоставления коммуникационных услуг, услуг телеприсутствия является одной из актуальных задач сетей 2030, поскольку именно на этом уровне формируются предпосылки для практической реализации иммерсивных и интерактивных сервисов нового поколения.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С АВАТАРОМ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ В СЕТЕВОЙ ВСЕЛЕННОЙ НА ОСНОВЕ ДАТЧИКОВ ЭМГ

2.1 Модель сигналов и помех натальной сети на основе датчиков электромиографии

Способы определения движений пользователя в костюмах телеприсутствия является одной из актуальных задач, поскольку поиск оптимальных решений на прямую зависит от качества взаимодействия с цифровым аватаром. Натальная сеть является комплексной системой с организацией большого количества сенсоров, включая измерительные модули определения движений, положения и тактильные датчики.

Выделение полезной составляющей в натальных системах с беспроводной связью вызывает затруднение поскольку при движении пользователя формируются дополнительные нежелательные составляющие в виде артефактов движения, помимо шумовых компонентов.

Кроме того, в процессе движения пользователя происходит дополнительная деформация костюма телеприсутствия и изменение характеристик беспроводного канала. Поэтому задача повышения качества взаимодействия с аватаром включает совместную обработку сенсорных данных и адаптацию параметров передачи в натальной сети

2.1.1 Метод выделения движений пользователя в костюме телеприсутствия

В предыдущей главе рассмотрена концепция перехода к новой эре сетей связи (ИМТ-2030) и представлены новые услуги, в частности – иммерсивные. Одним из примеров пользовательских устройств в сетях будущих поколений является костюм телеприсутствия.

Для сенсорной подсистемы костюма телеприсутствия зададим требование – обеспечение минимально возможной суммарной задержки.

Рассматриваемую задержку определим, как интервал времени между моментом возникновения двигательного намерения пользователя и выполнением соответствующего движения (аватаром). Поскольку, как было показано в первой главе, задержка системы – комплексная составляющая, сокращение или уменьшение ее составляющих приводит к уменьшению общей задержки системы (T_o).

Тогда:

$$\min_{\theta} J(\theta) = \sum T_o \quad (7)$$

Где θ – характеристики параметров сенсорной подсистемы костюма телеприсутствия

Для снижения суммарной задержки от намерения пользователя до действия аватара рассмотрим возможность применения данных электромиографии (ЭМГ) в сенсорной части костюма телеприсутствия.

Электромиограмма (ЭМГ) – это регистрируемая (записанная) электрическая активность мышц, возникающая вследствие разницы потенциалов в мышце в спокойном состоянии и активной работе. Метод диагностики изменения мышечного потенциала называется электромиографией.

Электромеханическая задержка (ЭМЗ) определяется как время, прошедшее между началом электрической активности и измеримым изменением мышечного напряжения [54] Для скелетных мышц ЭМЗ обычно составляет в среднем значения (8.5–125) мс. [55-56]

Таким образом, разница между совершением движения и намерением к движению (электрическая активность мышц предшествует фактическому механическому движению конечности) позволяет осуществлять предсказание двигательного намерения пользователя до появления измеримого изменения. С

учетом этого общая составляющая T_o от костюма телеприсутствия до исполнения уменьшается в соответствии:

$$T_o = T_o - \Delta T \quad (8)$$

Где ΔT – разница между движением и определением к намерению движения пользователя определенная с помощью ЭМГ.

Для корректного отображения данных электромиографии, необходимо правильно расположить электроды на измеряемой мышце. Электроды ЭМГ помещают на каждую мышцу в соответствии с рекомендациями для регистрации активации мышц [60].

На рисунке 12 представлено расположение электродов на сгибателе большого пальца кисти. Два электрода (2 см друг от друга) располагают в медиальной части параллельно направлению большого пальца. Для повышения точности выделения сигнала применяют электроды меньших размеров и близко расположенных.

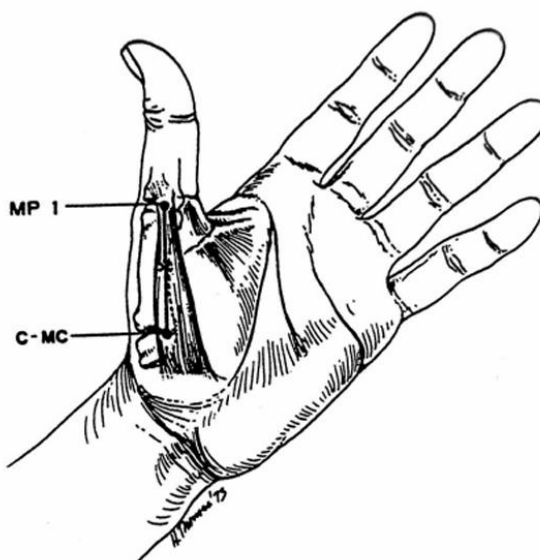


Рис. 12 Размещение электродов на мышце

Таким образом, для уменьшения общей задержки системы наиболее предпочтительным остается применение данных мышечной активности, поскольку

эти данные формируют представление о движении пользователя до появления механических перемещений (например, подъем руки).

В сравнении с другими методами, основанными на оптических или инерциальных датчиках данные для ЭМГ-канала совпадают с моментом инициации движения в мышечной системе пользователя. Поверхностные датчики других типов фиксируют смещение уже в момент возникновения механического движения пользователя.

Таким образом, это позволяет сформировать управляющее воздействие на аватар по ЭМГ-сигналу раньше и тем самым снизить полную задержку системы.

На рисунке 13 представлена структурная схема взаимодействия с аватаром с помощью датчиков. Пользователь совершает действие – данные с датчиков собираются в общем шлюзе WBAN, далее с целью формирования требуемых команд необходимо обработать сигнал (выделить полезные составляющие).

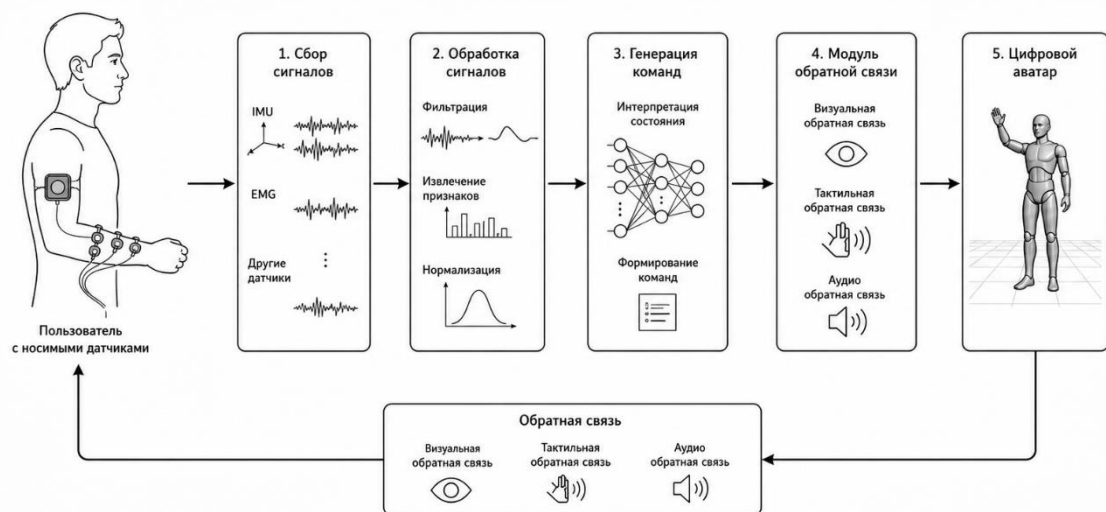


Рис. 13 Модель взаимодействия с аватаром с помощью ЭМГ

Далее будут рассмотрены особенности сигнала электромиограммы, выделены шумовые компоненты, оказывающие влияние на обработку сигнала ЭМГ.

2.1.2 Сигнал электромиограммы: особенности

Сигнал ЭМГ указывает на электрическую активность мышц, которая представляет собой сумму всех потенциалов действия двигательных единиц в пределах зоны обнаружения электрода. Запись ЭМГ широко используется в нейробиологии, спортивной медицине, а также в реабилитации и системах управления протезами и ортезами [64].

Существуют различные методы подключения датчиков ЭМГ. В данной работе рассмотрены особенности не инвазивных (поверхностные) беспроводных датчиков ЭМГ, поскольку они наиболее предпочтительны в работе с костюмом телеприсутствия.

Спектр сигнала ЭМГ лежит в диапазоне частот 10-500 Гц [57]. Амплитуда такого сигнала обычно составляет единицы–десятки микровольт и может достигать нескольких милливольт в зависимости от условий регистрации и уровня мышечной активности.

Сигнал электромиограммы можно представить, как случайный нестационарный процесс, подверженный следующим шумовым компонентам [63]:

- Гауссовский белый шум.

ЭМГ-сигнал характеризуется наличием шума с нормальным распределением амплитуд и равномерной спектральной плотностью в широкой полосе частот (рис 14).

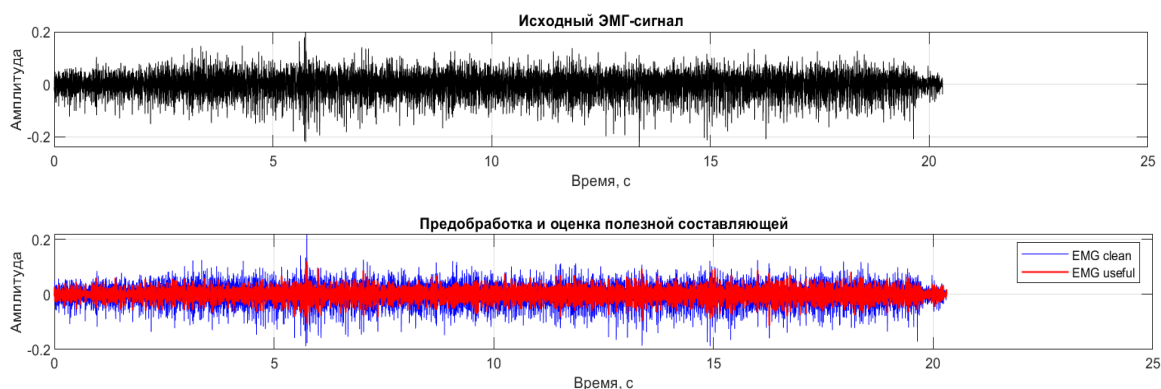


Рис. 14 Оценка влияния белого шума на ЭМГ

- Артефакты движения.

Сигналы ЭМГ регистрируются путем размещения электродов вблизи групп мышц. Когда мышца активируется, длина мышцы уменьшается, и мышца, кожа и электроды движутся относительно друг друга. Таким образом, артефакты движения возникают в следствии деформации костюма телеприсутствия или смещения электродов.

При взаимодействии пользователя данный вид помех встречается на постоянной основе, поэтому можно выделить данную компоненту как наиболее затруднительную при обработке сигнала.

- Сетевые помехи (помехи от линии передачи).

К электромагнитным помехам, оказывающим наибольшее влияние на ЭМГ, относятся помехи с частотой питающей сети (50 Гц и их дополнительные гармоники).

На рисунке 15 представлен сигнал электромиограммы. С помощью оценки спектральной плотности мощности выделены гармоники сетевых помех на частотах 50 Гц, 100 Гц.

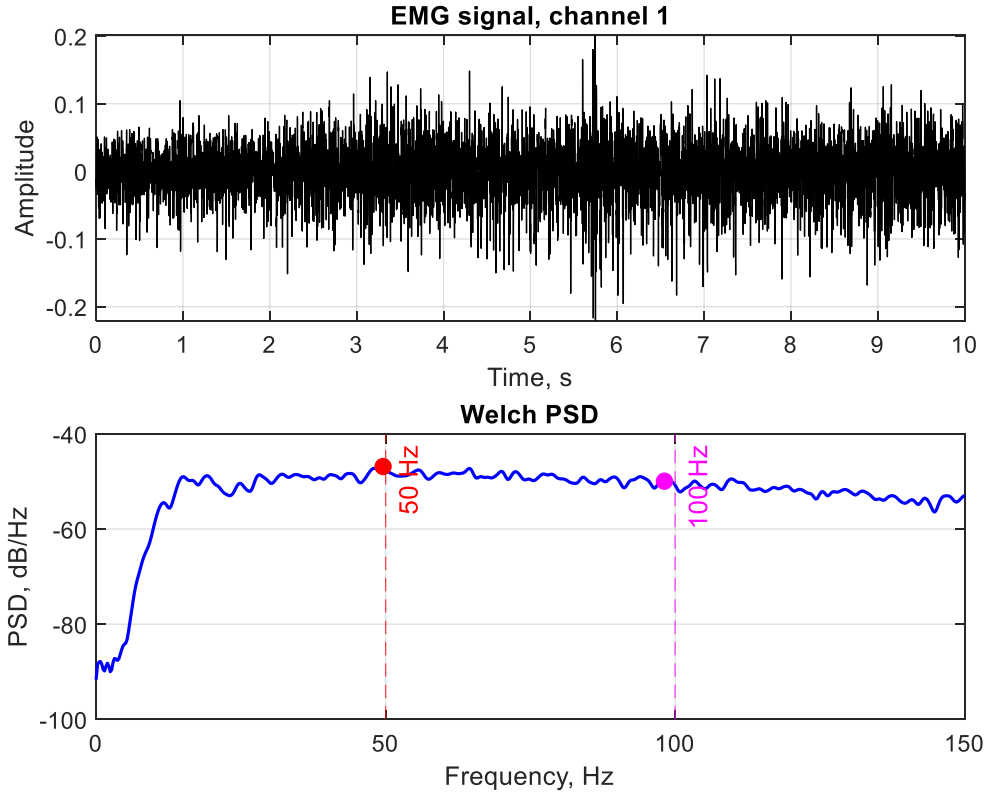


Рис. 15 а) сырые данные сигнала ЭМГ б) определение влияния сетевых помех

Анализ сигнала ЭМГ показал наличие компонент сетевой помехи. С целью уменьшения влияния сетевой помехи используют режекторные фильтры на этапе предварительной обработки сигнала.

Тогда сигнал ЭМГ сигнал определим как сумму:

$$s(n) = x(n) + w(n) \quad (9)$$

Где $x(n)$ – полезная составляющая, $w(n)$ – шумовая компонента; измеренного сигнала ЭМГ $s(n)$.

$$x(n) = \sum_{r=1}^N e_r(n) * h_r(n), \quad w(n) \sim N(0, \sigma^2) \quad (10)$$

$x(n)$ – случайный процесс, определяемый структурой набора моторных единиц в мышце, N – число срабатываний моторных единиц (импульсов) в рассматриваемом временном окне, $e_r(n)$ – импульсный процесс, описывает

моменты генерации импульсов r -й моторной единицы, $h_r(n)$ – дискретная импульсная характеристика соответствует форме данной моторной единицы, $w(n)$ – гауссовский случайный процесс с нулевым средним

Тогда:

$$s(n) = \sum_{r=1}^N e_r(n) * h_r(n) + w(n) \quad (11)$$

Полезная составляющая ЭМГ сигнала является случайным процессом, статистические характеристики которого зависят от числа активных моторных единиц мышцы, частоты срабатывания, а также от типа мышцы и ее состояния.

Поскольку ЭМГ-сигналы являются нестационарными и подвержены шуму, а точные статистические характеристики помех, как правило, неизвестны, рассмотрим способы выделения полезной составляющей.

2.1.3 Метод обработки ЭМГ-сигнала для управления аватаром

На рисунке 16 предложена структурная схема для взаимодействия с аватаром с использованием датчиков ЭМГ. После регистрации сигнала ЭМГ необходима предварительная обработка сигнала для выделения полосы частот и уменьшения влияния сетевой помехи. Далее инерционные данные (IMU) и предобработанный ЭМГ обрабатываются с помощью адаптивного фильтра.

После очищения сигнала можно разложить действие пользователя по признакам и сформировать классификацию жестов или команд для аватара.

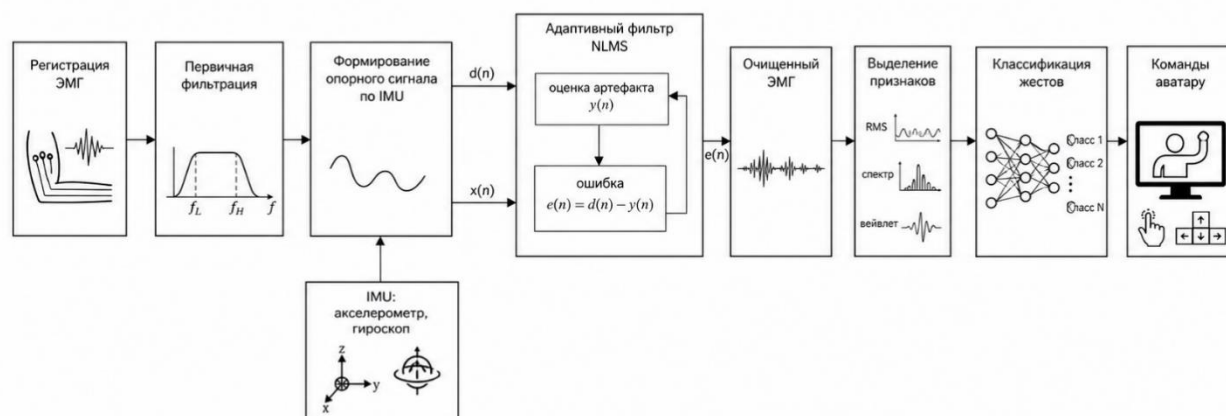


Рис. 16 Схема взаимодействия с аватаром с использованием адаптивного фильтра

Процесс оценки и уменьшения влияния артефактов движения представлен на рисунке 17, где $x(n)$ – полезный ЭМГ сигнал, искаженный сигналом артефактов движения $w(n)$. Сигнал $x(n)$ является суммой полезной составляющей и артефактов, регистрируется с помощью ЭМГ-датчиков.

Параллельно при движении пользователя датчики IMU (акселерометр, гироскоп) регистрируют движения сегментов тела пользователя. Данные о движении и измеренный ЭМГ-сигнал поступают на вход адаптивного фильтра. По полученным данным фильтр производит оценку полезного сигнала подавляя артефакты движения.

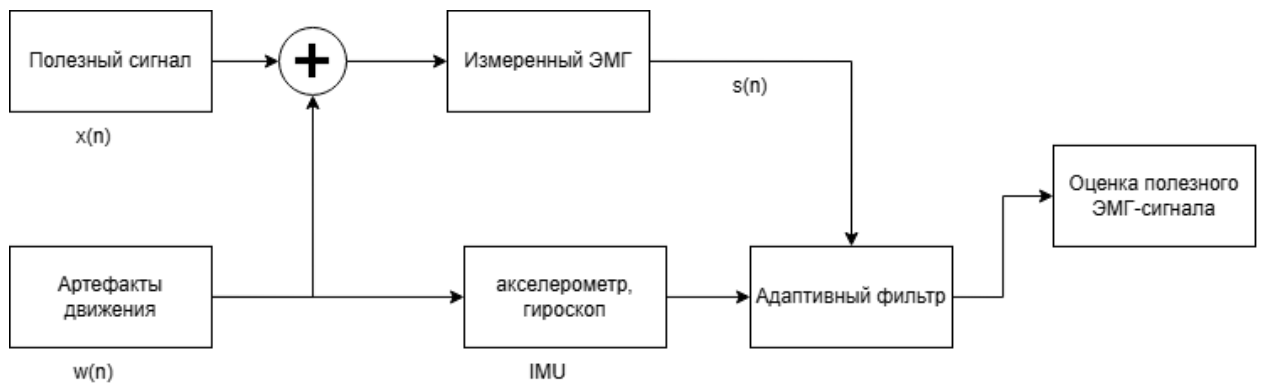


Рис. 17 Оценка полезного сигнала ЭМГ с помощью адаптивного фильтра

Поскольку система управления аватаром должна функционировать в режиме реального времени с ограниченными вычислительными ресурсами, в качестве основного варианта обработки ЭМГ-сигнала выбран метод с использованием адаптивных алгоритмов.

В работах [65-67] для обработки ЭМГ сигналов используют Вейвлет-преобразование. Такой способ можно рассмотреть, как дополнительный способ очищения сигнала или обработки сигнала в стационарном режиме, когда нет требований работы в режиме реального времени.

2.2 Сравнение адаптивных алгоритмов

С целью уменьшения влияния артефактов движения пользователя рассмотрим возможность применения адаптивных алгоритмов. Преимущество систем с использованием адаптивных алгоритмов заключается в их свойстве: адаптивно подстраивать свои параметры исходя из условий или предыдущих значений.

По определению адаптивный фильтр – называют систему, параметры которой подстраиваются в соответствии с требованиями к выходному сигналу при заранее неизвестных статистических характеристиках входного сигнала. [71]

На схеме (рис. 18) принцип работы такой системы: $x(n)$ – входной сигнал, $d(n)$ – эталонный сигнал, $y(n)$ – выходной сигнал, $e(n)=d(n)-y(n)$ – сигнал ошибки

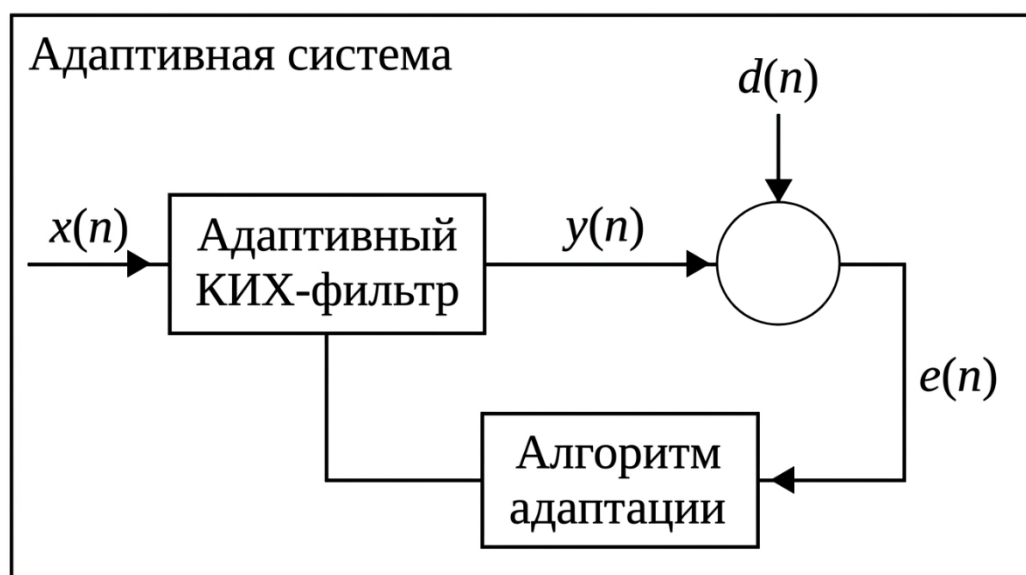


Рис. 18 Адаптивная модель обработки сигнала

Поскольку применение адаптивного алгоритма подразумевает использование опорного сигнала помехи, можно в качестве такого опорного сигнала использовать инерционные данные, регистрируемые датчиками IMU. Инерциальные измерения (ускорения и угловые скорости) коррелированы с артефактами движения в ЭМГ-сигнале, поэтому могут служить основой для адаптивной оценки помеховой компоненты. [70]

Рассмотрим формирование инерционных данных с акселерометра и гироскопа. Акселерометр формирует данные о линейном ускорении объекта по нескольким осям (a_x, a_y, a_z) . Соответственно гироскоп формирует данные об угловой скорости объекта (w_x, w_y, w_z) .

Тогда:

$$a(n) = (a_x(n), a_y(n), a_z(n))^T, w(n) = (w_x(n), w_y(n), w_z(n))^T \quad (12)$$

Скалярный опорный сигнал:

$$x(n) = f(a(n), w(n)) \quad (13)$$

Вектор опорного сигнала:

$$x(n) = (x(n), x(n-1), \dots, x(n-L+1))^T \quad (14)$$

Получаем зависимость:

$$\hat{a}(n) = w^T(n)x(n) \quad (15)$$

Где $w(n)$ – коэффициенты адаптивного фильтра, $\hat{a}(n)$ – оценка артефакта движения

Сигнал ошибки определим:

$$e(n) = d(n) - \hat{a}(n) = d(n) - w^T(n)x(n) \quad (16)$$

Далее рассмотрим применение адаптивных алгоритмов с целью уменьшения влияния артефактов движения пользователя в костюме телеприсутствия.

2.2.1 Алгоритм LMS

Алгоритм (LMS Least Mean Squares), разработанный Уидроу и Хоффом [59], представляет собой итерационную аппроксимацию метода наименьших квадратов. В алгоритме LMS связь между оптимизационным критерием и правилом обновления весов основана на методе градиентного спуска.

Алгоритм LMS прост в реализации, имеет низкие вычислительные затраты и способность к автоматической адаптации параметров фильтра в зависимости от характеристик входного сигнала.

Для задачи адаптивной обработки сигнала ЭМГ с целью устранения артефактов движения необходимо минимизировать среднеквадратичную ошибку. В связи с этим целевая функция представлена следующим выражением:

$$J(n, w) = E[e^2(n)] = E[(d(n) - w^T x(n))^2] \xrightarrow{w} \min \quad (17)$$

Где $e(n) = d(n) - y(n)$ – сигнал ошибки, $d(n)$ – желаемый сигнал, $y(n) = w^T x(n)$ – выходной сигнал фильтра, w – вектор весовых коэффициентов, $x(n)$ – вектор входных данных, n – отсчеты сигнала

Для минимизации функции J необходимо найти градиент по весовому вектору:

$$\nabla_w J = \nabla_w J[e^2(n)] = 2E[e(n)\nabla_w e(n)] \quad (18)$$

Поскольку $e(n) = d(n) - w^T x(n)$, то:

$$\nabla_w e(n) = -x(n) \quad (19)$$

Следовательно:

$$\nabla_w J = -2E[e(n)x(n)] \quad (20)$$

Воспользуемся классическим методом градиентного спуска для минимизации J , тогда:

$$w(n+1) = w(n) - \frac{\mu}{2} \nabla_w J = w(n) + \mu E[e(n)x(n)] \quad (21)$$

Для упрощения вычислений и адаптации к изменению сигнала заменим математическое ожидание $E[e(n)x(n)]$ мгновенным значением $e(n)x(n)$:

$$E[e(n)x(n)] \approx e(n)x(n) \quad (22)$$

Эта аппроксимация приводит к правилу обновления весов:

$$w(n+1) = w(n) + \mu e(n)x(n), \quad (23)$$

Где $0 < \mu < \frac{\lambda_{max}}{2}$ – условие устойчивости алгоритма, а λ_{max} – наибольшее собственное число корреляционной матрицы входного сигнала.

Алгоритм LMS имеет постоянный шаг адаптации μ , что ограничивает его способность эффективно обрабатывать нестационарные сигналы с резкими всплесками или артефактами и может приводить к расходимости алгоритма [58].

Дальнейшее сравнение алгоритмов произведем по синтетическому эталонному сигналу (рис 19). И сигналу с добавлением белого шума и артефактов движения (рис 20).

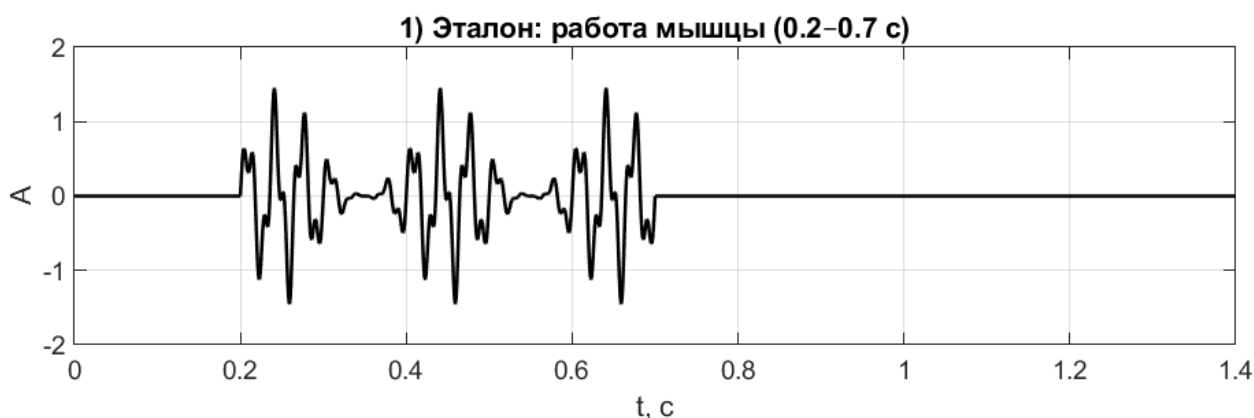


Рис. 19 Эталонный сигнал



Рис. 20 Модель зашумленного сигнала

На выходе получаем оценку полезного сигнала с помощью LMS (рис. 21).

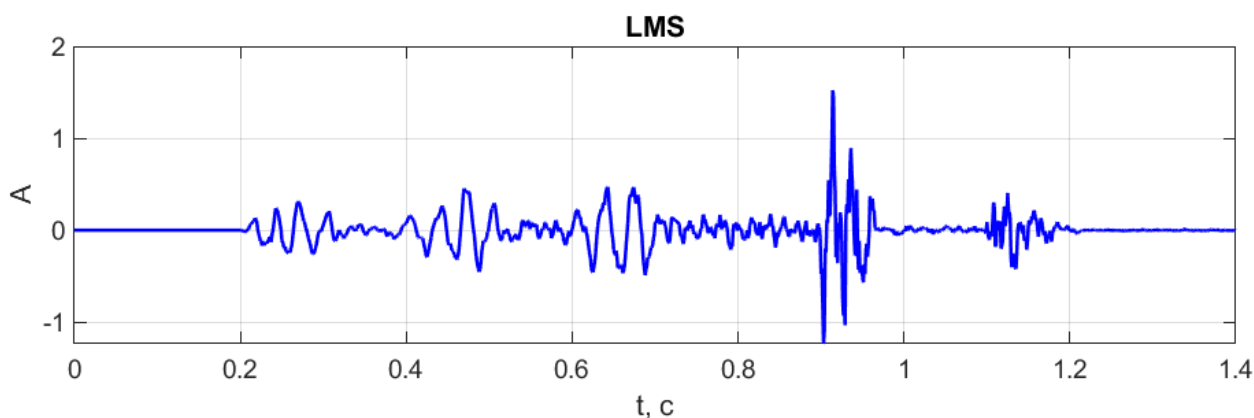


Рис. 21 Выделенный полезный сигнал с помощью LMS

2.2.2 Алгоритм NLMS

Классический алгоритм LMS не удовлетворяет требованиям при обработке ЭМГ-сигналов (рис. 22). Алгоритм Normalized LMS (NLMS) отличается от LMS (где шаг является постоянной константой), тем что он динамически масштабирует (нормирует) шаг адаптации в зависимости от текущей мощности (энергии) входного сигнала.

Обновление весов в алгоритме NLMS [62]:

$$w(n+1) = w(n) + \frac{\mu_0}{x^T(n)x(n) + \varepsilon} e(n)x(n) \quad (24)$$

Где ε – регулируемый коэффициент, μ_0 – шаг адаптации

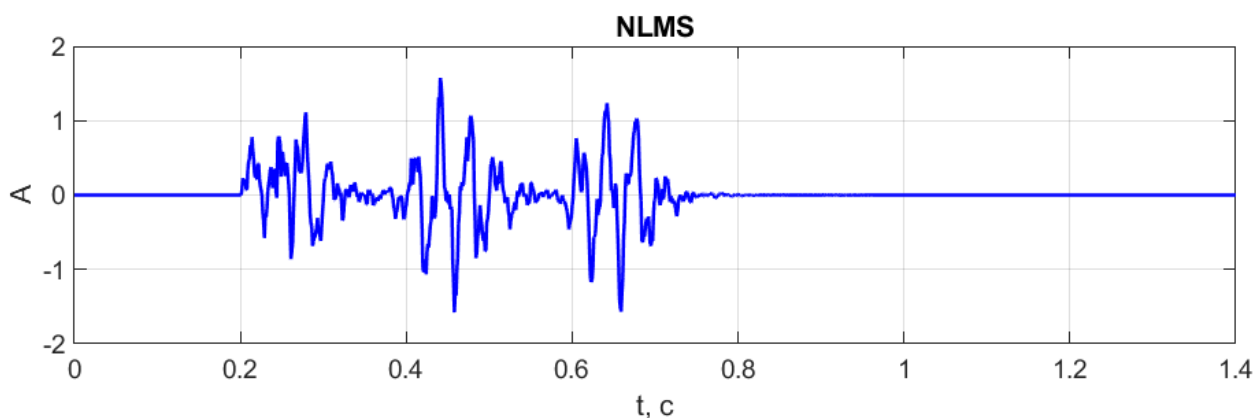


Рис. 22 Выделенный полезный сигнал с помощью NLMS

2.2.3 Алгоритм VSS-NLMS

Исходя из физических свойств зашумленного сигнала ЭМГ. Наиболее перспективным адаптивным алгоритмом для обработки такого сигнала является алгоритм VSS-NLMS (Variable Step-Size NLMS) или его модификации [61,68]. В этом алгоритме вводится правило адаптации шага зависящее от текущей энергии ошибки и оценки дисперсии шума измерения.

Обновление весов VSS-NLMS:

$$w(n+1) = w(n) + \frac{\mu(n)}{x^T(n)x(n) + \varepsilon} e(n)x(n) \quad (25)$$

Где $\mu(n)$ имеет переменный шаг

$$\mu(n) = \mu_{min} + (\mu_{max} - \mu_{min})e^{-\beta\sigma^2(n)} \quad (26)$$

Где μ_{min} , μ_{max} – минимальный и максимальный шаги, β – переменный управляющий параметр шага адаптации, $\sigma^2(n)$ – оценка ошибки

После обработки ЭМГ сигнала с помощью алгоритма VSS-NLMS получен график (рис. 23)

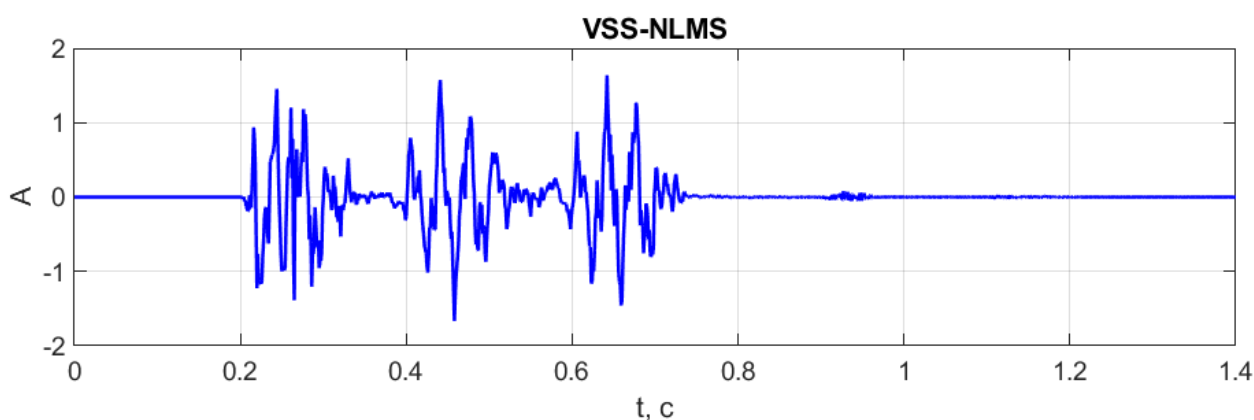


Рис. 23 Выделенный полезный сигнал с помощью VSS-NLMS

В работе [69] также рассмотрен алгоритм IP-NLMS (Improved Proportionate NLMS).

2.2.4 Разработанный двухкомпонентный алгоритм

С учетом рассмотренных алгоритмов и опираясь на идеи переменного-шаговых нормализованных алгоритмов (VSS-NLMS), представим шаг адаптации как две составляющие. С целью реагирования фильтра на внезапные выбросы (артефакты) вводится дополнительный коэффициент.

При этом изменение весов фильтра можно записать как:

$$w(n+1) = w(n) + \mu_1 e(n)x(n) + \mu_2 \frac{|e(n)|}{\sigma} e(n)x(n) \quad (27)$$

А шаг адаптации:

$$\mu_n = \mu_1 + \mu_2 \frac{|e(n)|}{\sigma}$$

Где коэффициент $\mu_1 \approx 0.3$ обеспечивает плавную адаптацию. Первый коэффициент μ_1 обеспечивает стабильную и устойчивую адаптацию весов фильтра к изменяющимся характеристикам фонового ЭМГ сигнала с помехами.

Второй коэффициент в формуле (27) $\mu_2 \approx 1.4$ – это шаг при больших ошибках, который автоматически усиливается, когда мгновенная ошибка $e(n)$ существенно превышает средний уровень шума (σ).

Значение σ – оценка стандартного отклонения фонового шума. Оценивается в состоянии покоя, то есть производится по пассивным (спокойным) сегментам сигнала, например, по первым (50-100) мс перед активацией мышцы. Это нужно для автоматической нормализации шага: для оценки текущей ошибки относительно фонового шума.

Выполнение второй части уравнения (1), для реагирования фильтра на резкие изменения амплитуды сигнала, которые происходят в связи с артефактами движения или смещения электродов, обеспечивается при условии: когда ошибка предсказания значительно превышает уровень шумовой компоненты, фильтр реагирует увеличенным размером шага.

При этом зададим условие:

$$|e(n)| > k\sigma,$$

Где $e(n)$ – ошибка между предсказанным и реальным значением сигнала, σ – оценка уровня шума на опорном окне, $k \approx 2$ – коэффициент заданный эмпирическим путем для уверенного отделения существенной ошибки от случайной шумовой флуктуации.

Такая структура расчета шага адаптации обеспечит быструю реакцию фильтра в моменты резких всплесков активности – например, при коротких мощных мышечных сокращениях или сильных внезапных помехах.

На основе предложенного алгоритма произведено моделирование и оценка полезной составляющей сигнала [118]. На рисунке 24 график выделенного полезного сигнала.

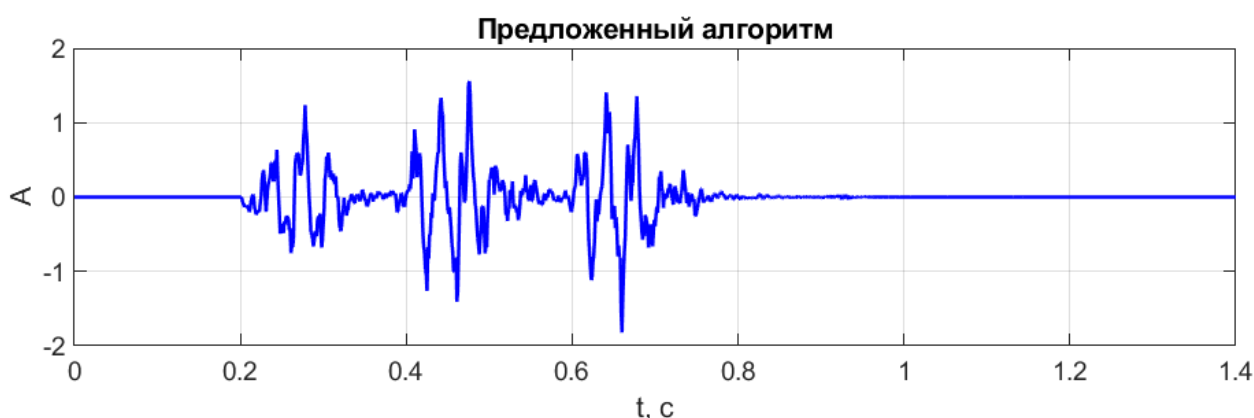


Рис. 24 Выделенный полезный сигнал

Также были определены диапазоны значений для μ_1 и μ_2 (рис 25) по параметру среднеквадратической ошибки (MSE). Параметр MSE изменяется в соответствии с графиком в зависимости от выбранных значений μ_1 и μ_2 . Оптимальные значения параметра μ_1 лежат в диапазоне 0,05–0,8. Значения параметра μ_2 подбираются в интервале 1,3–2,5 для рассмотренного сигнала ЭМГ.

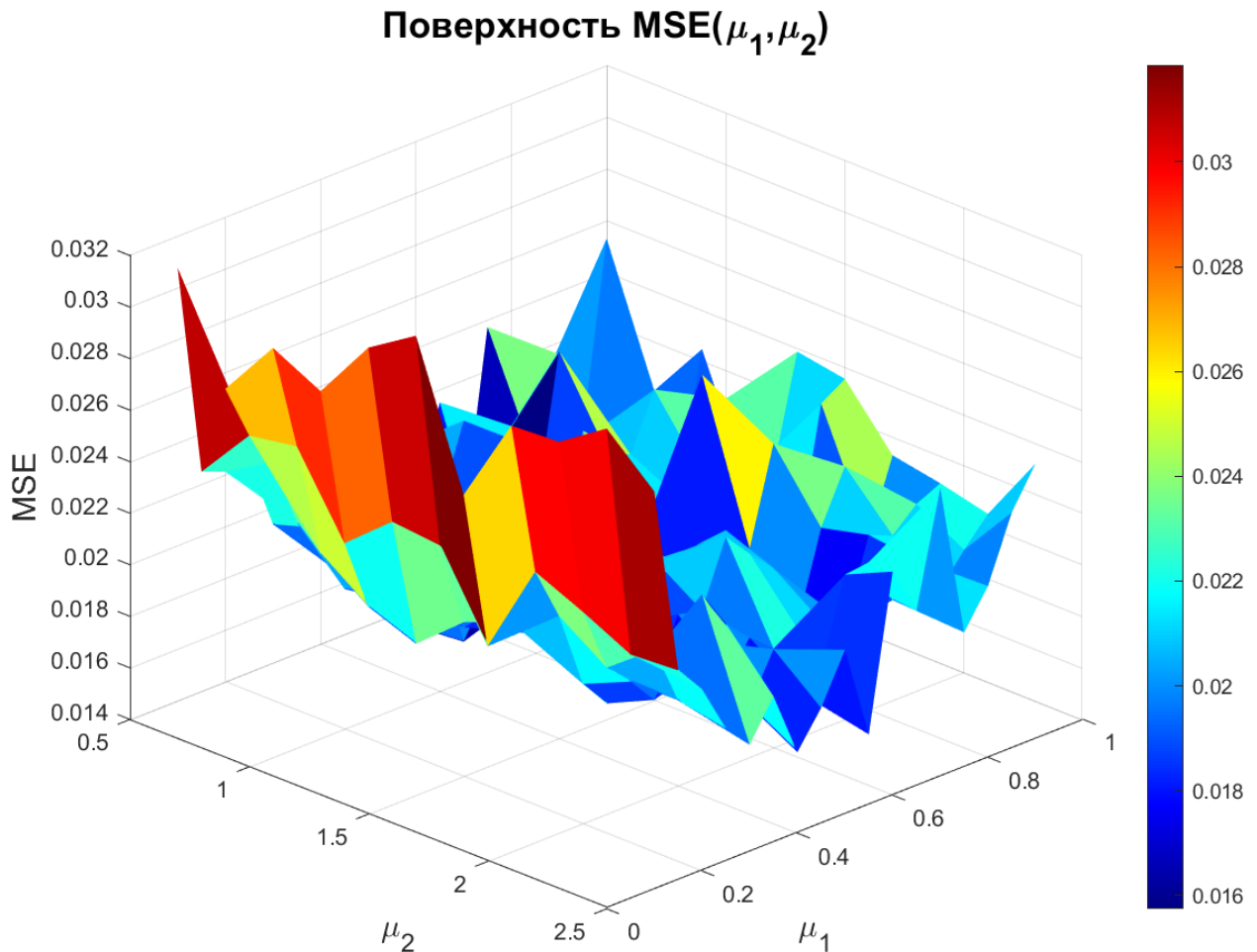


Рис. 25 Определение значений шага адаптации

Предложенный алгоритм и его параметры подстраиваются специально под сигнал электромиограммы. Кроме того, в отличие от алгоритма с переменным шагом имеет линейную зависимость шага адаптации.

2.4. Сравнение с существующими методами

Выделение полезной составляющей сигнала электромиограммы возможно разными методами цифровой обработки сигнала, включая частотно-временные методы (например, Вейвлет преобразование), спектральные методы (быстрое преобразование Фурье) и другие.

В данной работе рассмотрена возможность обработки ЭМГ-сигнала при движении пользователя в костюме телеприсутствия. При движении особое влияние на полезную составляющую оказывают артефакты движений, как было определено выше. Адаптивные алгоритмы позволяют менять коэффициенты фильтра в соответствии с характеристиками сигнально-помеховой обстановки. Определим критерии сравнения выделенных адаптивных алгоритмов.

2.4.1. Сравнительные критерии методов

С целью определения выигрыша рассмотренных методов и сравнения их между собой, выделим следующие параметры:

- 1) Среднеквадратическая ошибка.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \quad (28)$$

Где для каждого момента времени i необходимо найти разницу между значениями первого сигнала x_i и второго y_i

- 2) Коэффициент корреляции Пирсона (r):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (29)$$

Где $\bar{x}$ и $\bar{y}$ – средние арифметические значения сигналов, n – количество отсчетов

3) Соотношение сигнал/шум (SNR). Для ЭМГ определим мощность полезного сигнала во время сокращения мышцы и мощности шума в состоянии покоя.

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_c}{P_{ш}} \quad (30)$$

Кроме приведенных критериев, одной из важных составляющих является вычислительная сложность алгоритма. Поскольку она напрямую определяет, сможет ли система работать в режиме реального времени. Ранее определен критерий оптимальности работы – уменьшение задержки. А вычислительная сложность алгоритма напрямую влияет на длительность обработки сигнала.

2.4.2. Анализ преимуществ разработанного метода

Сравнительный анализ по выделенным критериям сведен в таблицу 2. В качестве сравнения выбраны адаптивные алгоритмы, рассмотренные выше.

Таблица 2. Сравнение характеристик адаптивных алгоритмов

Название алгоритма	MSE	Коэффициент корреляции	SNR, дБ
LMS	0.0539	0.4669	16.14
NLMS	0.0215	0.8318	19.90
VSS-LMS	0.0284	0.7924	19.30
IPNLMS	0.0227	0.8209	19.01
Двухшаговый	0.0224	0.8229	20.38

Сравнение адаптивных алгоритмов показало, что предложенный двухшаговый алгоритм обеспечивает наилучшее значение SNR (20.38 дБ) при сопоставимом уровне MSE (0.0224) и коэффициенте корреляции (0.8229). Это связано с тем, что двухшаговая структура позволяет разделить быстрое (грубое) подавление артефакта движения и последующую плавную адаптацию, тогда как классические алгоритмы LMS/NLMS реализуют единый процесс обновления коэффициентов с фиксированным адаптивным шагом.

При этом вычислительная сложность остаётся линейной у всех алгоритмов $O(L)$ по длине фильтра.

Выводы.

Предложено применение датчиков электромиографии для построения костюмов телеприсутствия. Показано, что при таком способе определения движения пользователя можно снизить суммарную задержку на ΔT равную разнице электромеханической задержке.

Проанализированы свойства ЭМГ сигнала, выделены основные шумовые компоненты, которым подвержен сигнал. При движении в костюме телеприсутствия пользователь создает дополнительные артефакты движения.

Предложен способ уменьшения влияния артефактов движения с помощью адаптивных алгоритмов. Разработана модификация адаптивного алгоритма, отличающаяся двухшаговой структурой переключения шага адаптации на основе порога ошибки.

Произведен сравнительный анализ адаптивных алгоритмов по значениям среднеквадратичной ошибки, отношению сигнал/шум и коэффициенту корреляции. Предложенный алгоритм при заданных шагах адаптации имеет наилучшие свойства (табл. 2).

ГЛАВА 3. МОДЕЛЬ КОСТЮМА ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ И МЕТОД ОРГАНИЗАЦИИ БЕСПРОВОДНЫХ КАНАЛОВ НАТЕЛЬНОЙ СЕТИ КОСТЮМА ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАПОВЕРХНОСТИ

3.1 Модель пользователя в костюме телеприсутствия на основе цилиндрической системы координат.

Сенсорная подсистема костюма телеприсутствия является сложной составляющей сети. Поскольку пользовательское оборудование находится в непосредственном взаимодействии с телом человека – возникают постоянные изменения характеристик радиоканала. В процессе эксплуатации и движения пользователя происходит экранирование и затухание радиосигнала, что в свою очередь оказывает влияние на характеристики сигнала.

Одной из особенностей при движении человека – костюм меняет форму, образуя заломы или изгибы. Кроме того, тело человека оказывает влияние на распространение радиоволн. Поэтому при оценке характеристик радиоканала используемых нательных сенсоров вблизи пользователя или при моделировании отдельных элементов необходимо использовать поверхности, приближенные к реальным и учитывать изменение электромагнитных характеристик.

Для исследования нательной сенсорной сети костюма телеприсутствия и метода организации беспроводных каналов необходимо определить наиболее подходящую модель. Отдельные сегменты тела человека удобно представить в виде цилиндрической поверхности. (рис.26) Рассмотрим положение сенсоров в костюме телеприсутствия в цилиндрической системе координат (ЦСК). Тогда датчик или излучающее устройство будет иметь 3 координаты в точке $A(r, \varphi, z)$, где ось z совпадает с продольной частью тела. причем координата r при движении всегда неизменна, поскольку расположение устройства в костюме относительно

центральной выбранной оси неизменно. Тогда примем изменение координат при движении:

$$\begin{cases} r(t) = \text{const}, \\ \varphi(t) = \varphi_0 + \Delta\varphi(t), \\ z(t) = z_0 + \Delta z(t). \end{cases} \quad (31)$$

Где $\Delta\varphi$ – угол изменения вокруг продольной оси, Δz – перемещение вдоль продольной оси.

Такое представление отдельных сегменты тела в виде цилиндрической системы координат позволяет учитывать особенности и позволяет сократить вычисления относительно тела пользователя с постоянной компонентой радиуса-вектора.

Длина пути вдоль поверхности цилиндра между излучателями определяется:

$$d = \sqrt{(r\Delta\varphi)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (32)$$

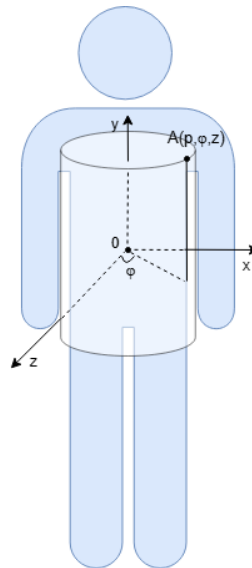


Рис. 26 Описание костюма с помощью ЦСК

С использованием такой системы координат возможна оптимизация физического положения узлов (датчиков) в беспроводной нательной сети, поскольку учтены физические особенности пользователя.

На вход приемника помимо сигнала прямой видимости поступают отраженные волны вследствие особенностей распространения радиоволны от передатчика к приемному устройству.

При описании модели с использованием ЦСК, допустим при распространении волны от одного сегмента тела до другого. Пусть на одной цилиндрической поверхности тела имеется два излучателя (приемник и передатчик). Тогда для случая, когда радиус цилиндра больше длины волны продольная составляющая вектора напряженности электромагнитного поля будет иметь несколько составляющих [93]:

$$E_z = \sum_{s=1}^{\infty} A_s (e^{-iv\varphi} + e^{-iv(2\pi-\varphi)}) \quad (33)$$

Где суммируются волны, огибающие цилиндрическую поверхность. v – комплексная постоянная распространения, описывающая затухание электромагнитного поля

В точке приема складываются два основных луча:

$$E = A_1 e^{-iv\varphi} + A_2 e^{-iv(2\pi-\varphi)} \quad (34)$$

Таким образом, в зависимости от расположения приемника и передатчика относительно друг друга – меняются фазовые соотношения приемных волн.

Например, если приемник и передатчик находятся напротив и фазы равны π , то лучи складываются синфазно. При движении же происходит смещение и волны могут приходить в противофазе, что, в свою очередь может вызвать интерференционные замирания.

Для работы беспроводных систем связи вблизи тела пользователя одним из факторов, оказывающих существенное влияние на радиоканал, является изменение характеристик электромагнитного поля (излучения антенны) из-за тела пользователя. В условиях постоянного движения пользователь создает дополнительные искажения и поглощение радиоволн.

Необходимо учитывать особенности строения тела человека. Отдельные участки при моделировании можно задать с помощью диэлектрической проницаемости (ϵ) и удельной проводимости (σ), связь которых осуществляется через комплексную диэлектрическую проницаемость:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon' - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \quad (35)$$

Далее рассмотрим модель радиоканала вблизи тела пользователя, основываясь на физических особенностях распространения сигнала.

3.2 Модель радиоканала вблизи тела пользователя

Стандартные модели потерь на трассе распространения радиоволн неприменимы для связи BAN. Из-за быстро меняющихся характеристик канала связи, что вызвано движением пользователей. Несмотря на это, были проведены исследования моделей потерь на трассе распространения сигнала для каналов BAN для определенных сценариев. [96, 97]

В стандарте IEEE (рабочей группы 802.15.6) описана модель канала (CM3), учитывающая расстояние между поверхностями тела пользователя для диапазона частот до 10.6 ГГц. [92] На рисунке 27 представлены сценарии расположения датчиков в нательных сетях.

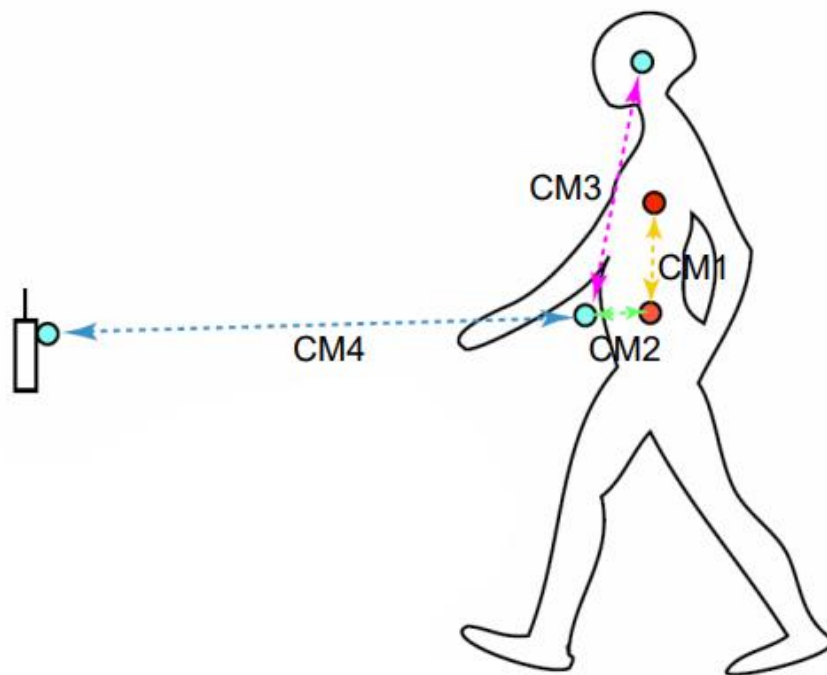


Рис. 27 Модель каналов сети WBAN [94]

Для костюма телеприсутствия актуальны сценарии между датчиками в самом костюме (CM3), поскольку как было показано в предыдущих главах, они взаимодействуют с общим хабом, расположенным на самом костюме. Модель радиоканала CM3 должна учитывать влияние распространения электромагнитной волны вдоль поверхности тела, экранирование тканями тела, изменение взаимной ориентации антенн (поляризация), многолучевое распространение и вариативность канала при движении пользователя. Также актуальным становится сценарий взаимодействия с внешним излучателем, например, базовой станцией (CM4).

Взаимодействие сенсорных узлов в костюме телеприсутствия по беспроводным каналам, расположенным в непосредственной близости от тела пользователя становится затруднительным ввиду физических особенностей такого канала связи. Характеристики таких радиолиний существенно отличаются от сценариев распространения радиоволны в свободном пространстве. Для описания передачи между двумя устройствами, расположенными на поверхности костюма можно принять модель канала CM3 [92].

Выделим состояния трассы в канале при движении пользователя:

- 1) Состояние прямой видимости
- 2) Волна частично перекрыта (например, рукой)
- 3) Область тени (прямая линия полностью перекрыта)

Исходя из особенностей изменения характеристик при движении пользователя, затухание в такой линии передач можно задать (рис.28): [103]

$$PL(d) = PL0 + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X\sigma \quad (36)$$

Где d - расстояние между датчиками, n – коэффициент затухания, PL – потери канала, [дБ]; $X\sigma$ – изменение в канале при движении (область тени)

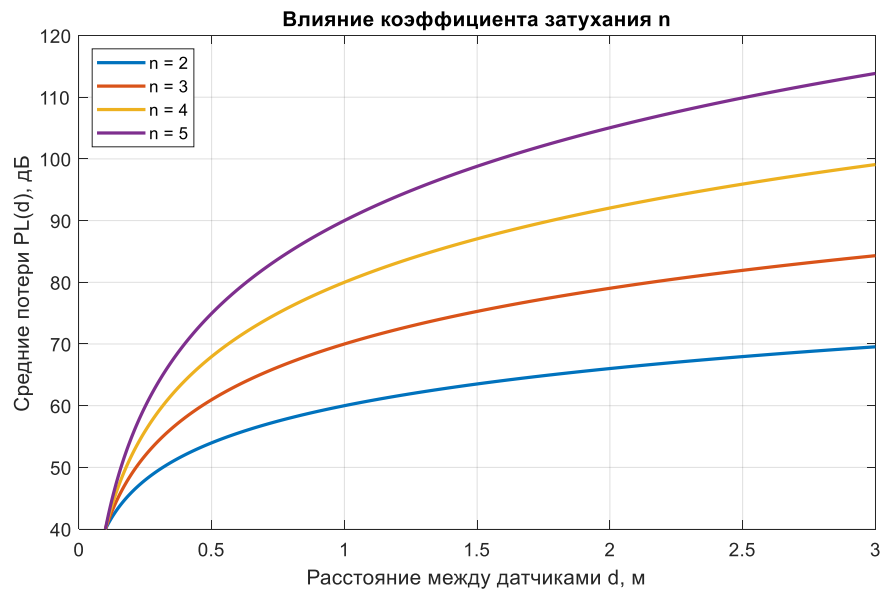


Рис. 28 Влияние коэффициента затухания на потери в радиоканале

Влияние теневого замирания зависит от большого количества факторов и его оценить можно среднеквадратическим отклонением σ случайной составляющей $X\sigma$. Например, по данным [103], для поддиапазона с центральной частотой 4.4928 ГГц значение σ 6,07дБ в условиях NLOS (non-line-of-sight, с англ., распространение без прямой видимости).

Таким образом, в связи со сложной геометрией тела и множества возможных различных траекторий распространения с учетом особенностей радиолинии существует необходимость разделения на сценарии распространения.

В стандартной модели СМЗ затухание радиосигнала определяется скалярным расстоянием между сенсорами нательной сети. Для костюма телеприсутствия необходимо учитывать особенности строения тела пользователя и приближенные модели, например, для анализа использовать подходящие системы координат. Поскольку одинаковое расстояние между сенсорами (приемо-передающими устройствами в том числе) могут соответствовать различным положениям на поверхности тела и разным условиям видимости.

3.3 Модель радиоканала пользователя в костюме телеприсутствия с внешней БС.

В материалах рекомендаций IEEE 802.15.6 модель канала от поверхности тела до внешней стороны (связь с внешним узлом) описывает модель канала СМ4 (рис. 29). Сценарий взаимодействия пользователя в костюме телеприсутствия, например, с сетевым роботом.

Такая линия связи с костюмом телеприсутствия предназначена для передачи общих данных и управляющих команд между хабом, размещенным на костюме, и внешней базовой станцией. В отличие от линии СМЗ, линия связи СМ4 включает дополнительный участок распространения вне костюма.

Связь в этом сценарии является сложной задачей, поскольку она учитывает затухание, обусловленное как телом человека, так и внешней средой беспроводной связи. Модель такого канала задается уравнением импульсной характеристики канала [106]:

$$h(t) = \sum_{m=0}^{L-1} \alpha_m \delta(\tau - \tau_m), \quad (37)$$

где α_m – комплексная амплитуда m -го луча, τ_m – задержка прихода луча, δ -функция Дирака

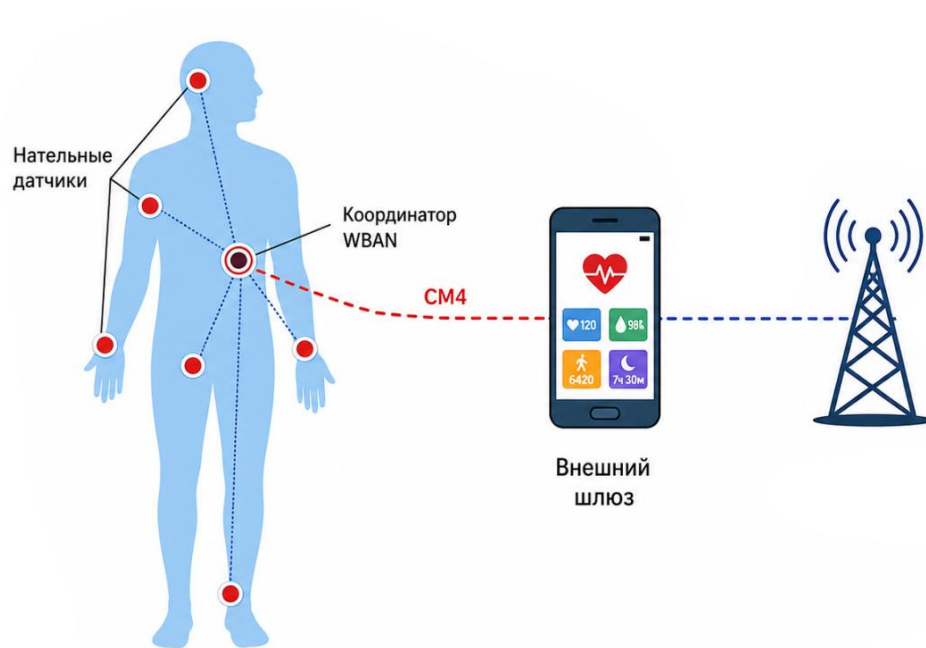


Рис. 29 Схема взаимодействия CM4

3.4 Особенности излучателей WBAN.

Одной из важных составляющих сети костюма телеприсутствия – является излучающее устройства. Излучающие устройства в сетях WBAN расположены непосредственно вблизи тела человека. При разработке устройств для беспроводных нательных сетей необходимо учитывать электромагнитные свойства устройств, влияющие на пользователя.

Допустим, антенна, интегрированная в костюм телеприсутствия, при движении пользователя претерпевает постоянные физические изменения. Одной из ключевых характеристик антенн является диаграмма направленности (ДН). А при размещении одного и того же излучателя на плоской и цилиндрической поверхностях его диаграмма направленности, как правило, различается, поскольку меняются геометрия поверхности (рис. 30) – откуда следует изменение

распределения наведённых токов и фазовых соотношений между элементарными источниками излучения на апертуре. Ввиду всего выше сказанного для дальней зоны это отражается в изменении угловой функции диаграммы направленности.

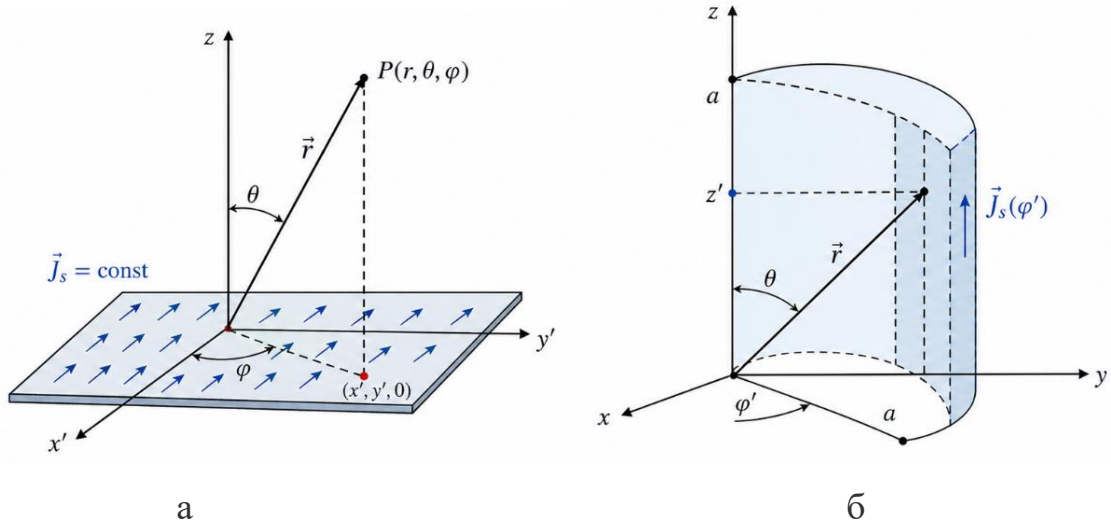


Рис. 30 Излучающие поверхности а) плоская б) цилиндрическая

Для произвольного распределения поверхностных токов $\vec{J}_s(\vec{r}')$ напряженность электромагнитного поля в дальней зоне можно записать в виде [104,105]

$$\vec{E}(r, \theta, \varphi) \cong j\omega\mu \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \int_S \vec{J}_s(\vec{r}') e^{j\vec{k}r \cdot \vec{r}'} dS \quad (38)$$

Откуда очевидно, что различие между, плоской и цилиндрической поверхностями определяется площадью, законом распределения токов на поверхности и фазовым множителем.

Для плоской поверхности $z=0$ точка поверхности имеет координаты $(x', y', 0)$, и множитель принимает вид:

$$r \cdot \vec{r}' = x' \sin\theta \cos\varphi + y' \sin\theta \sin\varphi \quad (39)$$

Для цилиндрической поверхности радиуса a , точка поверхности задаётся как $(a \cos \phi', a \sin \phi', z')$, а множитель преобразуется к виду:

$$r \cdot \vec{r}' = a \sin \theta \cos(\varphi - \varphi') + z' \cos \theta \quad (40)$$

Появление функции $\cos(\varphi - \varphi')$ и изменение распределения токов по изогнутой поверхности приводит к изменению диаграммы направленности по сравнению с плоским случаем.

Для излучателя WBAN в цилиндрической системе координат (r, φ, z) с целью учёта геометрии тела человека. Антенну и ее элементы необходимо рассматривать как распределённые по поверхности цилиндра, аппроксимирующего сегмент тела.

Поскольку излучающие системы находятся в непосредственной близости к человеку. Системы беспроводной нательной сети должны быть безопасными для организма. Воздействие электромагнитного поля на организм человека оценивают по удельной скорости поглощения электромагнитной энергии тканями. Коэффициент удельного поглощения энергии SAR (с англ. specific absorption rate) в тканях в соответствии с ГОСТ МЭК 62209-1-2008 вычисляется по формуле (6).

SAR характеризует мощность, поглощаемой единицей массы ткани и измеряется в ваттах на килограмм. Следует учитывать, что ГОСТ МЭК 62209-1-2008 устанавливает методику оценки коэффициента поглощения для ручных устройств связи в диапазоне частот 300 МГц – 3 ГГц.

Согласно международным ограничениям используют требования FCC (с англ. Federal Communications Commission) и ICNIRP (с англ. International Commission on Non-Ionizing Radiation). По стандарту FCC коэффициент SAR должен быть ниже 1,6 Вт/кг на 1 г ткани. Согласно рекомендациям ICNIRP для диапазона от 100 кГц до 6 ГГц коэффициент не должен превышать 2 Вт/кг на 10 г ткани (для головы и туловища) и менее 4 Вт/кг для конечностей. [100]

3.5. Методы организации каналов нательной сети

Каналы связи между устройствами можно классифицировать по разным типам признаков, отражающие особенности их физической реализации. Методы

организации канала связи с точки зрения общей теории связи могут квалифицироваться в зависимости от физической среды передачи: по способу совместного использования ресурса канала выделяют методы временного, частотного, кодового, пространственного и комбинированного разделения, реализуемые в технологиях уплотнения и мультиплексирования; по режиму передачи (симплексные, дуплексные); по принципу коммутации (сетевой уровень) и др.

Рассмотрим организацию с точки зрения типа физической среды канала. Поскольку электромагнитные, пространственные и временные характеристики определяют параметры канала. Затухание, уровень помех, многолучевое распространение и др. Здесь в рамках разрабатываемого метода учитываем классификацию где рассматривается физическая среда, напрямую влияющая на качество передаваемой информации и своевременность (влияние на конечную задержку).

Соответственно возможно разделение организации канала (рис. 31) на проводные и беспроводные. Проводные каналы используют направляющую среду, параметры которой в значительной степени определяются конструкцией линии передачи. К ним относятся электрические линии связи, коаксиальные кабели, волноводы, витые пары и волоконно-оптические линии.

Беспроводные каналы используют неограниченную или частично ограниченную среду распространения. В зависимости от физической природы переносчика информации к ним относятся радиоканалы, акустические каналы.

Организация беспроводного канала связи в костюме телеприсутствия затруднительна, поскольку их характеристики зависят от расстояния между узлами, частоты, ориентации и поляризации антенн, движения пользователя, влияния тела человека, отражений от окружающих объектов, затенения и электромагнитной совместимости размещённых на костюме устройств.

С точки зрения степени воздействия на условия распространения беспроводной канал целесообразно подразделить на канал в неуправляемой среде и канал в управляемой электромагнитной среде.

В неуправляемой среде радиоканал является стохастическим: его коэффициент передачи, задержка, затухание, фазовые соотношения и интерференционная картина изменяются во времени и пространстве под действием внешних условий. В таком случае повышение качества связи достигается преимущественно средствами передатчика и приёмника: выбором модуляции и кодирования, управлением мощностью, пространственной обработкой сигналов, разнесением, формированием диаграммы направленности и алгоритмами коррекции ошибок.

Метод формирования канала с управляемой средой возможно с помощью метаповерхности. Исходя из их свойств такие структуры позволяют задавать амплитуду, фазу или поляризацию электромагнитной волны. [116-117]

Такое представление создаёт возможность улучшения отношение сигнал/шум, уменьшения взаимных помех между сенсорами вызванными электромагнитными составляющими поля. Реконфигурируемые поверхности рассматриваются как один из перспективных технологических компонентов будущих систем связи.

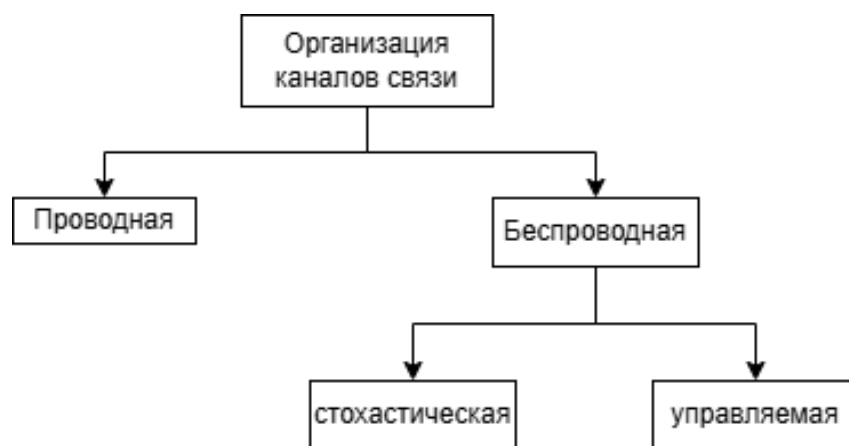


Рис. 31 Выделенные типы каналов связи

На рисунке 32 представлена структурная схема беспроводного канала связи между носимым сенсором и базовой станцией. На беспроводной канал передачи

данных между приемопередающими устройствами на линии связи с костюмом телеприсутствия оказывают влияние следующие факторы:

- замирание сигнала, зависящие от движения пользователя
- шумовые составляющие
- интерференция, уровень внешних и внутрисистемных помех
- полоса пропускания
- мощность передаваемого сигнала.

Указанные факторы определяют отношение сигнал/шум с учетом помех:

$$SNR = \frac{P_r}{N + I} \quad (41)$$

где P_r – мощность сигнала на входе приемника, N – уровень теплового шума, I – уровень внешних и внутрисистемных помех

Итоговым показателем является пропускная способность канала C , которая в идеализированном случае определяется формулой Шеннона–Хартли:

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (42)$$

Откуда увеличение полосы B или SNR приводит к росту пропускной способности. Напротив, повышение уровня шума, помех, затухания и замираний снижает SNR , что ограничивает достижимую скорость передачи данных между приемо-передающими устройствами костюма телеприсутствия и базовой станцией.

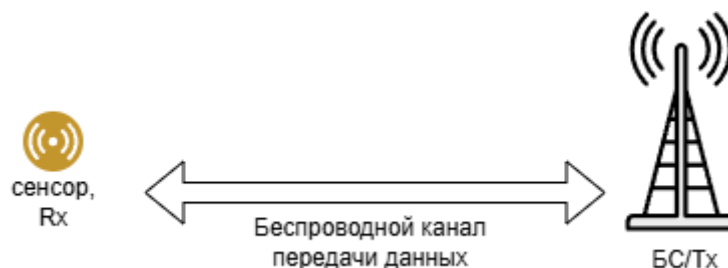


Рис. 32 Беспроводной канал

3.6 Анализ структуры метаматериала для костюмов телеприсутствия

Ввиду рассмотренных особенностей нательных сетей поиск уменьшения интерференционных замираний или уменьшение поглощения электромагнитной волны остается важной задачей. Часто используют адаптивные алгоритмы, разнесенный прием или увеличивают количество антенных систем. В нательных сетях это нецелесообразно, поскольку применение, допустим, алгоритмов диаграммообразования увеличивают потребление мощности, что в свою очередь сокращает работоспособность сенсоров.

Поиск пассивных решений и конструкций носимых устройств, а также изменение концепции пользовательских устройств может привести к новым технологическим решениям. Последние годы все чаще предлагают концепцию устройств с использованием метаматериалов.

К метаматериалам относятся искусственно созданные материалы, которые имеют периодическую структуру. Свойства таких ячеек определяют геометрическими размерами - размеры резонаторов и межэлементные расстояния существенно меньше рабочей длины волны.

Одиночные ячейки имеют разнообразную форму. Форма ячейки определяет диапазон рабочих частот и полосу пропускания. Примеры ячеек: Edge-coupled SRR (рис. 33а), Omega SRR (рис 33 б) и S ring (рис. 33 с). Иногда ячейка имеет симметричную структуру с обратной стороны подложки для поддержки требуемого электромагнитного отклика. Такая структура, когда проводящие элементы расположены между диэлектрической подложкой, обеспечивает взаимную индуктивность между токами на верхнем и нижнем слоях металла, что в свою очередь позволяет изменять эквивалентные L и C . Таким образом, такая топология позволяет смещать резонансную частоту, кроме того, можно добиться меньших размеров. Также различают широкополосные и узкополосные типы структур метаматериалов. [98, 99]

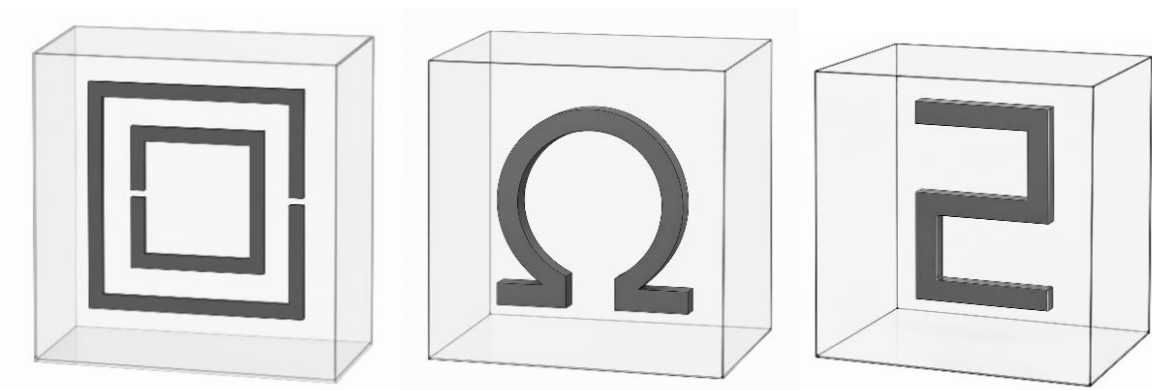


Рис. 33 а) Edge-coupled SRR б) Omega SRR в) S ring

Выделим типы материалов по их диэлектрическим свойствам. (рис 34) Большинство материалов обладают положительными характеристиками $\epsilon > 0$, $\mu > 0$ (DPS) – это обычные диэлектрики, такие как FR-4, duroid. В таких средах волна распространяется согласно классической теории об отражении и преломлении волн, а показатель преломления и волновое сопротивление определяются выражениями:

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}, Z = Z_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r}{\mu_r}} \quad (43)$$

Где $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$, $\mu_r = \mu / \mu_0$, Z_0 – волновое сопротивление свободного пространства

Среда с $\epsilon < 0$, $\mu > 0$ (эпсилон-отрицательная ENG) такие показатели наблюдаются у плазмы в диапазоне частот, когда $\omega < \omega_p$, поскольку [19]:

$$\epsilon_p = 1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^2 \quad (44)$$

Если $\epsilon > 0$, $\mu < 0$ (MNG) – такими свойствами могут обладать некоторые гиротропные материалы (ферриты) в узком диапазоне частот.

Среды, которые имеют одновременно отрицательные диэлектрическую и магнитную проницаемостями (DNG), в природе не существует, но они могут быть искусственно созданы. В таких средах показатель преломления может быть отрицательным и определяться [99]:

$$n = -\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}, \quad n \approx -\left|\varepsilon_r\right|^{\frac{1}{2}}\left|\mu_r\right|^{\frac{1}{2}}\left[1 + \frac{j}{2}\left(\frac{\varepsilon''}{|\varepsilon_r|\varepsilon_0} + \frac{\mu''}{|\mu_r|\mu_0}\right)\right] \quad (45)$$

Создание структуры метаматериала с требуемыми электродинамическими свойствами сводится к синтезу элементарной ячейки, обеспечивающей необходимые электрические и магнитные характеристики.

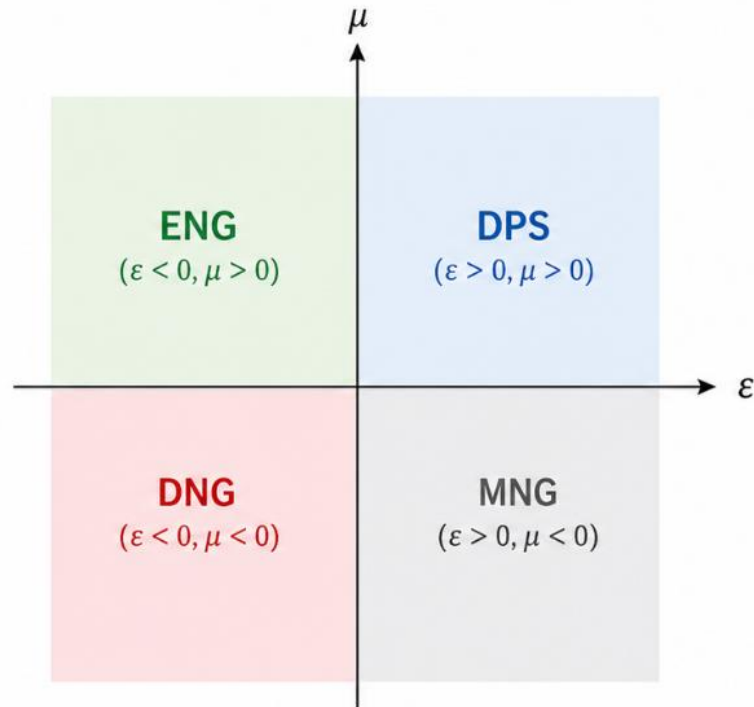


Рис. 34 Классификация материалов в зависимости от знака магнитной и диэлектрической проницаемостей

При использовании метаматериала меняются граничные условия среды распространения. Тогда коэффициент отражения с использованием метаповерхности становится комплексной величиной (45).

Рассмотрим сценарии применения метаповерхности в костюме телеприсутствия в качестве пассивных элементов:

- 1) Уменьшение поглощения электромагнитной волны

Рассмотрим применение искусственного магнитного проводника (от англ. Artificial Magnetic Conductor, AMC). Такой материал имеет свойства идеального магнитного проводника.

Пусть проводник AMC лежит в плоскости z , а нормаль направлена в сторону падающей волны. Тогда опишем граничные условия при падении волны на границу раздела сред с помощью:

$$E_t = Z_s(w)(n \times H_t) \quad (46)$$

Где E_t и H_t – касательные (тангенсальные) составляющие компоненты векторов электрического и магнитного поля, $Z_s(w)$ – комплексное сопротивление, $w = 2\pi f$

В отличие от идеального диэлектрического проводника для которого $Z_s = 0$, в резонансной области AMC выполняется условие:

$$Z_s(w) > Z_0 \quad (47)$$

Где Z_0 – волновое сопротивление воздуха

При $Z_s \rightarrow \infty$, $H_t \rightarrow 0$ – вблизи собственной резонансной частоты AMC обладает свойствами РМС.

Поскольку коэффициент отражения (Γ) связан с Z_s :

$$\Gamma = \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} \quad (48)$$

Для AMC выполняется условие (47), коэффициент стремится к 1 и отраженная электромагнитная волна вблизи резонансной частоты уменьшает эффект от изменения фазы волны.

2) Направляющие свойства метаповерхности.

Свойство направлять электромагнитную волну задается с помощью характеристик среды, импеданса и пространственного распределения фазы. [107]

Распространение гармонической волны описывается волновым числом:

$$k = w\sqrt{\mu_a \varepsilon_a} \quad (49)$$

И характеристическим сопротивлением в первом приближении:

$$Z = \frac{\mu_a}{\varepsilon_a} \quad (50)$$

Поэтому, можно искусственно задавать фазу волны (фазовый сдвиг при отражении или прохождении волны), амплитуду, поляризацию, выделять полосы пропускания.

Рассмотрим случай нормального падения электромагнитной волны на поверхность раздела двух сред (рис. 35). Пусть, на поверхности костюма телеприсутствия метаматериальный слой имеющий толщину d , причем $d \ll \lambda$.

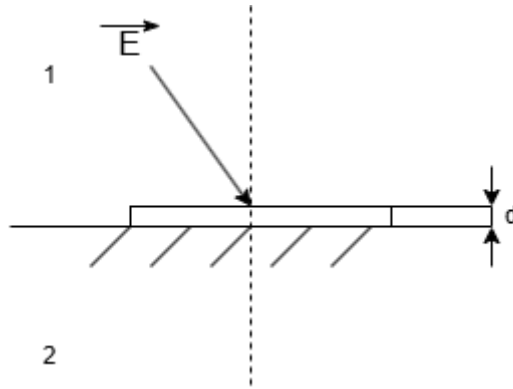


Рис. 35 Падение волны на поверхность раздела сред

Для слоя метаповерхности входной импеданс полного сопротивления будет определен как импеданс для параллельно соединенных компонентов [114]:

$$Z_{\text{общ}} = \left(\frac{1}{Z_{\text{м}}} + \frac{1}{Z_2} \right)^{-1} \quad (51)$$

Где $Z_{\text{м}}$ – собственный поверхностный импеданс метаповерхности, который зависит от ее конструкции, Z_2 – входной импеданс второй среды.

Тогда коэффициент отражения или прохождения электромагнитной волны становится зависимой величиной от $Z_{\text{общ}}$, например коэффициент отражения можно изменять с учетом $Z_{\text{м}}$:

$$R = \frac{Z_{\text{общ}} - Z_1}{Z_{\text{общ}} + Z_1} = \frac{\left(\frac{1}{Z_M} + \frac{1}{Z_2}\right)^{-1} - Z_1}{\left(\frac{1}{Z_M} + \frac{1}{Z_2}\right)^{-1} + Z_1}, \quad (52)$$

Где Z_1 – характеристическое сопротивление первой среды.

Поскольку мощность электромагнитной волны пропорциональна напряженности имеем:

$$P \sim E^2 \quad (53)$$

$$E_{\text{отр}}^2 = |R^2| * E_{\text{пад}}^2$$

Таким образом, возможна концепция управляемого радиоканала, в котором уровень паразитного излучения является управляемым параметром. Такое представление возможно благодаря изменению поверхностного импеданса метаповерхности, что позволяет подавлять нежелательные моды электромагнитной волны.

В работе [95] представлен расчет элементарной ячейки метаматериала, который обладает высокоимпедансными свойствами и служит для минимизации обратного излучения SAR.

3.7 Моделирование и анализ ячейки метаматериала для костюма телеприсутствия на частоте 5 ГГц

Резонансная частота ячейки SRR определяется геометрическими размерами внутренних размкнутых колец. Такая конструкция позволяет получить отрицательную магнитную проницаемость в диапазоне частот. Наведенный магнитный момент (перпендикулярный плоскости ячейки) возникает, когда

внешнее магнитное поле пронизывает плоскость кольца. Таким образом, изменение магнитного потока приводит к возбуждению индуцированного тока.

Такой элемент можно рассматривать как колебательный LC-контур (рис 35), где влияние на сдвиг центральной частоты оказывают размеры внутренних колец, расстояние между ними (w) и разрез (d). Индуктивность образуется на самом проводящем кольце, а емкость образуется в зазоре. [101]

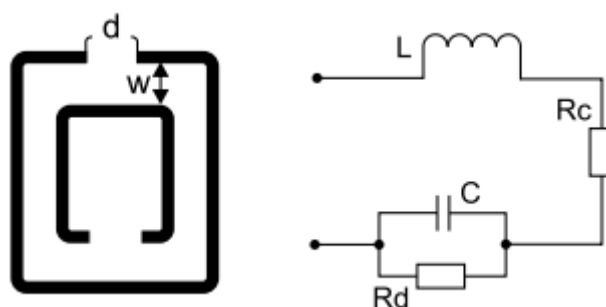


Рис. 36 Эквивалентная схема ячейки SRR [101]

На основе рассмотренной литературы произведен расчет элементарной ячейки SRR. [95, 99, 101, 102] Получены зависимости размеров разреза колец от частоты и емкости (рис. 36). Далее выполнена программная оптимизация размеров колец для рабочей частоты.

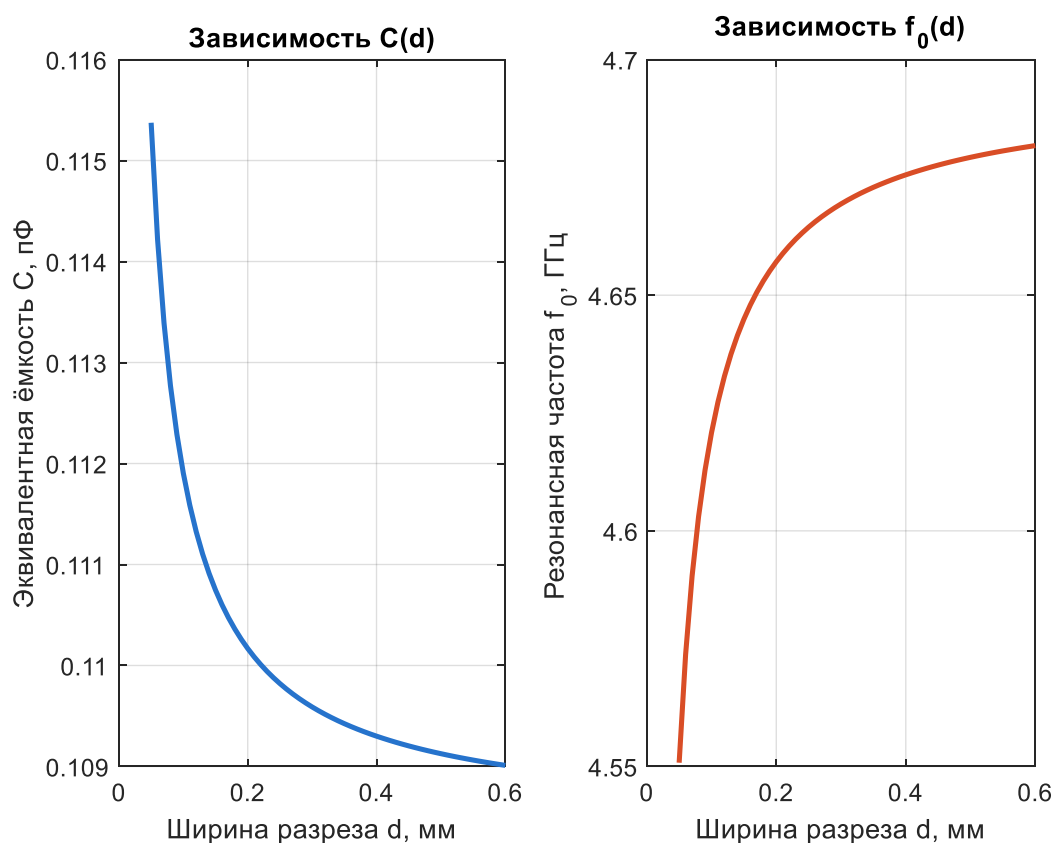


Рис. 37 Зависимость характеристик от ширины разреза кольца резонатора

Для центральной частоты 4,7 ГГц значения индуктивности и емкости будут соответствовать $L=10.6$ нГн и $C=0.11$ пФ.

Создана одиночная ячейка (рис 37) в программе HFSS с размерами подложки (9.5x9.5x1.6) мм, обеспечивающая резонансный магнитный отклик и высокий поверхностный импеданс в диапазоне 5 ГГц. Малые геометрические размеры SRR-ячейки относительно длины волны обеспечивают низкий профиль экранирующего слоя, что делает выбранную метаповерхность удобной для интеграции в цилиндрические сегменты WBAN-устройств.

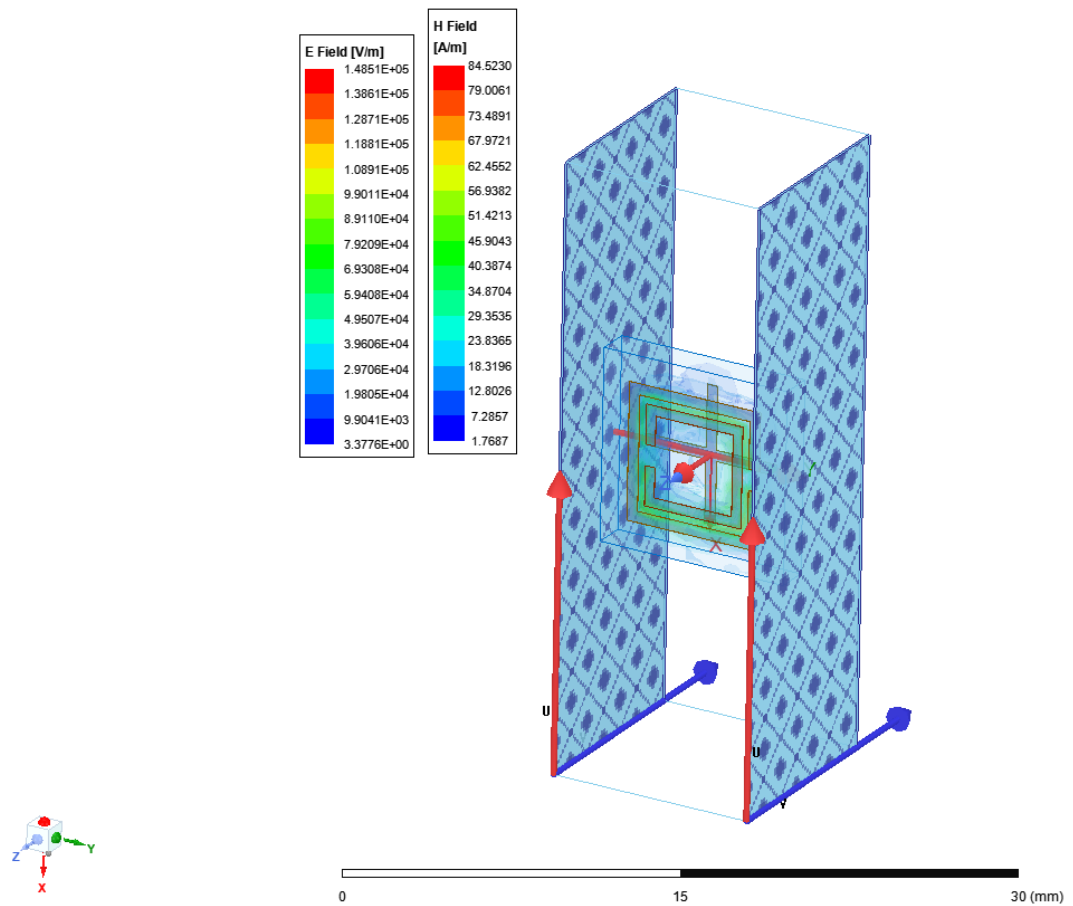
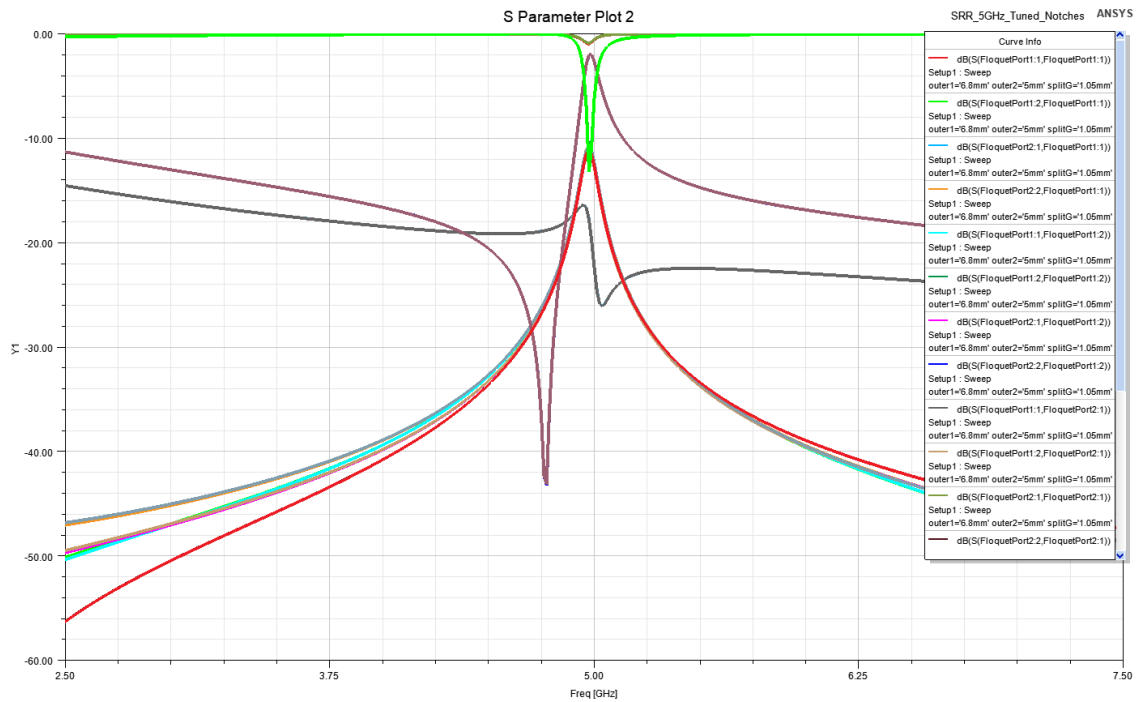


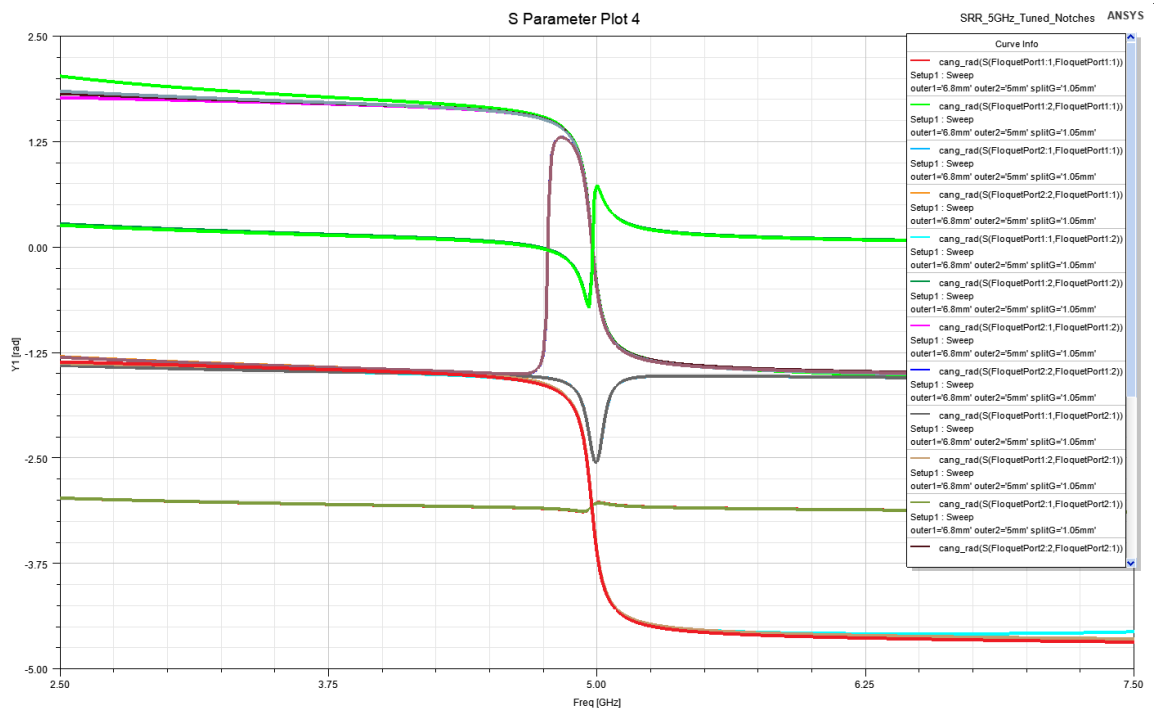
Рис. 38 Задание граничных условий и распределение вектора напряженности

На основе сформированной ячейки первого приближения произведена параметрическая оптимизация. Такая структура обладает резонирующими свойствами на частоте 5 ГГц. Также при изменении радиуса кривизны подложки до 30 мм характеристики остаются неизменными.

На рисунке 38 представлены S-параметры для оптимизированных размеров элементарной ячейки. Вблизи частоты 5 ГГц наблюдается резонирующие свойства основных мод электромагнитной волны.



a)



б)

Рис. 39 S-параметры

На рисунке 39 представлены частотные зависимости действительной $\epsilon'(f)$ и мнимой $\epsilon''(f)$ частей эффективной диэлектрической проницаемости,

смоделированной метаповерхности. Реальная часть (зелёная кривая) демонстрирует резкий дисперсионный переход вблизи резонанса: при увеличении частоты она монотонно изменяется и в узком диапазоне частот быстро проходит через нуль, что свидетельствует о формировании области с отрицательной эффективной проницаемостью. Мнимая часть (красная кривая) имеет выраженный узкий максимум на резонансной частоте, отражающий рост потерь.

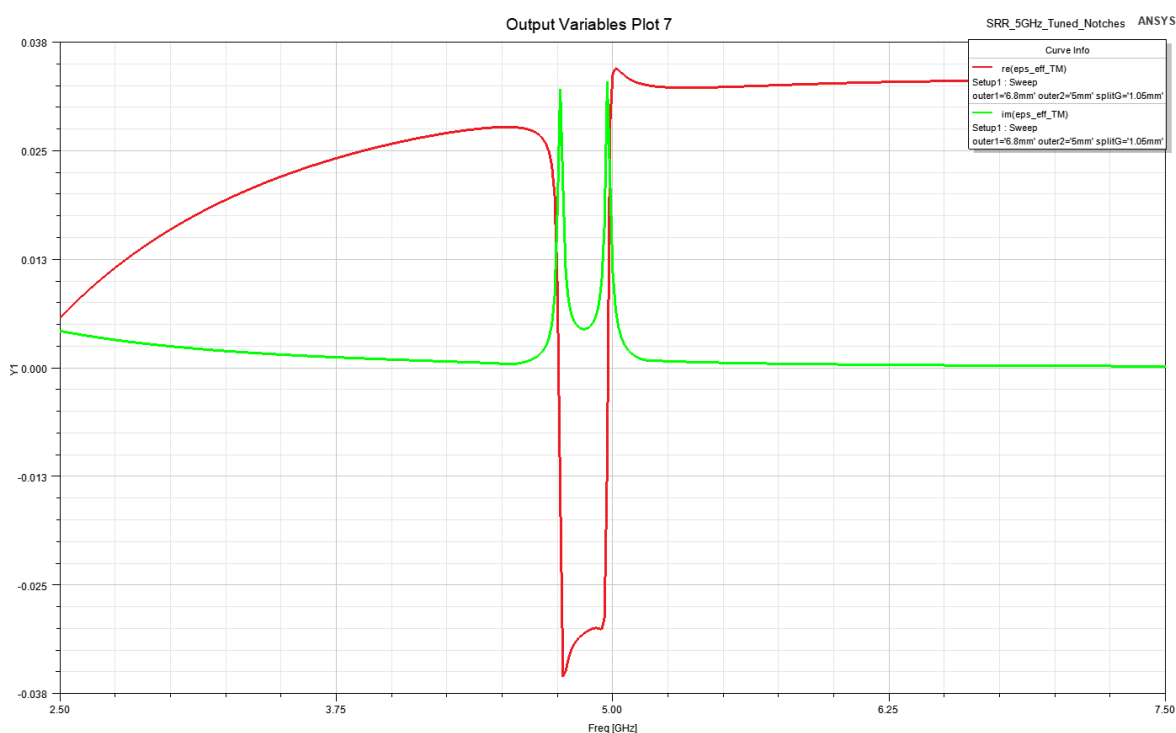


Рис. 40 Значения диэлектрической проницаемости

На рисунке 40 показаны характеристики магнитной проницаемости вблизи резонансной частоты. Частотные зависимости действительной $\mu'(f)$ и мнимой $\mu''(f)$ частей эффективной магнитной проницаемости. Реальная часть (зелёная кривая) демонстрирует резонансную дисперсию: при удалении от резонанса её значение остаётся близким к единице, тогда как в узкой области вокруг резонансной частоты наблюдается резкий переход и формирование диапазона частот с отрицательной эффективной магнитной проницаемостью $\mu' < 0$. Такое поведение соответствует возникновению сильного магнитного отклика за счёт циркуляционных токов в

SRR-структуре и является признаком метаматериала. Мнимая часть (красная кривая) имеет выраженный узкий максимум в окрестности резонансной частоты.

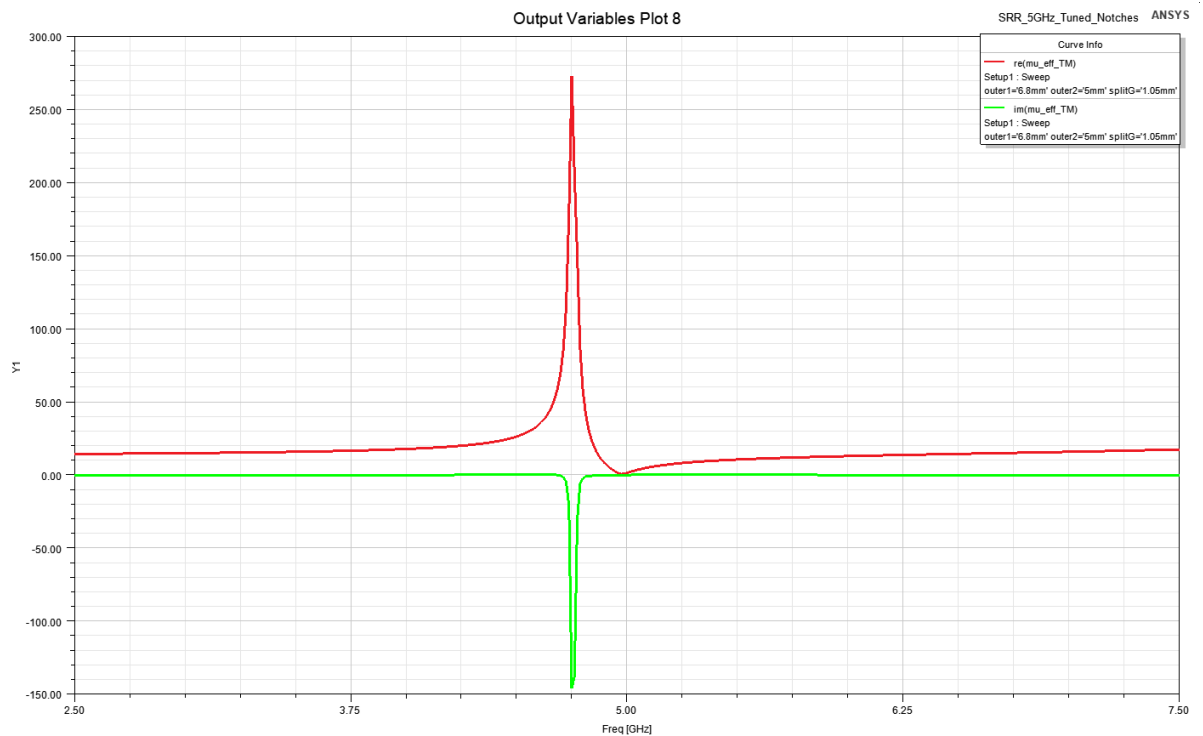


Рис. 41 Значения магнитной проницаемости

На рисунке 41 представлена частотная зависимость комплексного волнового сопротивления метаповерхности полученного на основе извлечённых эффективных параметров. Наблюдается характерное резкое изменение в области резонансной частоты

Результаты моделирования демонстрируют возможность создания структуры с отрицательными параметрами диэлектрической и магнитной проницаемостей в узком диапазоне рабочих частот.

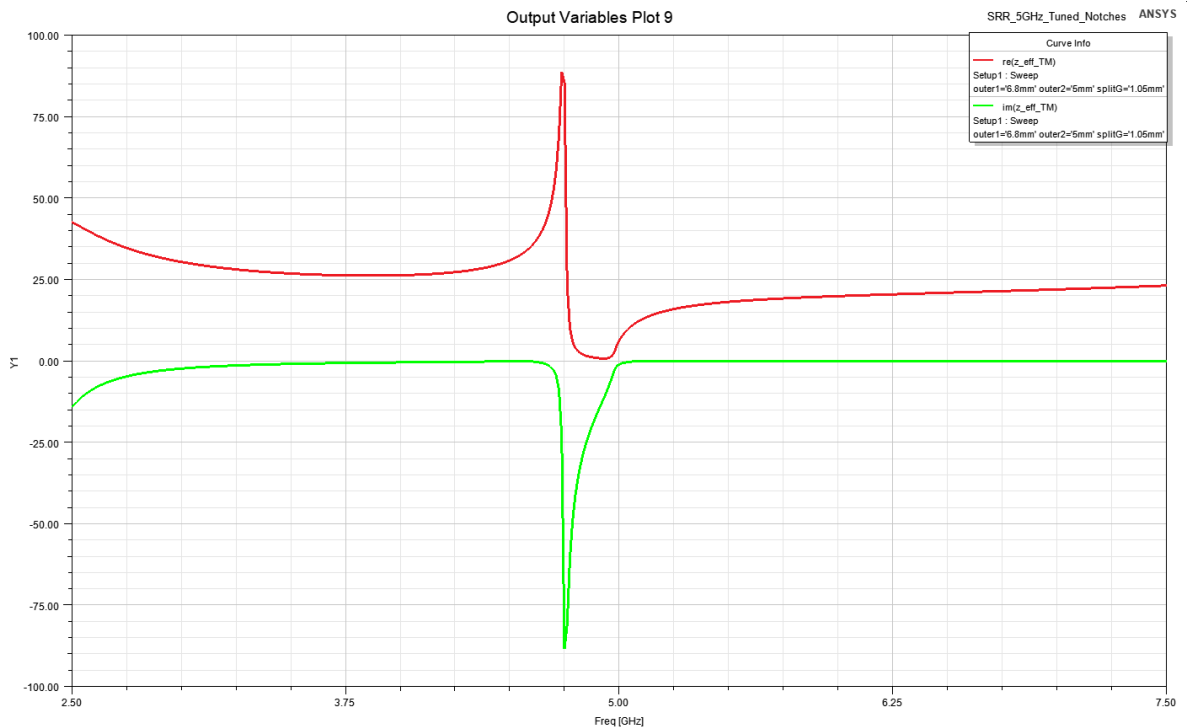


Рис. 42 Волновое сопротивление

Управление формированием диаграммы направленности возможно в сложных системах, с использованием адаптивных алгоритмов. На вход антенных элементов подаются распределенные весовые коэффициенты в связи с требованием угла сканирования. [115] Конечно, в нательных сетях нецелесообразно такое управление лучом диаграммы направленности. Для носимых устройств одним из ключевых требований является обеспечение малой потребляемой мощности при сохранении приемлемых характеристик связи

Метаповерхность, размещенная в конструкции костюма телеприсутствия, может обеспечивать управление фазой, амплитудой и поляризацией электромагнитной волны. За счет этого возможно подавление нежелательных поверхностных волн или уменьшать связь между близко расположенными антеннами, что особенно важно для сверхплотных сенсорных нательных сетей костюмов телеприсутствия.

Таким образом, возможность применения метаповерхности в костюме телеприсутствия для повышения общего отношения сигнал/шум и снижения

паразитного излучения. На поверхности костюма большое количество излучающих элементов, поэтому дополнительно возникающие электромагнитные поля образуют дополнительные паразитные излучения.

Отношение сигнал шум:

$$SNR = \frac{P_c}{P_{ш}} = \frac{P_c}{P_{тш} + P_{шм}} \quad (54)$$

Где P_c – мощность полезного сигнала, $P_{тш}$ – тепловые потери, $P_{шм}$ – вносимые потери из-за паразитного излучения.

Свойство метаповерхности управления электромагнитной волной позволяет формировать диаграммы направленности или снижать поле рассеяния в заданных угловых областях. Этот эффект подтвержден экспериментальными и численными результатами. [113, 102] В результате применения метаповерхности суммарное отношение сигнал/шум в канале возрастает.

Выводы

В данной главе диссертационной работы произведен анализ типов беспроводных каналов в костюме телеприсутствия. На этой основе произведен анализ их характеристик и недостатков. Выделены два типа: СМ3 и СМ4, характеризующиеся разными способами описания распространения электромагнитных волн и затухания радиосигнала. Определены физические особенности распространения радиосигнала.

Предложен метод описания пользователя в костюме телеприсутствия с использованием цилиндрической системы координат. На этой основе выделены характеристики распространения радиоволны и возможные причины замираний сигнала.

В данной главе предложена метод организации беспроводных каналов нательной сети с применением метаповерхностей в элементах костюма телеприсутствия. Такой способ позволяет минимизировать вероятность глубоких замираний в точке приема за счет пассивных элементов для сценария радиолинии

в костюме телеприсутствия СМЗ. Свойства управления фазой и амплитудой электромагнитных волн за счет диэлектрических особенностей такого материала позволяют утверждать о возможной будущей интеграции в пользовательские устройства как элементы пассивного управления.

Выполнен расчет и получены зависимости размеров от резонансной частоты ячейки SRR. Полученные частотные и фазовые характеристики метаповерхности являются исходными данными для последующей интеграции в носимые антенные модули телекоммуникационных систем, включая узлы WBAN и элементы костюма телеприсутствия.

Моделирование показало, что разработанный элемент позволил сохранить характеристики при изменяющейся кривизне подложки радиусом до 30 мм.

ГЛАВА 4. МОДЕЛЬ И МЕТОД ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ В КОСТЮМЕ ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ С АВТОНОМНЫМИ СЕТЕВЫМИ РОБОТАМИ

Ввиду особенной специфики костюмов телеприсутствия как пользовательских устройств, включая их нателльные сети, а также типа услуг - Тактильный интернет, и как следствие потенциала масштабного их применения для доступа к сервисам и услугам метавселенных, требуется разработка новых моделей и методов построения сетей для взаимодействия групп костюмов телеприсутствия с сетью.

В документах МСЭ широко используется понятие автономных сетей и вводится понятие автономных сетевых роботов. В то же время сетевые роботы могут выполнять функции ретрансляторов и сетевых координаторов. Данные узлы способны динамически формировать сетевую инфраструктуру и выполнять функции подвижных сетевых узлов в интегрированных сетях 6G/IMT-2030.

В отличие от стационарных узлов подвижные сетевые роботы способны изменять свое положение с учетом пространственного распределения пользователей или для выполнения требований конкретных сервисов и приложений.

С учетом роста роботизированных платформ, используемых в задачах умного города, целесообразно рассмотреть их возможности как платформу, для построения динамических сетевых сегментов, которые могут улучшить покрытие сети, нивелировать спрос на подключение к стационарным базовым станциям, обеспечить связь в районах с отсутствием или плохим покрытием и пр.

Ввиду всего выше сказанного, использование автономных сетевых роботов в сетевой архитектуре может рассматриваться как способ повышения доступности, надежности или для выделения временной связи для групп пользователей в костюмах телеприсутствия.

Разработка методов выбора положения таких узлов, организации маршрутизации, представляет собой актуальную научно-техническую задачу для интегрированных сетей 6G/IMT-2030.

В данной главе предложен способ движения такого сетевого робота, который выступает в качестве робота-ретранслятора, на основе кластерной организации сети.

4.1 Существующие направления исследований и разработки международных стандартов в области автономных сетевых роботов.

Принятая и действующая рекомендация ITU-R M.2160-0 [72] от 2023 года содержит базовые определения, концепции и цели развития систем перспективной связи нового поколения (6G/IMT-2030). Одно из перспективно развивающихся направлений взаимодействие с сетевыми роботами. Они уже рассматриваются как часть сетевой архитектуры и могут выступать в качестве приложений доставки, обеспечивая передачу данных, сервисов и вычислительных функций.

Сетевой робот – это роботизированное устройство, подключенное к сети связи, такой как интернет или локальная сеть. Сеть может быть проводной или беспроводной и основываться на любом из множества протоколов, таких как TCP, UDP или 802.11. [76] Функционально такие роботы введены для помощи пользователями в различных сферах услуг.

Автономные сетевые роботы-доставщики уже представлены как часть сетевой архитектуры. В принятых документах [73,74] предложена архитектура и требования к взаимодействию автономных роботов в городской среде, представлены схемы взаимодействия для предоставления услуг пользователям. Сетевые роботы позволяют автоматизировать доставку и повысить скорость обслуживания в условиях высокой плотности городской инфраструктуры.

Одним из преимуществ использования сетевых роботов – они могут работать совместно с другими сетевыми устройствами, образуя распределённую сетевую

среду для предоставления услуг. Такая структура создаёт предпосылки для более гибкого управления потоками данных и ресурсами сети. Важным преимуществом является возможность адаптации движения роботов к изменяющимся условиям окружающей среды.

В рекомендации [75] представлен обзор сферы робототехники и модели «робототехника как услуга», а также описаны функциональные требования на основе различных сценариев применения робототехники в облачных вычислениях. Кроме того, данная Рекомендация согласована с эталонной архитектурой облачных вычислений, определенной в Рекомендации ITU-T Y.3502.

Автономные городские роботы-доставщики взаимодействуют с множеством сервисов городской среды (рис. 42), в том числе с пользовательскими устройствами, с целью предоставления услуг пользователям.



Рис. 43 Взаимодействие с сетевыми роботами в условиях городской среды [74]

Согласно предложенным рекомендациям ITU общая сетевая роботизированная система состоит из трех частей:

1) UNR-PF (Ubiquitous Network Robot Platform) – это платформа, которая обеспечивает взаимодействие между сервисными приложениями и роботами.

Платформа UNR-PF объединяет группы сетевых роботов и поддерживает функции NGN (Next Generation Networks), сенсорных сетей и их промежуточного программного обеспечения. Такая модель взаимодействия позволяет предоставлять услуги с помощью сетевых роботов.

2) Приложения роботизированных сервисов – определяют поток и содержание обслуживания. Обычно хранятся и поддерживаются поставщиками услуг, используя общий интерфейс, предоставляемый UNR-PF.

3) Роботизированные функции – предназначены для реализации определенных возможностей и регистрируемые в UNR-PF через общий интерфейс.

Сетевые роботы рассматриваются как часть всепроникающей сенсорной сети. По определению сенсорная сеть является распределенной самоорганизующейся сетью, включающая множество узлов (датчиков), которые измеряют параметры окружающей среды и передают их друг другу с помощью радиосвязи для дальнейшего анализа и принятия решения. [77]

Сенсорная сеть включает следующие узлы (рис 43): Ф-узлы (на рисунке синим цветом) – эти узлы отвечают за сбор информации, Т-узлы (на рисунке зеленым цветом) осуществляют передачу информации и маршрутизацию, а также базовые станции. [78]

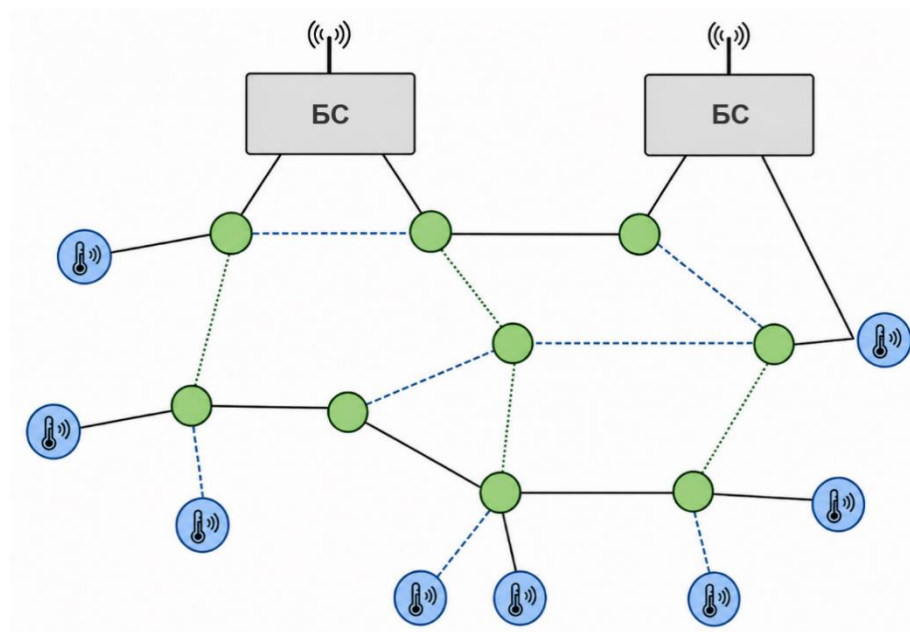


Рис. 44 Организация сенсорной сети

Выделим способ организации сенсорной сети как совокупность подсетей (кластеров). Кластеры сети связаны между собой координаторами или шлюзами взаимодействия. Шлюзы в этом случае должны выполнять функции координатора и осуществлять связь с сервером, который управляет всей сенсорной сетью. [78]

Рассмотрим возможность кластерной организации сети с сетевыми роботами. В таком случае отдельные роботы выполняют роль головного узла кластера. Головной узел в такой сети собирает данные от ближайших сенсорных узлов и передаёт данные далее, тем самым уменьшив нагрузку на стационарные узлы. Что в свою очередь влияет на снижение общей задержки и энергопотребление.

Таким образом, при помощи кластерной организации сети можно снизить энергопотребление узлов сети, поскольку они связаны не на прямую с БС, а с головным узлом (выделенный сетевой робот). Такая структура позволяет разгрузить узлы за счет передачи части функций на головные узлы кластеров. [79]

Также при кластерной организации сети легче управление маршрутами, так как позволяет применять более сложные, но энергоэффективные алгоритмы только на ограниченном наборе узлов (ГУ).

Сенсорная сеть должна обеспечивать сквозное взаимодействие между сервисами, обработкой данных, управлением ресурсами и гетерогенными устройствами – роботами и сенсорными сетями.

Пользовательское устройство, сервис сетевых роботов, городская инфраструктура и сами роботы связаны между собой набором стандартизованных функциональных особенностей и интерфейсов, обеспечивающих межсетевое взаимодействие, управление сервисом и управление роботами.

Далее рассмотрим возможность подключение сетевых роботов к костюму телеприсутствия. Сетевые роботы, выступающие в качестве мобильных базовых станций – ретрансляторов позволят разгрузить сеть или предоставить доступ в труднодоступных местах или местах с большим количеством пользователей.

В такой модели сетевой робот выполняет функции локального узла связи, предоставляет точку доступа, обеспечивает маршрутизацию трафика и может выступать частью распределённой сетевой инфраструктуры.

4.2 Модель подключения пользователя в костюме телеприсутствия к сетевым роботам

В работе [82] рассмотрен вариант движущейся малой соты в городском транспорте. В таком сценарии вместо того чтобы каждый пассажир обращался к базовой станции сотовой связи, авторы предлагают развернуть на автобусе малую соту для обслуживания пассажиров. Такой подход позволяет снизить потребление ресурсов сети, по сравнению со сценарием без подвижных малых сот. В частности, в [82] авторы показывают снижение числа используемых ресурсных блоков на 19,84% за счет такого сценария.

Рассмотрим возможность представления сетевого робота в качестве ретранслятора базовой станции. Сетевой робот в таком случае будет версией подвижной пикосоты. В отличие от городского транспорта сетевые роботы легче внедрить для взаимодействия с костюмом телеприсутствия, поскольку в

рекомендациях МСЭ сетевые роботы выступают в качестве части сетевой архитектуры и взаимодействия с пользователями.

В некоторых сценариях мобильных роботов уже рассматривали в качестве ретрансляторных терминалов для обеспечения беспроводной связи между базовыми станциями и промышленными устройствами Интернета вещей [80]

Взаимодействие с сетевыми роботами пользователя предполагает включение дополнительных функций: регистрацию пользователей, управление заданиями роботов, обмен информацией и интеграцию с городской инфраструктурой.

Схема подключения пользователя в костюме телеприсутствия представлена на рисунке 44. Пользователь регистрируется в зоне обслуживания сетевого робота в качестве первого шага. В то же время выполняется аутентификация и авторизация пользователя на платформе сетевых роботов (Cloud RaaS), а также привязка его данных с костюма телеприсутствия (например, данные о направлении перемещения пользователя).

Подключение к платформе сетевых роботов осуществляется через пользовательское устройство (шлюз), на которое поступают данные с костюма телеприсутствия. Костюм выступает в роли узла сенсорной сети, который собирает данные от нательной сети (WBAN), агрегирует их и передаёт в сторону платформы UNR-PF и связывает с приложениями сенсорной сети и их сервисами. На основе этой информации платформа формирует задания для сетевых роботов.

В [75] описано взаимодействие RaaS (с англ. Robotics as a service, робототехника как услуга) – это категория облачных сервисов, предназначенная для поддержки разработки, эксплуатации и управления роботами в среде облачных вычислений. DRSP (с англ. Delivery Robot Service Provider – поставщик услуг сетевых роботов) использует этот облачный RaaS как основу для конкретного сервиса роботов и управления их жизненным циклом. DRSP реализует сервисные функции по приёму задач доставки, планированию маршрутов, управлению парком роботов и взаимодействию с городской инфраструктурой.

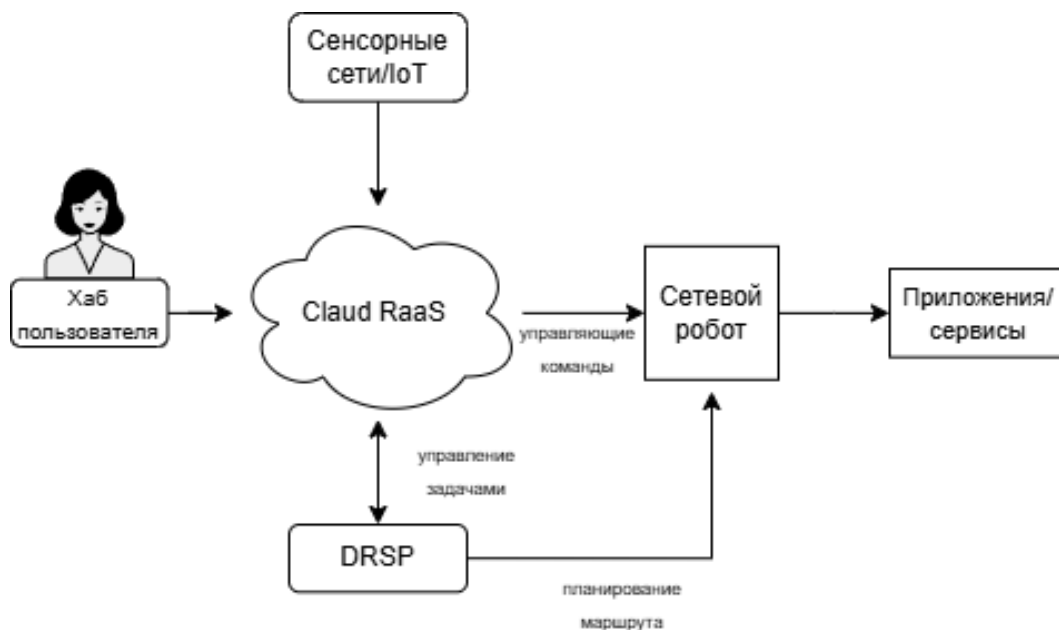


Рис. 45 Схема подключения сети пользователя в костюме телеприсутствия к сетевому роботу

Для взаимодействия сетевого робота и костюма телеприсутствия выделены протоколы передачи данных. (рис 45) Взаимодействие с общим хабом в костюме телеприсутствия, как было рассмотрено в первой главе, наиболее эффективно с помощью протокола 802.15.6, который разрабатывался специально для WBAN. Данные с пользовательского устройства хаб агрегирует и обеспечивает подключение.

Cloud RaaS совместно с DRSP выступает в роли серверной части для пользователей и роботов, обрабатывающие данные и формирующие задания для сетевых роботов.

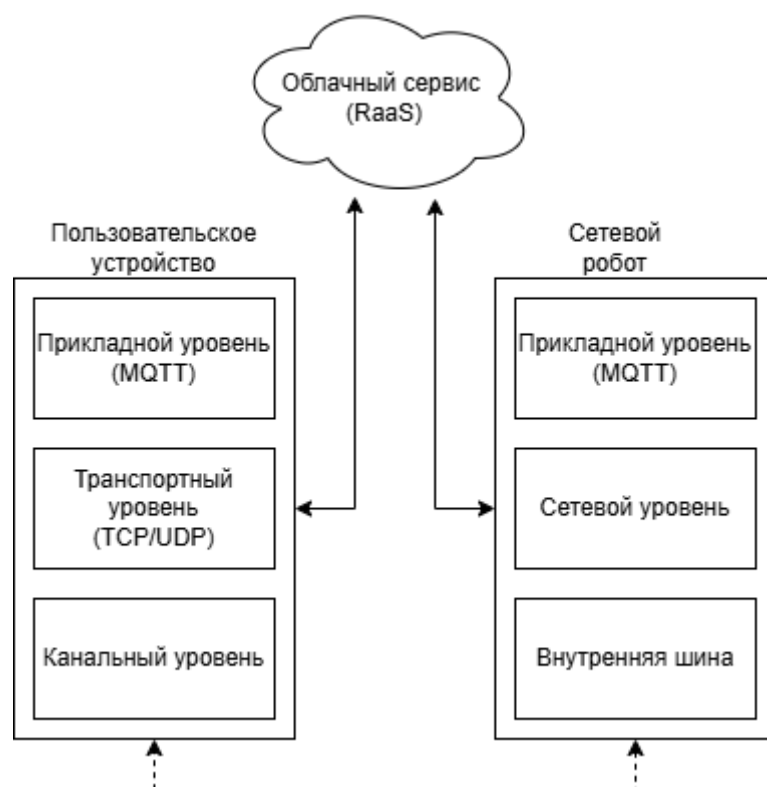


Рис. 46 Стеки протоколов и схема взаимодействия робота с костюмом телеприсутствия пользователя

Использование сетевых роботов имеет ограничения, связанные с ресурсами. Для внедрения в сетевую среду для предоставления доступа к сети с помощью такого робота необходимо учитывать такие факторы, как вычислительная мощность – требуется довольно большие ресурсы.

Кроме того, существует необходимость обеспечить канал связи при движении робота, оценивать многолучевое распространение и возможную блокировку радиолинии.

4.3 Методы кластерной организации сети сетевых роботов

Методы кластерной организации сети применяют с целью увеличения производительности за счет распределения нагрузки между пользовательскими

устройствами. Один сетевой робот может обслуживать группу пользователей – для такой организации сети необходимо разбить устройства на кластеры.

Кластерная организация сети пользователей вокруг сетевого робота (рис. 46), выполняющего функции головного узла кластера и локального узла доступа AN (с англ. access network).

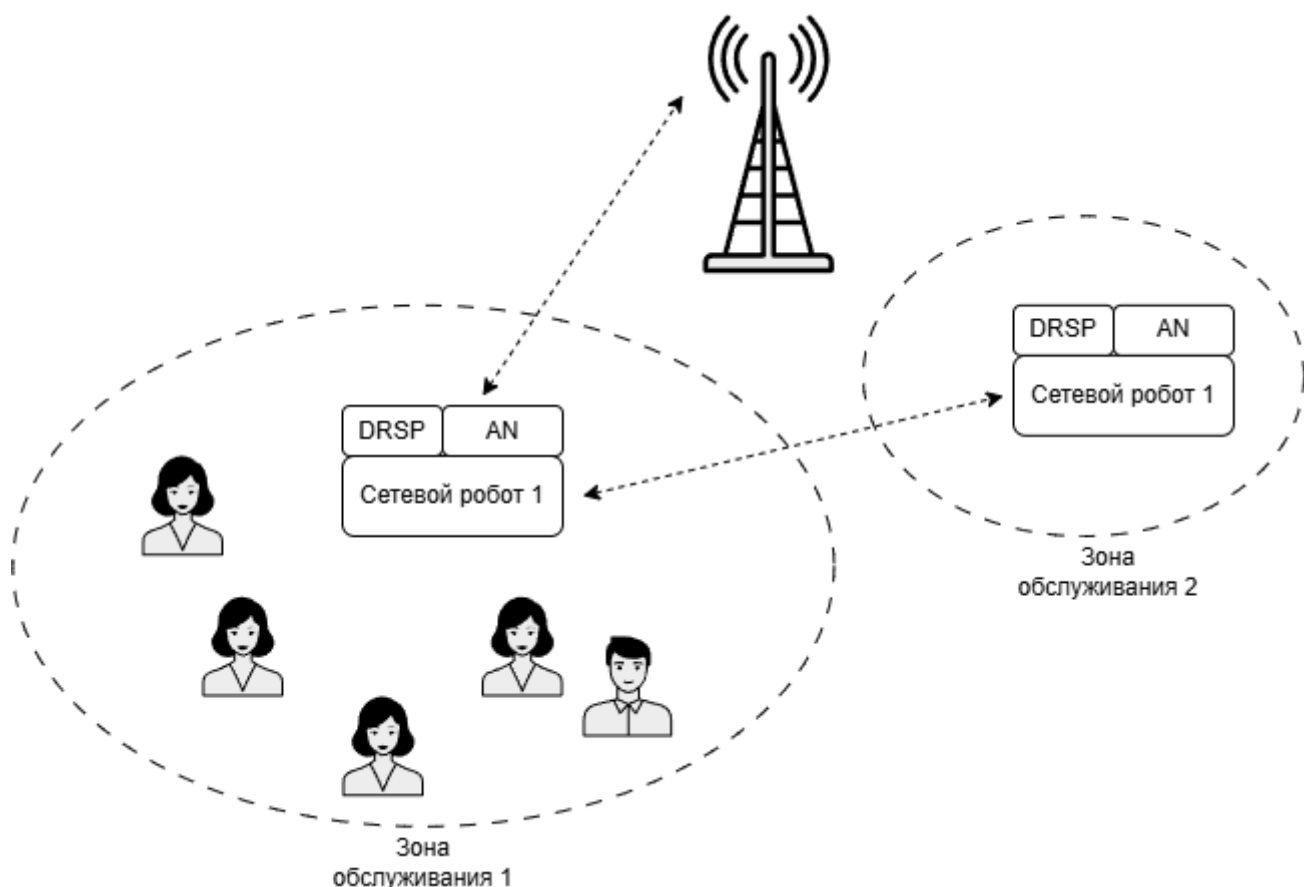


Рис. 47 схема функционирования пользователей в кластере с сетевым роботом в качестве ГУ

Поскольку существует большое количество методов кластеризации сети – выделим наиболее подходящие к рассматриваемому сценарию для задачи кластеризации сетевых роботов ретрансляторов. (рис. 47) В качестве таких методов выделены группы плотностных методов и методов разбиения.

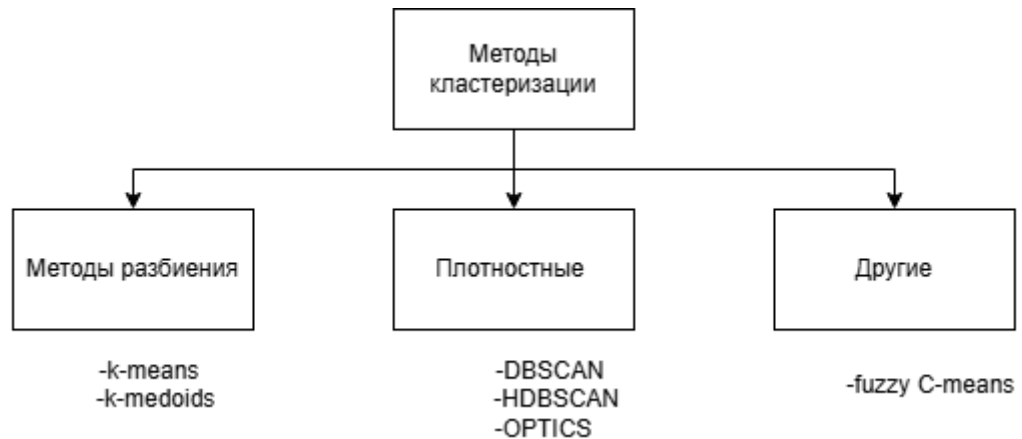


Рис. 48 Методы кластеризации

Рассмотрим следующие сценарии взаимодействия с сетевыми роботами: группы костюмов телеприсутствия в помещении или в городской среде. Очевидно, что плотность пользователей в зависимости от сценария изменяется.

Поскольку в рассматриваемой системе присутствуют одновременно группы пользователей: например, несколько костюмов телеприсутствия в одном помещении или более разреженные сценарии (пользователи в городской среде), целесообразно использовать комбинацию методов кластеризации или выделить необходимые алгоритмы под конкретные сценарии.

Рассмотрим задачу кластеризации пользователей.

Пусть, $U = u_1 \dots u_n$ – множество пользователей и их положение во времени задается: $p_i(t) = (x_i, y_i)$.

Требуется разбить пользователей на K - кластеров: $C = C_1, C_2, \dots, C_K$

При движении пользователей центры кластеров и принадлежность узлов необходимо пересчитывать в каждый момент времени t или при изменении топологии сети.

Зададим функцию характеризующую расстояние от пользователя до центра кластера и движение пользователя:

$$D_{ij} = \alpha \|p_i - c_j\|^2 + \beta v_i^2 \quad (55)$$

Где v_i^2 – скорость перемещения пользователей, p_i – координаты пользователя, c_j – центр кластера, $\|p_i - c_j\| = \sqrt{(p_i^1 - c_j^1)^2 + (p_i^2 - c_j^2)^2}$ – норма, характеризующаяся евклидовым расстоянием, α, β – коэффициенты

Такая постановка задачи определена в связи с необходимостью учитывать перемещение пользователей. Таким образом, функция дополнена скоростью перемещения. Что позволяет учитывать не только географическое положение пользователя.

Общая функция оптимизации:

$$J = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K u_{ij}^m d_{ij}, \quad (56)$$

Где N – количество пользователей, K – количество кластеров, u_{ij}^m – степень принадлежности пользователя к кластеру, d_{ij} – расстояние между пользователем и центром кластера

Выделим алгоритм k-means, поскольку он прост в реализации, имеет вычислительную эффективность и низкий расход памяти. [84]

Для алгоритма k-means:

$$u_{ij} = \begin{cases} 1, & j = \operatorname{argmin} d_{ij} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (57)$$

Алгоритм определяет минимум функции:

$$J = \sum_{i=1}^N \min(d_{ij}), \quad (58)$$

Где $1 \leq j \leq K$

Алгоритм k-means (рис 48) характеризуется быстрым разбиением множества пользователей на фиксированное число зон обслуживания сетевых роботов.

В сценариях с равномерной плотностью пользователей (например, пользователи в помещении или на ограниченной территории) k -means позволяет получить достаточно простое разбиение при небольших вычислительных затратах.

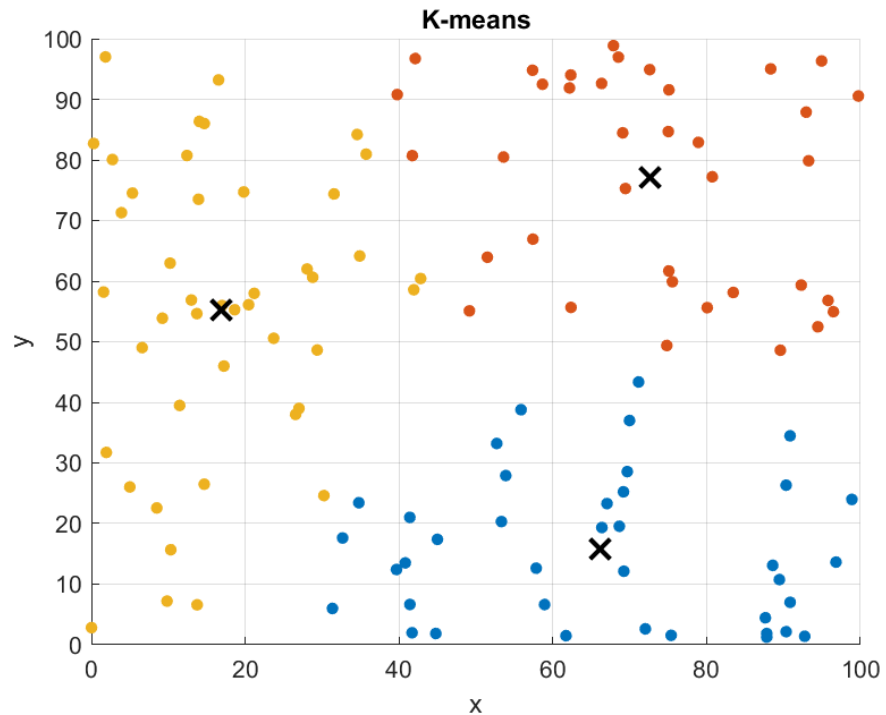


Рис. 49 Кластеризация с помощью метода k -means

Алгоритм k -medoids, является вариантом кластеризации, близким к k -средним, в котором в качестве центра кластера выбирается не среднее значение, а одна из точек данных – медоид. Медоидом считается объект внутри кластера. [85]

Применение алгоритма k -medoids (рис. 49) перспективно, когда расстояния может учитывать не только геометрию, но и качество канала связи или задержку. Например, медоидом кластера можно выбрать узел с лучшими энергетическими и сетевыми характеристиками.

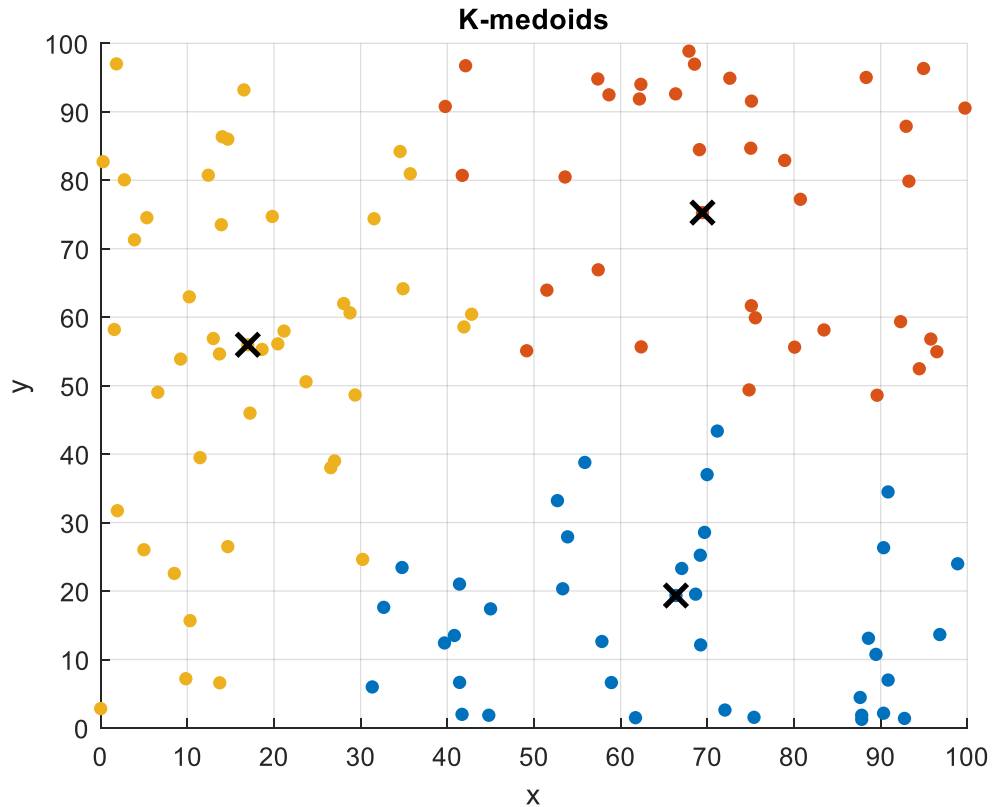


Рис. 50 Кластеризация с помощью *k*-medoids

Плотностные методы позволяют выделять кластеры произвольной формы и автоматически обрабатывать шумовые точки, что особенно актуально для подвижных пользователей и сетевых роботов, распределённых в городской среде.

Методы DBSCAN и его модификации не требуют заранее задавать число кластеров и хорошо подходят для ситуаций, когда плотность пользователей и сетевых роботов сильно меняется в пространстве и времени.

Преимущество таких методов заключается в том, что они могут определять кластеры произвольной формы и не подвержены влиянию шума в данных. Для идентификации кластеров DBSCAN необходимо задать два параметра: параметр ϵ_0 , представляющий радиус окружности для определения окрестности каждого наблюдения, и минимальный размер окрестности, при котором точка является начальным значением в кластере, а не шумом. [86]

[81] В методах k -means или k -medoids каждый пользователь относится только к одному кластеру, это можно отнести к недостаткам, так как возможна ситуация, когда несколько сетевых роботов находят в зоне обслуживания пользователя.

Алгоритмы нечёткой кластеризации C -средних (с англ. fuzzy C -means, FCM) позволяет каждому объекту иметь степени принадлежности к нескольким кластерам, что естественно описывает такие пограничные случаи. Кластеры рассматриваются как нечеткие множества и каждый пользователь может принадлежать к нескольким с разной степенью принадлежности $u_{ij} \in [0,1]$.

Для рассматриваемой задачи это означает, что один и тот же пользователь может с ненулевой степенью принадлежности относиться сразу к нескольким сетевым роботам, а выбор головного узла и маршрутизации можно делать с учётом этих степеней принадлежности.

Алгоритм FCM основан на минимизации целевой функции [83]:

$$J = \sum_{i=1}^{|C|} \sum_{j=1}^N u_{i,j}^m \|x_i - c_j\|^2, 1 \leq m \leq \infty, \quad (59)$$

где N – число пользователей, C – число кластеров, u_{ik} – коэффициент принадлежности x_i кластеру c_j , x_i – координаты пользователя i , c_j – j -ый кластер набора кластеров; $\|x_i - c_j\| = \sqrt{(x_i^1 - c_j^1)^2 + (x_i^2 - c_j^2)^2}$ – норма, характеризующаяся евклидовым расстоянием от центра кластера до пользователя

Центры кластеров в свою очередь определяются:

$$v_k = \frac{\sum_{i=1}^n u_{i,k}^m x_i}{\sum_{i=1}^n u_{i,k}^m}. \quad (60)$$

Определим с помощью алгоритма FCM центры кластеров. (рис. 50)

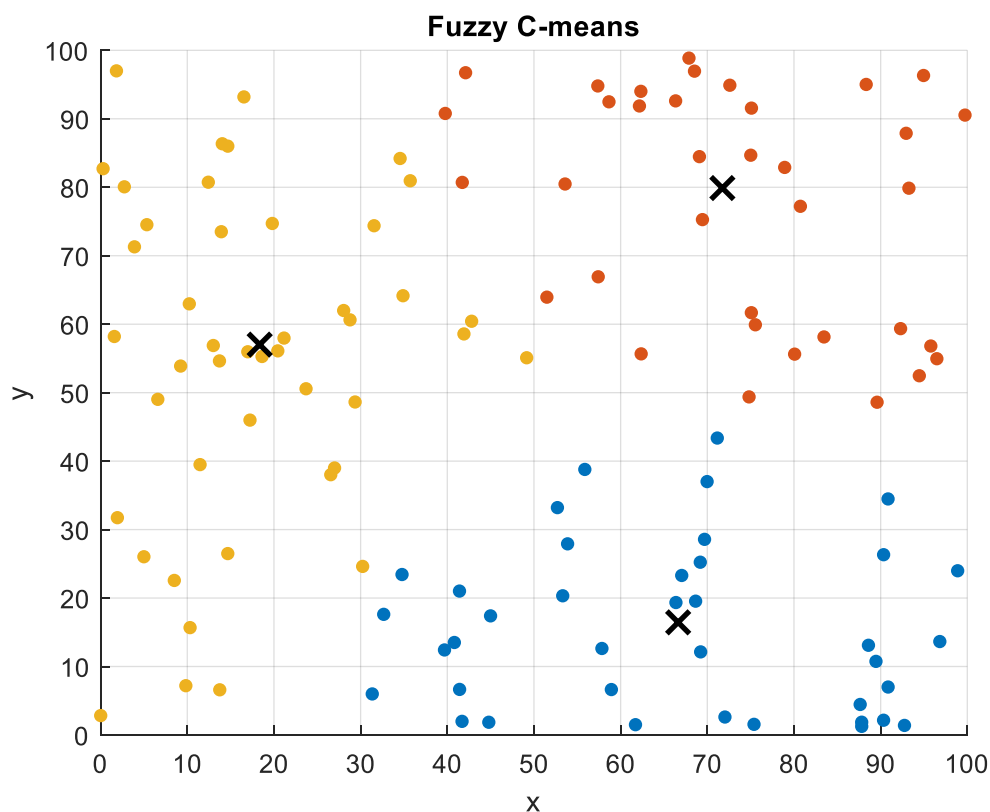


Рис. 51 Кластеризация сети на основе алгоритма FCM

В работе используется модель, в которой пользователи перемещаются по плоскости с заданными скоростями, а их группировка выполняется методом Fuzzy C-means (FCM) в несколько дискретных моментов времени секунд (рис. 51). На каждом шаге для текущих координат пользователей и их скоростей решается задача нечеткой кластеризации с модифицированной функцией расстояния, учитывающей как пространственную близость, так и скорость движения.

Результатом каждого запуска FCM являются центры кластеров и степени принадлежности пользователей к этим кластерам, по которым формируется разбиение на группы.

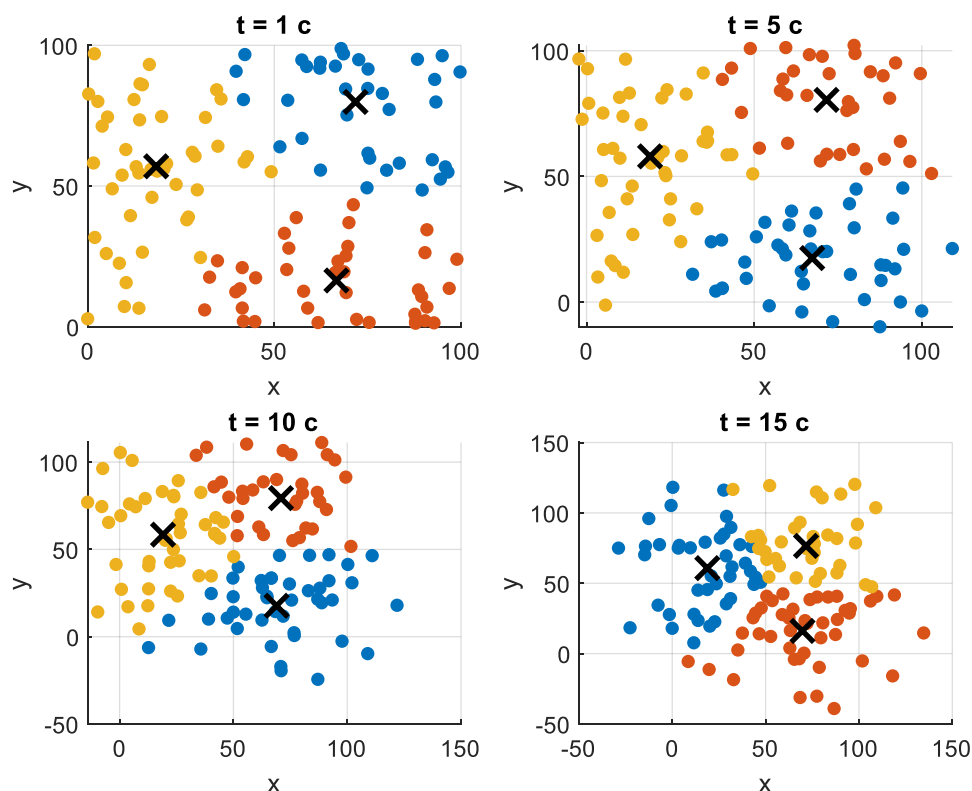


Рис. 52 Определение кластеров пользователей в разные моменты времени

4.4 Задача оптимального маршрута сетевого робота.

Определение маршрута сетевого робота является важной задачей, поскольку благодаря оптимизированным маршрутам можно увеличить энергоэффективность системы в целом.

Для поставленной задачи необходимо для групп роботов $r_1, r_2, \dots, r_n$ находящихся на некоторых координатах (x_i, y_i) определим маршруты передвижений сетевых роботов обеспечивающие выполнение сервисных функций при минимальных затратах ресурсов.

В работе [87] проанализирована поставленная задача и выделена целевая функция оптимизации. Полная целевая функция оптимизации положения сетевого робота-координатора будет выглядеть следующим образом:

$$\Theta = \min_{x_k} \sum_{k=1}^K \sum_{i \in C_k} \omega_1 T_{ik}(x_k) - \omega_2 SINR_{ik}(x_k), \quad (61)$$

где ω_1 и ω_2 безразмерные весовые коэффициенты, которые необходимо определить.

Для оценки относительной значимости коэффициентов задержки $T_{ik}(x_k)$ и качества радиоканала $SINR_{ik}(x_k)$ применен метод анализа иерархий [88].

Таким образом, целевая функция примет вид:

$$\Theta = \min_{x_k} \sum_{k=1}^K \sum_{i \in C_k} 0,75(T_{ik}(x_k)) - 0,25(SINR_{ik}(x_k)) \quad (62)$$

Таким образом задача нахождения оптимального маршрута сетевого робота сводится к минимизация целевой функции (59). соответствует выбору таких положений координаторов и такой конфигурации кластеров, при которых суммарная задержка минимальна, а качество радиоканала максимально.

Для определения траектории движения БС выделены кластеры пользователей, с целью предоставления услуг связи. Для обеспечения обслуживания группы пользователей координатор должен располагаться в пределах радиуса зоны обслуживания R_j соответствующего кластера:

$$\|x_{\text{БС}} - c_j\| \leq R_j, \quad R_j = \max_{i \in C_j} \|x_i - c_j\|, \quad (63)$$

где $x_{\text{БС}}$ – текущее положение координатора, c_j – центр j -го кластера; C_j – множество узлов, принадлежавших кластеру j . Данное условие определяет пользователей кластера находящихся в зоне обслуживания БС.

4.5 Выбор алгоритма оптимизации маршрута сетевого робота

На основе заданной целевой функции оптимизации (59) рассмотрим методы задания траектории сетевого робота. Существуют различные алгоритмы оптимизации маршрута.

В рассматриваемой задаче координатор должен последовательно посещать центры кластеров пользователей, оставаясь в пределах радиуса их зоны обслуживания.

Таким образом, необходимо минимизировать длину маршрута сетевого робота – что в свою очередь увеличит время его работы и уменьшит энергозатраты. Одной из задач такого робота является обслуживание заданного кластера пользователей.

Существует большое количество методов маршрутной оптимизации, включая методы, основанные на метаэвристических алгоритмах. Использование метаэвристических методов позволяет подстраивать коэффициенты алгоритмов в зависимости от изменения характеристик среды. Для задачи определения оптимального маршрута робота-ретранслятора в условиях передвижения людей такой подход является одним из перспективных.

В настоящее время разработано достаточное количество эвристических алгоритмов. Выделим группы алгоритмов (табл. 3):

Таблица 3. Сравнение метаэвристических алгоритмов

Название алгоритма	Особенности	Простота реализации	Решение задач
Муравьиный	Роевой, популяционный	Средняя	маршрутизация
Генетический	Эволюционный	Средняя	Универсальный, многокритериальные задачи
Роя частиц	Роевой	Высокая	Глобальная оптимизация сложных функций
Поведения кукушек	Роевой	Низкая	Глобальная оптимизация

Метаэвристические алгоритмы применяют для решения задач различного типа, например, для маршрутизации, планирования и в задачах телекоммуникации и инженерного дела [91].

Для задачи маршрутизации сетевого робота одним из наиболее эффективных является муравьиный алгоритм, поскольку этот алгоритм находит кратчайший путь на графе. Муравьиный алгоритм (Ant Colony Optimization, ACO) относится также к метаэвристическим методам, основанном на моделировании коллективного поведения муравьиной колонии при поиске кратчайших путей между домом и источниками пищи.

Ключевая особенность алгоритма ACO заключается в том, что он учитывает информацию о ранее найденных успешных траекториях через феромонные следы. Таким образом для задачи планирования траектории сетевого робота-координатора в динамической мобильной среде наиболее перспективный алгоритм ACO. Также этот алгоритм разработан специально для решения задачи поиска наиболее эффективных путей и показал высокую эффективность при поиске приближенных решений в задачах маршрутной оптимизации. [89-90]

В рассматриваемой задаче по определению оптимального маршрута координатора каждый «муравей» соответствует одному маршруту движения робота через последовательность центров кластеров c_j , вычисленных алгоритмом FCM.

Значение целевой функции Θ – мера стоимости построенного маршрута: соответственно, чем меньше значение Θ , тем предпочтительнее маршрут. Таким образом, задача нахождения оптимальной траектории сетевого робота-ретранслятора сводится к минимизации функции Θ с помощью муравьиного алгоритма.

Вероятность выбора «муравьём» к перехода сетевого робота ретранслятора из положения i в положение j на итерации в момент времени t определяется правилом:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t)\eta_{ij}^\beta}{\sum_{l \in N} \tau_{ij}^\alpha(t)\eta_{ij}^\beta}, j \in N_i^k, \\ 0, j \notin N_i^k \end{cases} \quad (64)$$

где τ_{ij}^α – интенсивность феромона на дуге, соответствующей переходу БС из положения i в положение j , η_{ij}^β – оценка привлекательности данного перехода, α и β – коэффициенты, задающие относительную важность феромона, N_i^k – допустимое множество положений БС из текущей точки i для муравья k

На каждой итерации происходит вычисление целевой функции. Соответственно маршруты с наименьшим значением – считаются лучшими и получают прирост феромона.

Обновление феромона выполняется по правилу с испарением:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^{Nant} \Delta\tau_{ij}^k, \quad (65)$$

где $\rho \in (0,1)$ – коэффициент испарения феромона, $\Delta\tau_{ij}^k = \frac{1}{\Theta^k}$ – если дуга (i,j) входит в маршрут муравья, иначе $\Delta\tau_{ij}^k = 0$.

В соответствии с выполнением алгоритма маршруты с минимальной задержкой и максимальным отношением сигнал/шум накапливают феромон быстрее, что приводит последующие итерации к лучшему решению.

Как показано выше, координатор должен располагаться в пределах радиуса зоны обслуживания. Для этого задаем множество перемещений сетевого робота $(N(x_k, t))$. При этом на каждом шаге выбираем положение удовлетворяющих ограничению:

$$\|x(t+1) - x(t)\| \leq v_{\max}(t)\Delta t, \quad (66)$$

где $x(t)$, $x(t + 1)$ – положения сетевого робота, Δt – длительность одного такта ($\Delta t = 1\text{с}$); $v_{\max}(t)$ – максимальная скорость перемещения, являющаяся заданным параметром и отражающая физические ограничения подвижной сетевого робота. В модели в качестве примера принято $v_{\max}(t) = 1,5\text{ м/с}$. Таким образом, за один шаг БС может переместиться не дальше, чем на $v_{\max}(t)\Delta t$.

Цикл работы алгоритма приведен на блок-схеме (рис. 52). Блок-схема описывает алгоритм формирования траектории перемещения сетевого робота на основе FCM-кластеризации и муравьиного алгоритма. Для каждого «муравья» определена траектория перемещения робота с учётом текущего распределения феромона и заданных ограничений. Выполнение итераций происходит до выполнения критериев остановки: отсутствия уменьшения значения целевой функции на нескольких последовательных шагах.

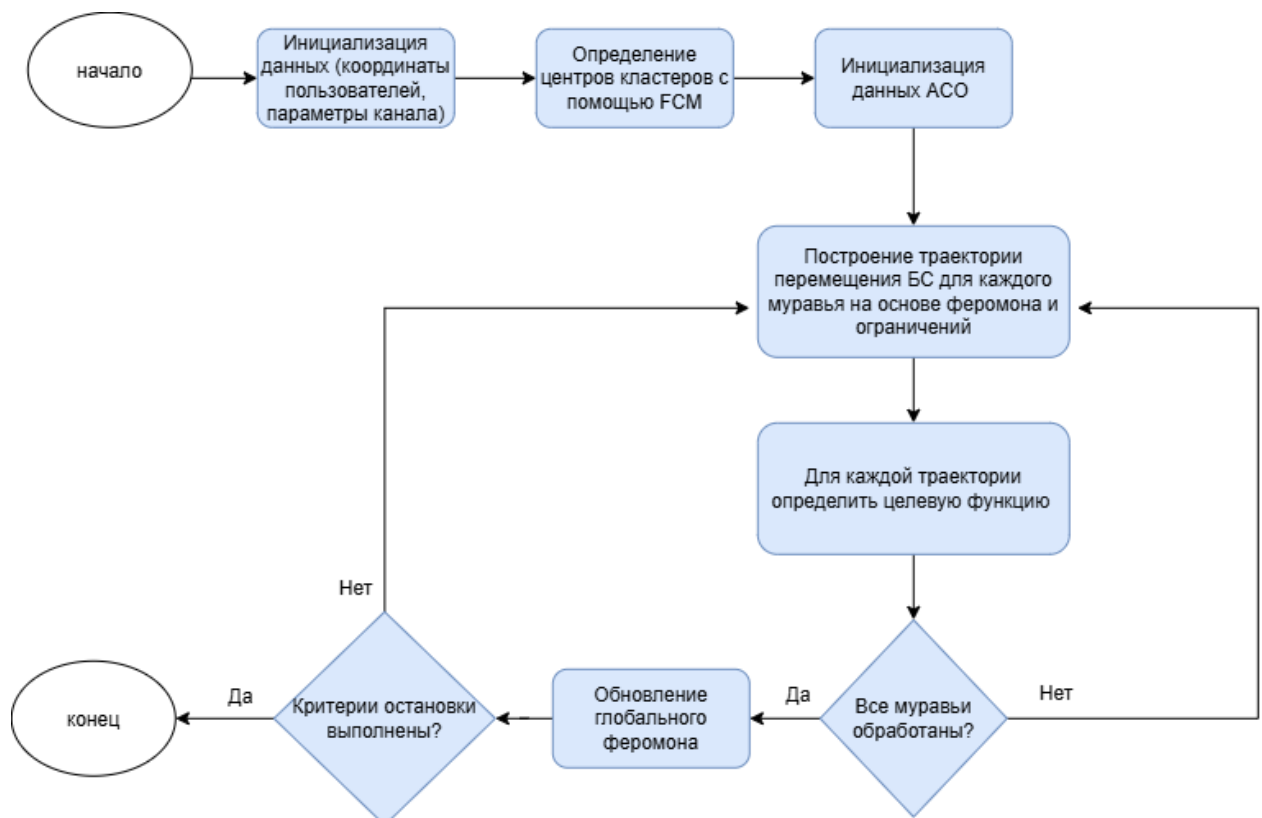


Рис. 53 Блок-схема алгоритма АСО

4.6 Результаты моделирования.

Перемещения сетевого робота-координатора в разные моменты времени по муравьиному алгоритму показаны на рисунке 53. Отображение показано в разные моменты времени: 5 с, 10 с, 15 с, 20 с. Заданы три группы пользователей, которые соответствуют разным кластерам сети. Сетевой робот поддерживает соответствующую группу пользователей. Для удобства оценки показателей и наглядности показан маршрут только одного сетевого робота.

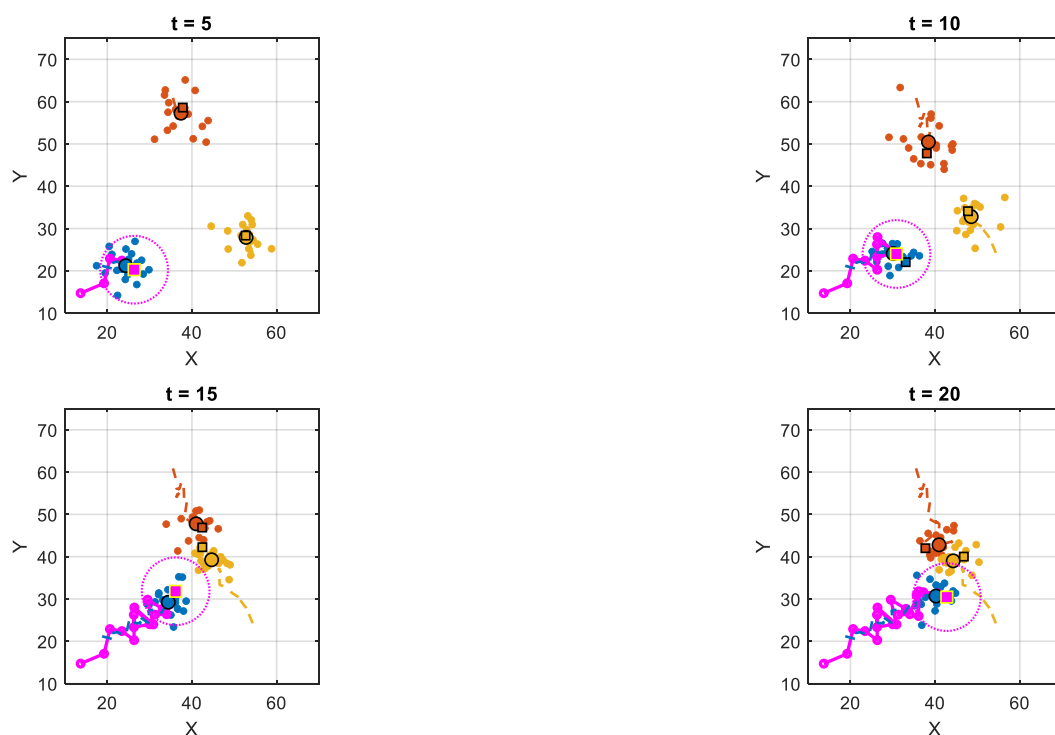


Рис. 54 Перемещение робота-координатора в разные моменты времени

Анализ использования разных методов перемещения робота-координатора показал выигрыш общей целевой функции при использовании муравьиного алгоритма. (рис 54)

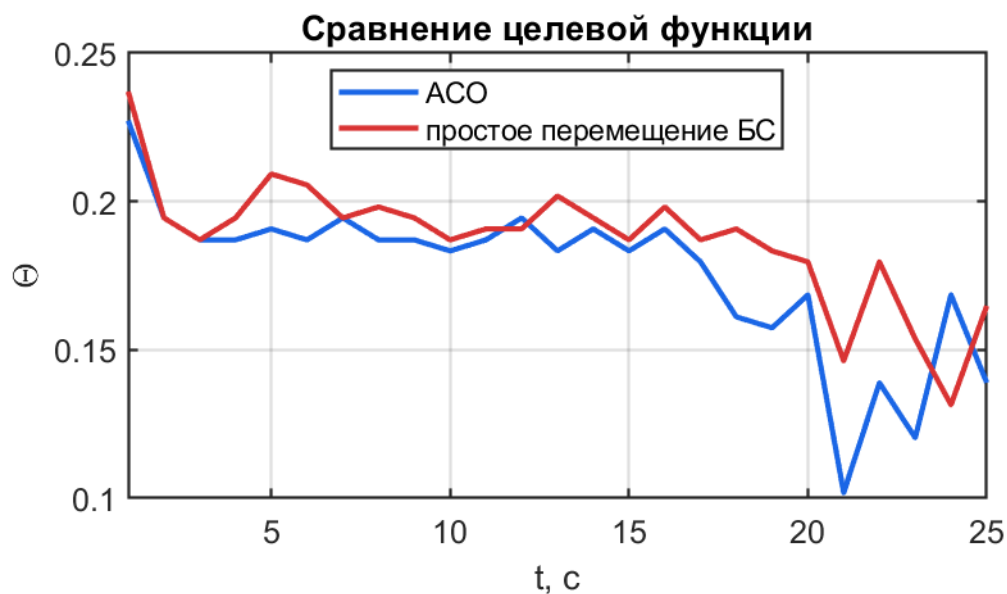


Рис. 55 Сравнение показателей целевой функции

Произведём сравнение радиодоступа (покрытия) пользователей для двух сценариев (рис. 55): при использовании муравьиного алгоритма и при перемещении базовой станции со средней скоростью пользователей.

В первом случае робот-координатор формирует маршрут с учётом кластерной структуры сети и радиуса зоны обслуживания. Во втором случае траектория определяется движением группы пользователей.

Расчёты показывают, что муравьиный алгоритм обеспечивает более высокое среднее значение покрытия на интервале наблюдения. Это подтверждает эффективность предложенного метода. На графике показан выигрыш при заданных параметрах радиуса зоны обслуживания сетевого робота, усредненное значение покрытия выше на 5,8 % при использовании алгоритма ACO.

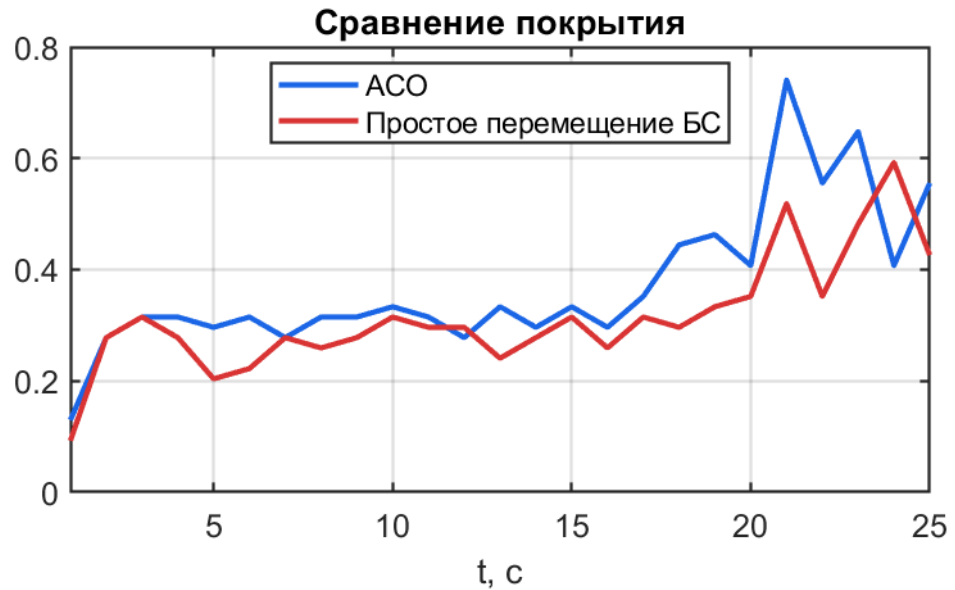


Рис. 56 Сравнение покрытия

Помимо улучшения показателя покрытия при использовании муравьиного алгоритма. Происходит уменьшение траектории перемещения робота-ретранслятора (рис 56). Такой подход позволяет снизить энергозатраты на перемещение сетевого робота и увеличить время его автономной работы.

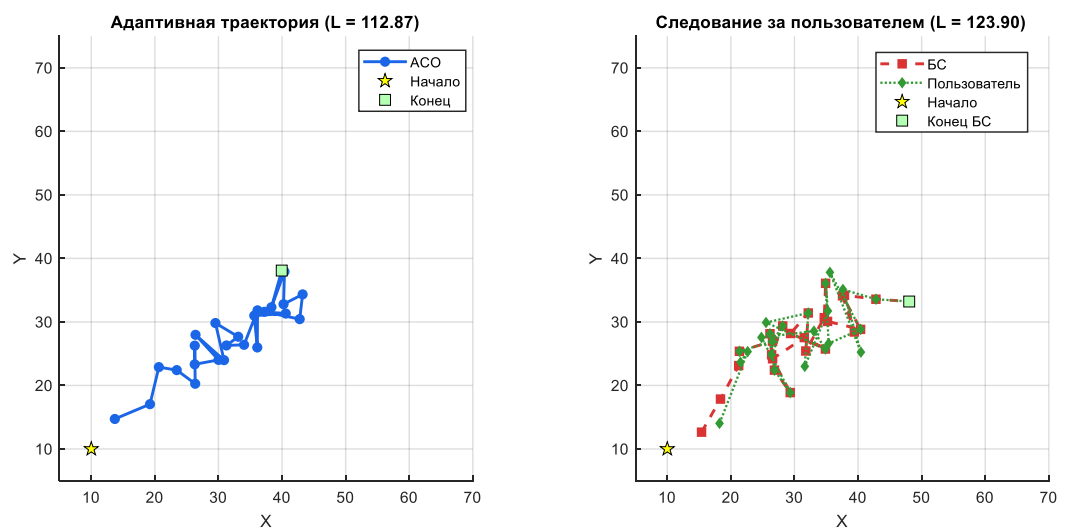


Рис. 57 Сравнение траекторий перемещения мобильной БС

Выводы

Предложен метод взаимодействия с сетевыми роботами с целью обеспечения связи пользователей в костюме телеприсутствия на основе функции оптимизации при которой суммарная задержка минимальна, а качество радиоканала максимально.

Проанализированы методы кластеризации сети и для поставленной задачи выделен алгоритм нечеткой кластеризации. Который имеет критерий принадлежности к нескольким кластерам, что позволяет учитывать пространственно-временную динамику распределения пользователей и сетевых роботов.

Разработана модель топологии сети, которая формируется на основе плоскостного кластерного анализа и занятием роботом-ретранслятора. Сетевой робот в такой модели представляет собой мобильную пикосоту. Головной узел (робот) кластера может выполнять функции аналогичные пикосоте.

Предложен метод пути следования сетевых роботов на основе метаэвристического муравьиного алгоритма оптимизации маршрута. Использование этого алгоритма обеспечивает, при заданных параметрах радиуса зоны обслуживания сетевого робота, усредненное значение покрытия выше, чем при использовании других методов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе проанализированы актуальные направления развития сетей связи шестого поколения. Выделено одно из активно развивающихся направлений – иммерсивные коммуникации. Показано, что ключевым компонентом для взаимодействия пользователя с сетевыми вселенными является пользовательское оборудование – костюм телеприсутствия. Выполнен анализ натальной сети костюма телеприсутствия, включая типы каналов связи, особенности распространения радиоволн вблизи тела человека.

Произведен анализ научных исследований и тенденций развития, включая международную стандартизацию в области перспективных сетей, сетевым вселенным. Анализ позволил определить место костюма телеприсутствия в архитектуре будущих систем связи. Костюм телеприсутствия представлен как пользовательское оборудование с интерфейсом взаимодействия между физической и цифровой средой. Взаимодействие пользователя в сетевых вселенных представлено в виде цифрового аватара.

В работе проанализированы особенности проектирования натальных сетей и влияния помех на передачу данных. Включая близкое к пользователю расположение приемопередающих устройств, затухание сигнала. Установлено, что применение традиционных подходов к организации беспроводных каналов в натальной сети не может обеспечить требуемое качество связи в условиях динамики пользователя. Это обосновывает необходимость разработки новых методов управления радиоканалом и пространственным распределением электромагнитной энергии.

Предложена модель и метод взаимодействия пользователя с аватаром в метавселенной на основе натальной сети с применением ЭМГ-датчиков. Такой подход обеспечивает уменьшение суммарной задержки, поскольку при регистрации мышечной активности и самого действия существует разница равная электромеханической задержки. Предложен двухшаговый алгоритм адаптивной обработки ЭМГ-сигнала в костюме телеприсутствия.

Предложена модель костюма телеприсутствия и метод организации беспроводных каналов нательной сети с применением миниатюрных ячеек метаповерхности. Выделены свойства метаповерхности – изменение условия распространения электромагнитных волн. Такой подход позволяет снижать уровень помех, что напрямую влияет на качество беспроводного канала связи для костюмов телеприсутствия.

Предложена модель и метод организации связи группы костюмов телеприсутствия с использованием сетевых роботов-ретрансляторов. Определена траектория передвижения сетевых роботов на основе метаэвристического алгоритма оптимизации АСО. При сравнительном анализе такой подход позволил повысить область покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маколкина М. А., Шарлаева М. В. Исследование средней задержки в сетях связи, предоставляющих телемедицинские услуги //Труды учебных заведений связи. – 2024. – Т. 10. – №. 3. – С. 59-65.
2. Volkov A. et al. Optimized data transmission and signal processing for telepresence suits in multiverse interactions //Journal of Sensor and Actuator Networks. – 2024. – Т. 13. – №. 6. – С. 82.
3. Alliance N., Düsseldorf G. ITU-R framework for IMT-2030: Review and Future Direction. – 2024.
4. Кузнецов К. А., Кучерявый А. Е., Мутханна А. С. А. Метавселенные и методы их реализации в сетях связи 2030.
5. Fettweis G. et al. Itu-t technology watch report (august 2014)-the tactile internet //Internet Telecommunication Union, Tech. Rep. – 2014.
6. Росляков, А. В. Концепции будущих сетей фиксированной связи и проблемы их практической реализации / А. В. Росляков // Электросвязь. – 2023. – № 10. – С. 10-16. – DOI 10.34832/ELSV.2023.47.10.001. – EDN HGCMDU.
7. Network 2030. A Blueprint of Technology, Applications and Market Drivers Towards the Year 2030 and Beyond. Written by FGNET-2030. – ITU-T, 2019. – 19 p
8. ITU-T Technical Report. Networks in 2030 - Gap Analysis of New Services, Capabilities and Use cases. – ITU-T, 2020. – 43 p.
9. Тихвинский В. и др. Развитие сетей мобильной связи от 5G Advanced к 6G. Проекты, технологии, архитектура. – ЛитРес, 2023.
10. Nagaraj P. Demystifying IMT-2030 aka 6G-Capabilities, Usage Scenarios, and Candidate Technologies //Preprint. – 2024.
11. FG-NET2030. Network 2030 – Architecture Framework. International Telecommunication Union, ITU-T Focus Group on Technologies for Network 2030, 2020.

- 12.ITU-T Recommendation Y.4238 (11/2025), Requirements for integrating virtual and physical worlds through digital twins in the metaverse, ITU, Geneva, 2025.
- 13.ITU Focus Group on metaverse. Technical Specification ITU FGMV-20. Definition of metaverse. Geneva: International Telecommunication Union, 2023
- 14.Farag H., Stefanovic C. Toward Efficient Deployment and Synchronization in Digital Twins-Empowered Networks //arXiv preprint arXiv:2604.00566. – 2026.
- 15.Rank M. et al. Perception of delay in haptic telepresence systems //Presence: teleoperators and virtual environments. – 2010. – Т. 19. – №. 5. – С. 389-399.
- 16.Ortiz J. S., Andaluz V. H., Carvajal C. P. Real-Time Digital Twin Architecture for Immersive Industrial Automation Training //Sensors. – 2026. – Т. 26. – №. 7. – С. 2023.
- 17.Duong T. Q. et al. From digital twin to metaverse: The role of 6G ultra-reliable and low-latency communications with multi-tier computing //IEEE Wireless Communications. – 2023. – Т. 30. – №. 3. – С. 140-146.
- 18.Выборнова А. И. Иммерсивные технологии в телекоммуникациях: обзор и перспективы //Информационные технологии и телекоммуникации. – 2021. – Т. 9. – №. 3. – С. 1-10.
- 19.Харламов М. А., Маколкина М. А. Исследование характеристик сети передачи данных и методов уменьшения объема трафика технологии Holographic Type Communication //Информационные технологии и телекоммуникации. – 2021. – Т. 9. – №. 2. – С. 64-76.
- 20.Ateya A. A. et al. Enabling Metaverse and Telepresence Services in 6G Networks. – River Publishers, 2025.
- 21.Демидов Н. А. Голографический тип коммуникации: определение, анализ основных особенностей, формы реализации. – 2023.
- 22.Гольдштейн, Б. С. Сети связи пост-NGN / Б. С. Гольдштейн, А. Е. Кучерявый. – Санкт-Петербург: Горячая линия–Телеком, 2019. – 332 с. – ISBN 978-5-9912-0736-2
- 23.IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Part 15.6: Wireless Body Area Networks. Approved 6 February 2012

- 24.Писарев С. и др. Сети стандарта IEEE 802.15. 6 //Беспроводные технологии. – 2013. – №. 2. – С. 4-7
- 25.Pradhan A. et al. A survey on physical layer security of ultra/hyper reliable low latency communication in 5G and 6G networks: Recent advancements, challenges, and future directions //IEEE Access. – 2024. – Т. 12. – С. 112320-112353.
- 26.Bajracharya R., Shrestha R. Achieving Ultra-Reliable Low Latency Communication in 5G and Beyond //Sensors. – 2026. – Т. 26. – №. 11. – С. 3485.
- 27.Shen X. et al. Toward immersive communications in 6G //Frontiers in Computer Science. – 2023. – Т. 4. – С. 1068478.
- 28.Волков А. Н., Мутханна А. С., Кучерявый А. Е. Сети связи пятого поколения: на пути к сетям 2030 //Информационные технологии и телекоммуникации. – 2020. – Т. 78. – №. 2. – С. 32-43.
- 29.Павлов С. В. и др. Сети 2030: перспективы и проблемы //2022. – 2022. – Т. 12. – №. 2. – С. 17.
- 30.Кузнецов И. Р., Малышев В. Н. Особенности курса «Перспективные сети связи следующего поколения–NGN». – 2023.
- 31.Ким З. В. Анализ протоколов IP для сетевых вселенных Ким ЗВ, Чуева АА, Назаров ДВ, Горбачева ЛС //Информационные технологии. – 2024. – Т. 12. – №. 3. – С. 68-83.
- 32.Latva-Aho M. et al. Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence. – 2019.
- 33.Jungnickel V. et al. The role of small cells, coordinated multipoint, and massive MIMO in 5G //IEEE communications magazine. – 2014. – Т. 52. – №. 5. – С. 44-51.
- 34.Younes B. et al. 5G uplink interference simulations, analysis and solutions: The case of pico cells dense deployment //International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). – 2021. – Т. 11. – №. 3. – С. 2245-2255.
- 35.Okino K. et al. Pico cell range expansion with interference mitigation toward LTE-Advanced heterogeneous networks //2011 IEEE international conference on communications workshops (ICC). – IEEE, 2011. – С. 1-5.

- 36.Gao Y. et al. Toward immersive experience: Evaluation for interactive network services //IEEE Network. – 2022. – Т. 36. – №. 1. – С. 144-150.
- 37.Gao Y., Wu D., Zhou L. How to improve immersive experience? //IEEE Transactions on Multimedia. – 2022. – Т. 26. – С. 8691-8703.
- 38.Lu Y., Zheng X. 6G: A survey on technologies, scenarios, challenges, and the related issues //Journal of Industrial Information Integration. – 2020. – Т. 19. – С. 100158.
- 39.Jiang W. et al. The road towards 6G: A comprehensive survey //IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2021. – Т. 2. – С. 334-366.
- 40.Волков А. Н. Интерфейс взаимодействия Пользователь-Метавселенная //Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. АС Попова, посвященная Дню радио. – 2024. – Т. 1. – №. 79. – С. 213-215.
- 41.Anvarjonov B. et al. Development of a Telepresence Suit for Providing Holnetverse Services //2024 IEEE Future Networks World Forum (FNWF). – IEEE, 2024. – С. 661-668.
- 42.Clemm A. et al. Toward truly immersive holographic-type communication: Challenges and solutions //IEEE Communications Magazine. – 2020. – Т. 58. – №. 1. – С. 93-99.
- 43.Delaney B., Biocca F. Immersive virtual reality technology //Communication in the age of virtual reality. – 1995. – С. 57-124.
- 44.Chukhno O. et al. Interplay of user behavior, communication, and computing in immersive reality 6G applications //IEEE Communications Magazine. – 2022. – Т. 60. – №. 12. – С. 28-34.
- 45.Кучерявый, А.Е. Тактильный Интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками / А.Е. Кучерявый, М.А. Маколкина, Р.В. Киричек // Электросвязь. – 2016.– № 1. – С. 44-46
- 46.Горбачева Л. С., Волков А. Н. Анализ структуры и характеристик метавселенных //Информационные технологии и телекоммуникации. – 2024. – Т. 12. – №. 1. – С. 29-39.

47. Singh M. et al. Digital twin: Origin to future //Applied System Innovation. – 2021. – Т. 4. – №. 2. – С. 36.
48. Злотникова Р. Е. Обзор технологий беспроводных нательных сетей //Проблемы информатики. – 2018. – №. 1 (38). – С. 42-66.
49. Aloqaily M. et al. Integrating digital twin and advanced intelligent technologies to realize the metaverse //IEEE Consumer Electronics Magazine. – 2022. – Т. 12. – №. 6. – С. 47-55.
50. Dung O. M. A SURVEY ON PROTOCOL STACK FOR WIRELESS BODY AREA NETWORK //Journal of Science and Technology-IUH. – 2026. – Т. 79. – №. 1.
51. Adamu A. I. et al. A systematic literature review of advanced machine learning techniques in wireless body area networks: Application, challenges, and future directions //IEEE Access. – 2025. – Т. 13. – С. 194729-194778.
52. Saif S., Saha R. M-EEMH: an energy-efficient mobility aware multi-hop protocol for QoS-driven WBAN applications //Cluster Computing. – 2025. – Т. 28. – №. 10. – С. 670.
53. Квашнин Г. М., Квашнина О. П., Сорокина Т. П. Модель поглощения СВЧ-энергии в биологических тканях //Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2009. – №. 2. – С. 199-203.
54. Cavanagh P. R., Komi P. V. Electromechanical delay in human skeletal muscle under concentric and eccentric contractions //European journal of applied physiology and occupational physiology. – 1979. – Т. 42. – №. 3. – С. 159-163
55. Blackburn J. T. et al. Comparison of hamstring neuromechanical properties between healthy males and females and the influence of musculotendinous stiffness //Journal of electromyography and kinesiology. – 2009. – Т. 19. – №. 5. – С. e362-e369.
56. Go S. A. et al. Evaluating skeletal muscle electromechanical delay with intramuscular pressure //Journal of biomechanics. – 2018. – Т. 76. – С. 181-188.
57. Парамонова Н. А. и др. Мобильные многоканальные ЭМГ-системы в оценке подготовленности спортсменов. – 2022.

58. Abdel-Qader I., Almutairi F.S., Zubair A., Hussain S.J. A new time adjusting step-size LMS technique for noise cancellation framework with mean square deviation analysis // WSEAS Transactions on Systems. — 2018. — Т. 17. — С. 264–275.
59. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. — М.: Радио и связь, 1989.
60. Свейдан А. А. И., Архипова С. А. МЕТОДИКА РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ ЭМГ ДЛЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ ПЛОВЦОВ // Известия Тульского государственного университета. Физическая культура. Спорт. — 2021. — №. 1. — С. 116-122.
61. Zipf J.G.F., Tobias O.J., Seara R. Non-parametric VSS-NLMS algorithm with control parameter based on the error correlation // IEEE International Telecommunication Symposium (ITS). — 2010. — С. 1–5.
62. Chen Y., Sayed A.H. Improved Proportionate Normalized LMS Algorithms for Sparse System Identification // IEEE Transactions on Signal Processing. — 2006.
63. Boyer M. et al. Reducing noise, artifacts and interference in single-channel EMG signals: a review // Sensors. — 2023. — Т. 23. — №. 6. — С. 2927.
64. Abbaspour S., Fallah A. Removing ECG artifact from the surface EMG signal using adaptive subtraction technique // Journal of biomedical physics & engineering. — 2014. — Т. 4. — №. 1. — С. 33.
65. Бонилья В. Ф. и др. Удаление шумов и помех из электромиографического сигнала с помощью вейвлет-преобразования // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. — 2014. — №. 4. — С. 96-107.
66. Raggi M., Mesin L. Denoising the ECG from the emg using stationary wavelet transform and template matching // Electronics. — 2025. — Т. 14. — №. 17. — С. 3474.
67. Di Nardo F. et al. Wavelet-based assessment of the muscle-activation frequency range by EMG analysis // IEEE Access. — 2022. — Т. 10. — С. 9793-9805.

68. Becker A. C. et al. On the NP-VSS-NLMS algorithm: Model, design guidelines, and numerical results // *Circuits, Systems, and Signal Processing*. – 2024. – Т. 43. – №. 4. – С. 2409-2427.
69. Дмитриева, В.В. Новый метод взаимодействия с аватаром в мультивселенной на основе метода адаптивной обработки ЭМГ–сигналов / В.В. Дмитриева, А.Н. Волков, О.Е. Агранович // *Электросвязь*. – 2026. – № 3. – С. 10–19.
70. Siddiquee M. R. et al. Movement artefact removal from NIRS signal using multi-channel IMU data // *Biomedical engineering online*. – 2018. – Т. 17. – №. 1. – С. 120.
71. Солонина А. И. Цифровая обработка сигналов в зеркале MATLAB. – БХВ-Петербург, 2018.
72. Recommendation ITU-R M.2160-0 (11/2023). Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond. Geneva: ITU, 2023.
73. Recommendation ITU-T Y.4506 (01/2025). Reference architecture for the interworking of autonomous urban delivery robots. Geneva: ITU, 2025.
74. Recommendation ITU-T Y.4607 (07/2024). Requirements for the interworking of autonomous urban delivery robots. Geneva: ITU, 2024.
75. Recommendation ITU-T Y.3533: Cloud computing – Functional requirements for robotics as a service. Geneva: ITU-T, 2023.
76. Sanfeliu Cortés A., Hagita N., Saffiotti A. Network robot systems. – 2008.
77. Кучерявый Е.А. Принципы построения сенсоров и сенсорных сетей / Е.А. Кучерявый, С.А. Молчан, В.В. Кондратьев // *Электросвязь*, 2006. — №6 — С.10-15.
78. Мочалов В. А., Турута Е. Н. Стратегии размещения узлов сенсорной сети // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. – 2010. – Т. 10. – №. 1-3. – С. 211-216.
79. Татарникова Т. М., Бимбетов Ф., Горина Е. В. Дополнение к алгоритму кластеризации беспроводной сенсорной сети // *Программные продукты и системы*. – 2022. – Т. 35. – №. 2. – С. 222-228.

80. Van Huynh D. et al. Multiple relay robots-assisted URLLC for industrial automation with deep neural networks //2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). – IEEE, 2021. – С. 1-5.
81. Bezdek J. C., Ehrlich R., Full W. FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm. Computers & Geosciences. 1984;10(2–3):191–203.
82. Jangsher S., Li V. O. K. Resource allocation in cellular networks with moving small cells with probabilistic mobility //2014 IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC). – IEEE, 2014. – С. 1701-1705.
83. Wang P., Wang H. L. A modified FCM algorithm for MRI brain image segmentation //2008 International Seminar on Future BioMedical Information Engineering. – IEEE, 2008. – С. 26-29.
84. Sinaga K. P., Yang M. S. Unsupervised K-means clustering algorithm //IEEE access. – 2020. – Т. 8. – С. 80716-80727.
85. Abbas S. A. et al. K-means and k-medoids: Cluster analysis on birth data collected in city Muzaffarabad, Kashmir //IEEE Access. – 2020. – Т. 8. – С. 151847-151855.
86. Amroune N., Benazi M., Sayad L. An adaptative eps parameter of dbscan algorithm for identifying clusters with heterogeneous density //Computación y Sistemas. – 2024. – Т. 28. – №. 2. – С. 465-472.
87. Дмитриева В.В., Волков А.Н. Рой роботизированных сетевых координаторов для обеспечения работы группы костюмов телеприсутствия // Труды учебных заведений связи. 2026. Т.12. № 4. С.27-35
88. Картвелишвили В. М., Лебедюк Э. А. Метод анализа иерархий: критерии и практика //Вестник Российского экономического университета им. ГВ Плеханова. – 2013. – №. 6 (60). – С. 97-112.
89. Штовба С.Д. Муравьиные алгоритмы // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2003. Т. 4. № 4. С. 70–75.
90. Зорькин Д.Ю., Самофалова Л.В., Асанова Н.В. Муравьиный алгоритм на Python // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2025. № 1(243). С. 81–91. DOI:10.18522/2311-3103-2025-1-81-91.

91. Адонин Л.С., Владыко А.Г. Алгоритмы роевого интеллекта для решения задач оптимизации в системах телекоммуникаций // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 3. С. 7–24. DOI:10.31854/1813–324X–2025–11–3–7–24.
92. Cotton S. L., D'Errico R., Oestges C. A review of radio channel models for body centric communications //Radio Science. – 2014. – Т. 49. – №. 6. – С. 371-388.]
93. Ali K. et al. Body area networks at radio frequencies: Creeping waves and antenna analysis //Comptes Rendus. Physique. – 2015. – Т. 16. – №. 9. – С. 789-801.
94. Yazdandoost K, Sayrafian-Pour K. 2010. Channel model for body area network (BAN), IEEE p802.15-08-0780-12-0006, November 2010
95. V.V. Dmitrieva, A.E. Koucheryavy, "Wireless Channel Design Method for a Telepresence Suit Body Area Network Based on Metasurfaces," T-Comm. 2026. Vol. 20. No. 7, pp. 63-70. DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-7-63-70
96. Roelens L. et al. Path loss model for wireless narrowband communication above flat phantom //Electronics Letters. – 2006. – Т. 42. – №. 1. – С. 1.
97. Smith D. B. et al. Propagation models for body-area networks: A survey and new outlook //IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2013. – Т. 55. – №. 5. – С. 97-117.
98. N. Engheta and R. W. Ziolkowski, Eds., Metamaterials: Physics and Engineering Explorations. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2006.
99. V. Slyusar, "Metamaterials in Antenna Engineering: Basic Principles and Results," Pervaya Milya, vol. 18, no. 3–4, pp. 44–60, 2010.
100. T. T. Le and T. Y. Yun, "Miniaturization of a Dual-Band Wearable Antenna for WBAN Applications," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 19, no. 8, pp. 1452–1456, 2020.
101. Кисель Н., Черемисов В., Грищенко С. Чувствительность резонансных характеристик частотно-избирательной поверхности на основе SRR-элементов //Компоненты и технологии. – 2014. – №. 8 (157). – С. 146-148.

102. H. Attia, et al., “Metamaterial for Gain Enhancement of Printed Antennas: Theory, Measurements and Optimization,” in Proc. 2011 Saudi Int. Electron., Commun. Photon. Conf. (SIECPC), 2011, pp. 1–6.
103. Goswami D., Sarma K. C., Mahanta A. Path loss variation of on-body UWB channel in the frequency bands of IEEE 802.15. 6 standard //Healthcare technology letters. – 2016. – Т. 3. – №. 2. – С. 129-135.
104. Balanis C. A. Antenna theory: analysis and design. – John wiley & sons, 2016.
105. Гольдштейн Л. Д. Электромагнитные поля и волны. – Рипол Классик, 1956.
106. Rout D. K., Das S. Narrowband interference mitigation in body surface to external communication in UWB body area networks using first-order Hermite pulse //International Journal of Electronics. – 2016. – Т. 103. – №. 6. – С. 985-1001.
107. Cui T. J. et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials //Light: science & applications. – 2014. – Т. 3. – №. 10. – С. e218-e218.
108. Бородин А. С. и др. Зеркальные миры–сетевая метавселенная 2.0 //Электросвязь. – 2026. – №. 7. – С. 11-23.
109. Дмитриева В. В., Волков А. Н. Исследование стандартизации в области костюмов телеприсутствия для взаимодействия с объектами мультивселенной.
110. Бородин П. Н., Кучерявый А. Е. Интернет вещей как новая концепция развития сетей связи //Информационные технологии и телекоммуникации. – 2014. – Т. 2. – №. 3. – С. 7.
111. Бондарик В. Н., Кучерявый А. Е. Прогнозирование развития Интернета Вещей на горизонте планирования до 2030 года //Труды Московского физико-технического института. – 2013. – Т. 5. – №. 3 (19). – С. 092-096.
112. Сержантов Я. Ю. 6G: первые концепции-THz-диапазоны и искусственный интеллект в радиоканале. – 2026.

113. M. Q. Qi, et al., “Suppressing Side-Lobe Radiations of Horn Antenna by Loading Metamaterial Lens,” Sci. Rep., vol. 5, Art. no. 9113, 2015.
114. Tiwari P., Pathak S. K., Siju V. Design, development and characterization of resistive arm based planar and conformal metasurfaces for RCS reduction //Scientific Reports. – 2022. – Т. 12. – №. 1. – С. 14992.
115. Дмитриева В. В., Коровин К. О., Ликонцев А. Н. Синтез диаграмм направленности антенных решеток для больших углов сканирования с использованием генетического алгоритма //Труды учебных заведений связи. – 2024. – Т. 10. – №. 1. – С. 49-57.
116. Вендик И. Б., Вендик О. Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (Обзор) //Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – №. 1. – С. 3-28.
117. Лагарьков А. Н. и др. Электродинамика и электрофизика метаматериалов //Теплофизика высоких температур. – 2010. – Т. 48. – №. 6. – С. 1031-1048.
118. Дмитриева В. В. Программа адаптивной фильтрации электромиографических сигналов на базе двухкомпонентного алгоритма LMS : программа для ЭВМ : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026687677, Российская Федерация. Заявка № 2026687551; заявл. 10.09.2026; опубл. 10.09.2026, бюл. № 9.

ПРИЛОЖЕНИЕ

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
ИМ. ПРОФ. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(СПбГУТ)

Юридический адрес: набережная реки Мойки,
д. 61, литера А, Санкт-Петербург, 191186

Почтовый адрес: пр. Большевиков, д. 22, корп. 1,
Санкт-Петербург, 193232

Тел.(812) 3263156, Факс: (812) 3263159

<http://sut.ru>

E-mail: rector@sut.ru

ОКПО 01179934 ОГРН 1027809197635

ИНН 7808004760 КПП 784001001

ОКТМО 40909000

07.09.2026 № 121/54-99

на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе,
доктор техн.наук, доцент



Рабин

Алексей Владимирович

Акт

о внедрении научных результатов, полученных Дмитриевой Викторией Викторовной в диссертационной работе «Исследование и разработка моделей и методов построения натальных сетей и пикосот для костюмов телеприсутствия»

Комиссия в составе и.о. декана факультета Инфокоммуникационных сетей и систем В.С. Елагина, доцента кафедры сетей связи и передачи данных Р.А. Дунайцева и заведующей лабораторией кафедры сетей связи и передачи данных О.И. Ворожейкиной составила настоящий акт в том, что научные результаты, полученные Дмитриевой Викторией Викторовной, использованы:

1. При чтении лекций и проведении практических занятий для бакалавров по дисциплине «Самоорганизующиеся сети» (Рабочая Программа регистрационный номер №_22.05/430-Д), разделы Программы:
 - Беспроводные сенсорные сети;
 - Качество обслуживания в самоорганизующихся сетях;
2. При чтении лекций и проведении практических занятий для магистров по дисциплине «Современные проблемы науки в условиях перехода к сетям шестого поколения (6G)» (Рабочая Программа регистрационный номер № 24.05/537-Д), раздел Программы:
 - Граничные вычисления. Туманные вычисления. Новая микросервисная архитектура сети. Робототехника и сети связи.
 - Метавселенная. Сетевая вселенная. Костюмы телеприсутствия.

3. При чтении лекций и проведении практических занятий для аспирантов по дисциплине «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» (Рабочая Программа регистрационный номер №_21.05/780-Д), раздел Программы:

- Современные тенденции развития инфокоммуникационной системы, основные направления научных исследований;

- Основные задачи построения и эксплуатации систем, сетей и устройств связи.

В указанных дисциплинах используются следующие новые научные результаты, полученные Дмитриевой Викторией Викторовной в диссертационной работе:

1. Метод взаимодействия с аватаром в метавселенной на основе натальной сети ЭМГ-датчиков с адаптивной обработкой сигналов электромиограммы с помощью адаптивного двухкомпонентного алгоритма с переменным шагом, позволяющим учитывать динамику пользователя, а также снизить влияние артефактов движений пользователя при сохранении полезного сигнала ЭМГ с коэффициентом корреляции 0.82.

2. Модель костюма телеприсутствия на основе цилиндрической системы координат и метод организации беспроводных каналов натальной сети с использованием миниатюрных ячеек метаповерхности, позволяющей учитывать кривизну подложки равную 30 мм, с сохранением характеристик беспроводных каналов связи на частоте 5 ГГц.

3. Модель и метод организации связи в пикосоте группы костюмов телеприсутствия, отличающийся от известных тем, что в качестве БС используются мобильные роботы-ретрансляторы, следующие по оптимальному маршруту, определяемому по алгоритму АСО с учетом характеристик каналов связи и обеспечивающих при заданных параметрах радиуса зоны обслуживания сетевого робота, усредненное значение покрытия выше на 5.8%.

И.о. декана факультета ИКСС
к.т.н., доцент



В.С. Елагин

Доцент кафедры ССиПД
к.т.н., PhD



Р.А. Дунайцев

Зав. лабораторией кафедры ССиПД



О.И. Ворожейкина

Экз. _ из _



МИНИСТЕРСТВО
ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ
И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«Национальный исследовательский центр
телекоммуникаций имени М.И.
Кривошеева»
(ФГАУ НИЦ Телеком)
ОКПО 56622156, ОГРН 1227700388827
ИНН/КПП 9709082715/770901001

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального директора
по науке ФГАУ НИЦ Телеком,
кандидат технических наук

 Д.А. Климов
« » 2026 г.

№ _____

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Дмитриевой Виктории Викторовны на тему «Исследование и разработка моделей и методов построения нательных сетей и пикосот для костюмов телеприсутствия», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15– Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Комиссия в составе:

Председатель комиссии –	заместитель директора НТЦ Анализа ЭМС-ИПБТС В.Э. Веерпалу, д.т.н.;
Члены комиссии –	заместитель начальника отдела НТЦ Анализа ЭМС-ИПБТС Е.В. Тонких, к.т.н.;
	начальник отдела НТЦ Анализа ЭМС-ИПБТС Н.В. Варламов,

установила, что в диссертационной работе Дмитриевой Виктории Викторовны, старшего преподавателя кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, на тему «Исследование и разработка моделей и методов построения нательных сетей и пикосот для костюмов телеприсутствия» получены новые научные результаты, которые внедрены в исследовательском периоде 2026 года в рамках выполнения работ для Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации по научному и экспертно-аналитическому обеспечению функций администрации связи Российской Федерации (АС России) в части международно-правовой защиты интересов Российской Федерации в области электросвязи и радиосвязи в виде предложений (вкладов) от имени АС России в Сектор стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи (МСЭ-Т).

Данные вклады были представлены и одобрены на заседаниях Исследовательской комиссии 11 (ИК11) «Требования к сигнализации, протоколы, спецификации испытаний и борьба с контрафактными устройствами электросвязи/ИКТ» МСЭ-Т 14 июля – 22 июля 2026 года как предложения о начале разработки новой Рекомендации МСЭ-Т Q.FNPA-AIA «Концепция удаленной оценки производительности сети и сравнительного анализа с использованием ИИ-агентов и автономных городских роботов (Framework for remote Network Performance Assessment and benchmarking using AI agents and autonomous urban robots)» (док. C541-R1, C542-R1) и нового Технического Отчета МСЭ-Т QSTR-TMSM «Тестирование сервисов метавселенной в модельной сети (The testing of the metaverse services on the model network)» (док. C543-R1, C544-R1).

Вышеуказанные вклады определили позицию АС России на собраниях ИК11 МСЭ-Т по подходам к тестированию сервисов метавселенной на модельной сети, включая костюмы телеприсутствия, а также тестированию и удаленной оценки производительности сети для различных видов применений, таких как автономные городские роботы и агенты искусственного интеллекта, для условий сетей пятого и интегрированных сетей шестого поколения. Они стали основой для разработки

соответствующих рекомендаций и отчетов Сектора стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи.

Председатель комиссии

В.Э. Веерпалу

Члены комиссии

Е.В. Тонких

Н.В. Варламов

Подписи В.Э. Веерпалу, Е.В. Тонких, Н.В. Варламова заверяю.

ФГАУ НИЦ Телеком

*начальник
отдела кадров*



*Варламов Е.
14.08.2016*



АКТ

о внедрении научных результатов диссертационной работы,

Дмитриевой Виктории Викторовны

на тему «Исследование и разработка моделей и методов построения нательных сетей

и пикосот для костюмов телеприсутствия»

в ООО «НТЦ РАССВЕТ»

Комиссия в составе:

Председатель комиссии – заместитель генерального директора, Шитова Наталья Григорьевна

Члены комиссии: -

- руководитель проектов, Сергеева Екатерина Александровна
- ведущий инженер, Липин Владислав Александрович

настоящим актом подтверждает, что научные результаты диссертационной работы Дмитриевой Виктории Викторовны «Исследование и разработка моделей и методов построения нательных сетей и пикосот для костюмов телеприсутствия», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15– Системы, сети и устройства телекоммуникаций, внедрены в ООО «НТЦ РАССВЕТ» при разработке инструментов моделирования специализированной версии платформы «Аврора: Многоцелевая платформа имитационного моделирования и прототипирования системного уровня для разработки протоколов, оборудования и сетей связи» (свидетельство ГРП № 2023680297 от 28.09.2023г.).

При этом были использованы следующие новые научные результаты из диссертации Дмитриевой В.В.:

- Метод взаимодействия с аватаром в метавселенной на основе нательной сети ЭМГ-датчиков с адаптивной обработкой сигналов электромиограммы с помощью адаптивного двухкомпонентного алгоритма с переменным шагом позволяющим учитывать динамику пользователя, а также снизить влияние артефактов движений

- пользователя при сохранении полезного сигнала ЭМГ с коэффициентом корреляции 0.82;
- Модель костюма телеприсутствия на основе цилиндрической системы координат и метод организации беспроводных каналов нательной сети с использованием миниатюрных ячеек металлоповерхности, позволяющей учитывать кривизну подложки равную 30 мм, с сохранением характеристик беспроводных каналов связи на частоте 5 ГГц.

Данные модели и методы были использованы при создании библиотек объектов и инструментов моделирования, включенных в составе специализированной версии платформы прототипирования «Аврора» разработки компании ООО «НТЦ РАССВЕТ».

Председатель комиссии:

Заместитель генерального директора



Н.Г.Шитова

Члены комиссии -

руководитель проектов



Е. А. Сергеева

ведущий инженер



В.А.Липин

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026687677

**Программа адаптивной фильтрации
электромиографических сигналов на базе
двухкомпонентного алгоритма LMS**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (RU)*

Автор(ы): *Дмитриева Виктория Викторовна (RU)*



Заявка № 2026687551

Дата поступления 10 сентября 2026 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 10 сентября 2026 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 004570447, id=305316408818475729506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 08.09.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов