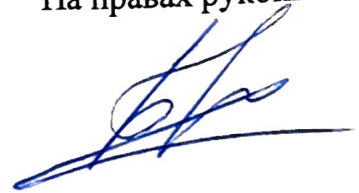


На правах рукописи

**Брагин Кирилл Игоревич**



**Исследование электромагнитной совместимости беспроводных систем связи пятого поколения (5G) в городской среде при плотной интеграции устройств**

Направление подготовки

11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

Программа магистратуры – Сети, системы и устройства телекоммуникаций

**АВТОРЕФЕРАТ**

магистерской диссертации

на соискание квалификации (степени) магистра

Екатеринбург 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» Уральский технический институт связи и информатики (филиал) в г. Екатеринбурге (УрТИСИ СибГУТИ)

**Научный руководитель:**  
кандидат технических наук



Д.В. Денисов

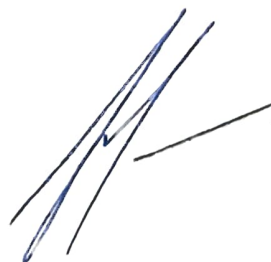
**Рецензент:**

Кусайкин Д.В.



Защита состоится «28» июня 2021г. в 09:00 часов в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» Уральский технический институт связи и информатики (филиал) в г. Екатеринбурге (УрТИСИ СибГУТИ), г. Екатеринбург, ул. Репина, д. 15.

**Секретарь государственной аттестационной комиссии:**



О.А. Шумилова

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.**

Одной из активно развивающихся отраслей телекоммуникаций являются беспроводные радиосети. Например, сегодня Wi-Fi – это один из распространенных стандартов, который может избавить клиентов сети от большого количества проводов дома, в кафе, ресторанах, метро, обеспечивая гибкий доступ к приложениям и услугам. Поколения мобильной связи сменяются каждые десять лет, открывая перед пользователями все больше новых возможностей. Обеспечение доступа к информации при передвижении абонента обуславливает рост популярности беспроводных средств связи. С развитием технологий увеличивается спектр предоставляемых услуг, появляются новые решения.

Беспроводные устройства окружают человека все больше и больше, и особенно много их в интеллектуальной технике. К такой можно отнести беспилотные автомобили. Для того чтобы сложная система функционировала без участия человека ей необходимо большое количество датчиков. Множество датчиков получают информацию с помощью электромагнитных волн определенной частоты. Возникновение помех в передающем тракте ведет к искажению получаемой информации, увеличению времени её обработки или даже полной потере. Для беспилотного транспорта критически важно получение достоверных данных об окружающей обстановке и препятствиях, это влияет на точность и своевременность принятия решений в различных ситуациях. Поэтому, вопросы анализа электромагнитной совместимости устройств выходят на передний план.

К основным требованиям и исходным данным можно отнести следующие пункты: модели распространения радиоволн в городской среде в соответствии с рекомендациями Международного союза электросвязи, требования и критерии оценки качества связи для беспилотного транспорта, стеки беспроводных технологий.

**Актуальность исследования.** Обеспечение нормальной работы совместно работающих технических средств в мобильных сетях нового поколения (5G) является основной широко распространенной научной проблемой, от решения которой зависит качество предоставляемых услуг и дальнейшее развитие беспроводной связи.

Одним из важнейших элементов Четвёртой промышленной революции является беспроводная передача данных через сеть Интернет.

Источником электромагнитных помех могут являться промышленные установки, линии передачи электроэнергии, генераторы, сварочные аппараты и перекрестные помехи от других радиоэлектронных средств. А также естественные наводки от других систем связи в следствии многолучевого распространения сигнала в городской среде.

В сетях 5G, по сравнению с предшественниками, увеличены частоты, что позволило расширить полосу пропускания каналов, увеличить скорость и количество передаваемых данных. Однако, это приводит к уменьшению

дальности связи при учете, что допустимое излучение регулируется санитарными нормами. Решением данной проблемы является увеличение числа приемо-передающих устройств, и как упоминалось ранее, это также может привести к увеличению помех.

Следовательно, требуется обеспечить приемлемый уровень помехозащищенности, который удовлетворял бы минимальным требованиям в любой ситуации, и для этого необходимо оптимизировать расположение источников электромагнитного излучения на беспилотном транспорте и объектах связи.

Несмотря на наличие официальной стратегии развития в области беспилотного транспорта Российской Федерации и мобильных сетей 5G, исследований на тему электромагнитной совместимости в ней достаточно мало, они действительно рассматривают проблемы транспортной и информационной инфраструктур, методы их решения. Еще меньше исследований на данную тематику обнаруживается, при рассмотрении взаимодействия беспроводных систем, датчиков беспилотного транспорта и мобильных сетей пятого поколения как единой структуры, что обуславливает особую актуальность. Эта информация уже начинает появляться в трудах зарубежных авторов.

**Объект исследования** – электромагнитная совместимость беспроводных и мобильных систем связи пятого поколения.

**Предмет исследования** – создание модели для выявления мешающего взаимодействия в мобильных системах 5G и типовых радиочастотных сценариях.

**Цель работы** заключается в том, чтобы исследовать электромагнитную совместимость беспроводных систем связи пятого поколения (5G) в городских условиях при плотной интеграции устройств.

**Для достижения означенной цели необходимо решить следующие задачи:**

- 1) провести анализ предметной области и литературы по исследуемой тематике;
- 2) исследовать особенности распространения радиоволн в городской среде;
- 3) рассмотреть требования и критерии оценки качества связи для беспилотных аппаратов;
- 4) описать стеки беспроводных технологий для беспилотного транспорта;
- 5) провести сравнительный анализ программного обеспечения и его возможностей для моделирования беспроводных систем;
- 6) описать порядок и методику проведения экспериментов;
- 7) провести моделирование и анализ беспроводных систем при различных сценариях.

**Теоретическая значимость** исследования обоснована следующим:

- исследован характер распространения радиоволн в городской среде;

- использовано современное инженерное программное обеспечение для построения и анализа электромагнитных полей и волн;
- синтезировано несколько сценариев взаимодействия беспроводных систем, которые могут возникнуть при их работе;
- полученные в программной среде модели являются масштабируемыми и могут изменяться в дальнейшем, в зависимости от необходимых входных условий.

#### **Практическая значимость.**

Практическая значимость заключается в возможности использования созданных математических и программных моделей при проектировании и построении современных мобильных сетей связи пятого поколения, а также в образовательных целях, для подготовки научных кадров в области связи.

**Методология и методы исследования.** Решение поставленных задач осуществлялось с помощью строгих методов электромагнитного анализа интегрированных в ANSYS EMIT и HFSS для анализа излучения в городской среде при плотной интеграции устройств.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- моделирование и анализ многолучевого распространения в сетях 5G в программной среде ANSYS с помощью математического аппарата SBR;
- моделирование и анализ сценария беспроводных систем беспилотного автомобиля и светофора (V2I);
- моделирование и анализ электромагнитной совместимости беспроводных систем связи в городской среде при плотной интеграции устройств.

**Степень достоверности результатов исследования** обусловлена следующими фактами:

- теория построена на известных и проверяемых данных с использованием методов теории моделирования, теории эксперимента и согласуется с экспериментальными данными по теме диссертации;
- для экспериментальных работ результаты получены в специальной программной среде для исследования электромагнитных полей и волн при различных параметрах;
- построенные модели являются базовыми, обладают гибкостью и масштабируемостью;
- использованы современные средства сбора и обработки данных.

#### **Апробация результатов.**

Основные результаты диссертации были получены и использованы в рамках научно-исследовательских работ (НИР), в том числе:

- в рамках публикации в научном журнале «Актуальные исследования» №4(7), Белгород 2020 г;
- в рамках доклада на VI Всероссийской научно-технической конференции «Цифровая экономика. Новое время – новые технологии. Росинфоком-2020» (Самара, 2020).

Также результаты рассматривались в рамках Международной научно-практической конференции «Инфокоммуникационные технологии:

актуальные вопросы цифровой экономики» (Екатеринбург, 2021) которая проходила в период 17-18 февраля 2021 года. По итогам, опубликована статья в сборнике трудов конференции.

По теме диссертации опубликовано 3 научные работы, в том числе тезисы доклада на конференции, статья в научном журнале и сборнике конференции, две работы индексируются в РИНЦ. Еще одна статья отправлена для публикации в журнале, но на момент написания данного автореферата еще не обработана.

Диссертационная работа включает введение, три главы, заключение, список литературы из 24 наименований. Объем диссертации 85 страниц, включены также 43 рисунка и 3 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложена общая характеристика диссертационной работы: показана ее актуальность, сформулирована цель работы, отражена практическая ценность. Также описаны основные вопросы и проблемы связанные с темой диссертации.

**В первой главе (Анализ предметной области)** рассмотрены научные труды (публикации) по теме исследования. Представлены основные моменты и проблемы, связанные с ролью беспроводных систем связи и беспилотного транспорта (в качестве подходящего примера плотной интеграции устройств), перспективы и пути дальнейшего развития.

Далее рассмотрены основные моменты по каждой из исследуемых публикаций. Интерес представляют исследования в области взаимодействия беспроводных систем связи и беспилотного транспорта как единой структуры.

Плотная интеграция беспроводных систем довольно распространена. Смартфоны стали повседневной вещью человека, сочетают в себе множество плат, устройств и антенн, расположение которых влияет на качество связи; системы «Умного дома», сочетающие в себе сразу несколько беспроводных стандартов; даже городская среда сама по себе, ведь почти у каждого пешехода есть смартфон, часы, фитнес-трекеры, наушники; беспилотные автомобили с множеством датчиков. Иными словами, плотность беспроводных систем в городской среде крайне высока и разнообразна. Большой интерес представляет беспилотный транспорт, передвигающийся по уличным каньонам, в котором также может находиться человек с множеством электронных устройств, поэтому, в дальнейшем рассматривать электромагнитную совместимость именно для такой системы достаточно актуально и целесообразно.

Развитие общества сопровождается развитием коммуникаций, как информационных, так и транспортных, и, чем обширнее территории страны, тем выше важность этих систем. В настоящее время, отрасли коммуникаций переплетаются, помогая решать глобальные задачи и предлагая совершенно новые сервисы и технологии. К таковым можно отнести беспилотный транспорт, который зародился из-за стремления человека автоматизировать процессы управления автомобилями.

Возможности, которые предоставит цифровизация транспортно-логистической системы, анализирует кандидат экономических наук А.В. Дмитриев в труде «Управление транспортно-логистическими системами в условиях цифровизации». Отмечается необходимость модифицировать всю отрасль с применением цифровых технологий, что даст ряд определенных преимуществ для более плавного перехода к автономным перевозкам. В решении этой задачи поможет развитие систем датчиков и инфокоммуникациях.

Важно отметить, что для соблюдения повышенных требований к безопасности БТС, используется множество датчиков, собирающих информацию о внешнем мире и состоянии транспортного средства, которая

потом передается и обрабатывается на бортовом микрокомпьютере, для последующего принятия решений.

Рассматриваются случаи дорожно-транспортных происшествий с участием беспилотного транспорта в связи с недостаточным уровнем совершенства систем управления, мониторинга окружающей среды и сбора данных. Поднимается проблема современных беспилотных решений, основанных на «интеллекте в машине», исследуются нормативные документы и стратегии развития автомобильной промышленности, концепция создания и развития сетей 5G/ИМТ-2020.

После анализа публикаций по тематике исследования, поднимаются вопросы распространения радиоволн в городской среде.

Вопросам распространения радиоволн в системах мобильной связи посвящено большое количество научных трудов, в которых приводятся различные математические модели распространения радиоволн (РРВ). Существуют модели детерминированные, статистические, эмпирические и полуэмпирические. Детерминированные модели основываются на радиоволновой физике. В статистических моделях используются результаты экспериментальных исследований. Следует отметить, что, несмотря на многочисленные результаты, полученные при проведении исследований по определению характеристик электромагнитного поля при распространении радиоволн в городских условиях, до сих пор не существует единой методики, позволяющей с высокой степенью достоверности определить значение поля в различных участках радиотрассы.

В разделе приводятся часто используемые модели распространения радиоволн, регламентированные рекомендациями радио секции МСЭ. Одной из таковых является модель ослабления в свободном пространстве.

Формула потерь в свободном пространстве выглядит следующим образом:

$$D_{FSPL} = \left( \frac{4\pi df}{c} \right)^2, \quad (1)$$

где  $D_{FSPL}$  – потери в свободно пространстве;

$d$  – расстояние между антеннами, м;

$f$  – частота сигнала, Гц;

$c$  – скорость света в вакууме.

Удобна её формулировка для использования с логарифмическими единицами:

$$D_{FSPL} = 20 \log_{10} d + 20 \log_{10} f - 147.55. \quad (2)$$



Обычно, данная формула является составной частью для других математических моделей, когда антенны находятся в прямой видимости, например – двухлучевой. Двухлучевая математическая модель основана на луче прямой видимости и луча, возникающего за счет отражения от земной поверхности. Таким образом, в точке приема оказываются два луча, напряженности полей которых могут различаться по фазе и амплитуде. Результирующее поле определяется за счет интерференции двух лучей. При этом, мощность в точке приема запишется в следующем виде:

$$P_r = P_{r.FSPL} + 5 + 20 \log_{10} \left( \sin \frac{2\pi m h_t h_r}{\lambda d} \right), \quad (3)$$

где  $P_{r.FSPL}$  – мощность сигнала в точке приема в свободном пространстве;  
 $m$  – коэффициент отношения высоты приемной антенны над Землей;  
 $h_t$  – высота передающей антенны;  
 $h_r$  – высота приемной антенны;  
 $\lambda$  – длина волны излучаемого сигнала.

Геометрическая интерпретация двухлучевой модели изображена на рисунке 1.

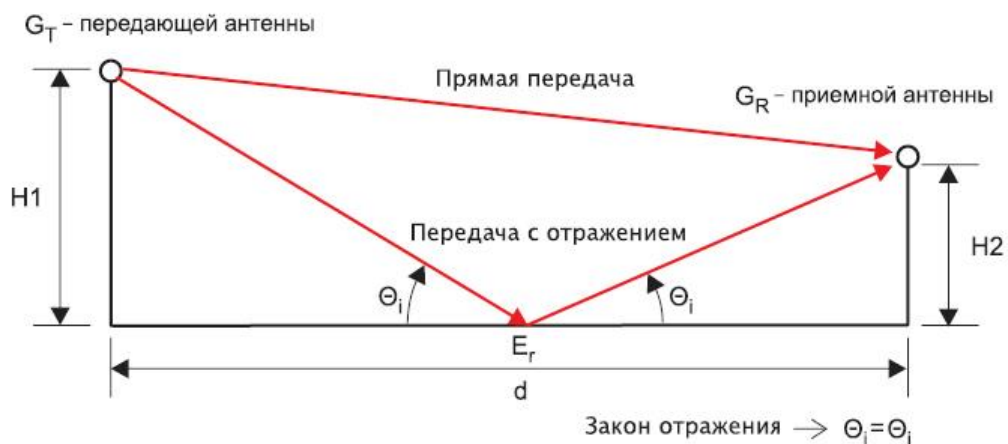


Рисунок 1 – Геометрическая интерпретация двухлучевой модели

В городских условиях возникают различные специфические условия, такие как многократные отражения, теневые зоны, пространственное дрожание сигнала в точке приема и многое другое. Вследствие этого возникает многолучевой характер РРВ. В точку приема приходят волны с различных направлений, с разными временными задержками и амплитудой. Уравнение результирующей мощности имеет вид:

$$D_{MB} = D_0 + 10n \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma}, \quad (4)$$

где  $D_0$  – базовая потеря при передаче на эталонном расстоянии;

$d_0$  – эталонное расстояние (обычно равно 1 м);

$n$  – экспонента затухания для городских условий;

$X_\sigma$  – случайная величина при логарифмически нормальном замирании.

Модель многолучевого распространения является статистической и описана в рекомендации ITU-R P.1791.

В свежих рекомендациях МСЭ уже учитывается развитие мобильной связи в диапазоне миллиметровых волн. Отмечается, что в условиях городской среды дорожное движение оказывает влияние на распространение, но отражения от зданий будут преобладающим механизмом распространения. В современном прогнозировании характера распространения луча и области покрытия беспроводной сети чаще прибегают к использованию технологии трассировки луча (ray tracing).

В заключительной части главы рассмотрена архитектура для связи между транспортным средством и любым объектом дорожной инфраструктуры – Vehicle-to-Everything (V2X), рисунок 2.

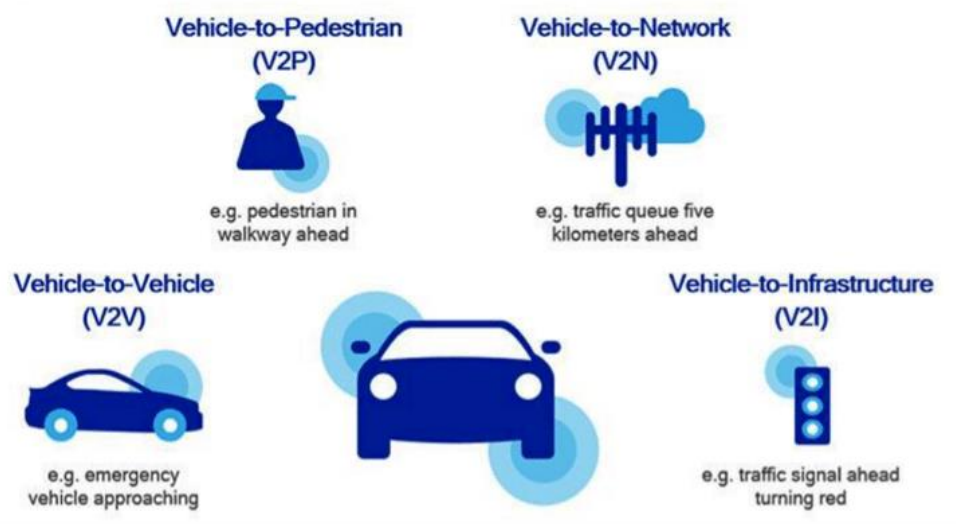


Рисунок 2 – Схематичное представление технологии V2X

В традиционном транспортном средстве системы V2X могут передавать водителю важную информацию о ненастной погоде, близлежащих авариях, дорожных условиях и опасной деятельности находящихся поблизости транспортных средств. В автономных транспортных средствах V2X предоставляет дополнительную информацию существующей навигационной системе автомобиля.

Уровни автономности. Классификация автоматизации автомобилей разработана «Сообществом автомобильных инженеров» (SAE) и содержит шесть уровней.

Уровень 0. Автоматизация отсутствует, водитель полностью контролирует ситуацию. К этому же уровню относятся машины с круиз-контролем.

Уровень 1, «hands on», «помощь водителю». Система и водитель управляют автомобилем вместе. Пример: водитель управляет рулем, а

система регулирует мощность двигателя и тормозит, сохраняя заданную скорость, и, при необходимости соблюдения дистанции, снижает её (адаптивный круиз-контроль). Другой пример - автоматическая парковка, когда скорость определяется водителем, а руление происходит автоматически.

Уровень 2, «hands off», «частичная автоматизация». Система управляет автомобилем, разгоном, торможением и рулём. Водитель следит за поездкой и готов вмешаться в любое время, если система не может правильно отреагировать. Несмотря на название, такие системы часто требуют от водителя держать руки на руле, что означает подтверждение готовности вмешаться.

Уровень 3, «eyes off», «условная автоматизация». От водителя не требуется немедленной реакции. Он может, например, писать сообщения или смотреть фильм. Сама система реагирует на ситуации, требующие немедленных действий, таких как экстренное торможение. От водителя требуется вмешательство в течение какого-то ограниченного времени, определённого производителем.

Уровень 4, «mind off», «широкая автоматизация». Отличается от уровня 3 тем, что от водителя не требуется постоянного внимания. Например, он может лечь спать или покинуть место водителя. Полностью автоматическое вождение осуществляется только в некоторых геонодах или в некоторых ситуациях, например, в пробках. Вне таких мест или ситуаций система может остановить движение и припарковать автомобиль, если водитель не берет управление на себя.

Уровень 5, «steering wheel optional», «полная автоматизация». Никакого вмешательства человека не требуется.

Технические требования к видам коммуникаций в V2X впервые были закреплены 3GPP в Release 14 – серии стандартизированной документации к системам LTE-A Pro, которые также называют 4.5G или Pre-5G. Стандарт позволяет использовать для передачи данных лицензированный и нелицензированный спектр LTE.

Существует два типа технологии связи V2X в зависимости от используемого стека: на основе WLAN (Wireless local area network) и на основе сотовой связи (Cellular).

Радиосвязь ближнего действия в транспортной среде – технология DSRC (Dedicated short-range communications, выделенная связь ближнего действия) – один из важнейших компонентов интеллектуальных транспортных систем (ИТС) построенных на основе WLAN. Частота несущей в диапазоне 5.8 ГГц. Устройства DSRC, созданные в соответствии с международными стандартами IEEE 802.11p и IEEE 1609, позволяют решать проблему оперативной передачи данных между автомобилями и объектами транспортной инфраструктуры с одновременной минимизацией расходов на центры обработки данных, без создания дорогостоящей инфраструктуры и задействования глобальных каналов коммуникаций.

Технология DSRC является разновидностью технологии Wi-Fi для применения на движущемся транспорте и обеспечивает следующие характеристики:

- практически мгновенное (менее 1/4 секунды) соединение;
- передача данных на скоростях до 100 мегабит на дальность до 1 км;
- устойчивая работа при движении транспорта со скоростью до 250 км/ч.

C-V2X (Cellular V2X) – более поздняя мобильная альтернатива 802.11p, разработку релизов сотовых технологий координирует 3GPP для достижения KPI в V2X. При разработке нового релиза (англ. Release, релиз – один из видов стандартизации в консорциуме) посчитали, что LTE-V2X не имеет достаточного уровня развития, чтобы поддерживать обратную совместимость с другими поколениями связи. 3GPP Release 8, известный как LTE, вышел 3 декабря 2009 года, и его разработка заняла примерно 3 года. 3GPP релиз 10 LTE-Advanced вышел в 2011 году, 3GPP релиз 14 LTE-V2X – в 2014. Поколение 5G начинается с 3GPP Release 15. Таким образом, согласно карте развития 3GPP, проекты коммерциализации 5G все еще на ранней стадии. По опыту релиза 3G и 4G, можно предположить, что реалистично ожидать готовый к внедрению 5G-NR в 3GPP Release 17, который случится в конце 2021 года.

Как было отмечено ранее, первый сотовый V2X стандарт LTE-V2X был завершен 3GPP в 2016 в релизе 14. Значительные изменения ожидаются с будущим стандартом 5G-NR, в котором определены новые V2X сценарии и требования. Финальную версию спецификаций планируют закончить к концу 2019 в релизе 16. На основе возможных настроек физического уровня предполагается, что NR-V2X будет ориентироваться на NR uplink (UL). Так как NR-UL спецификации уже доступны, можно спроектировать экспериментальную среду для симуляции NR-V2X.

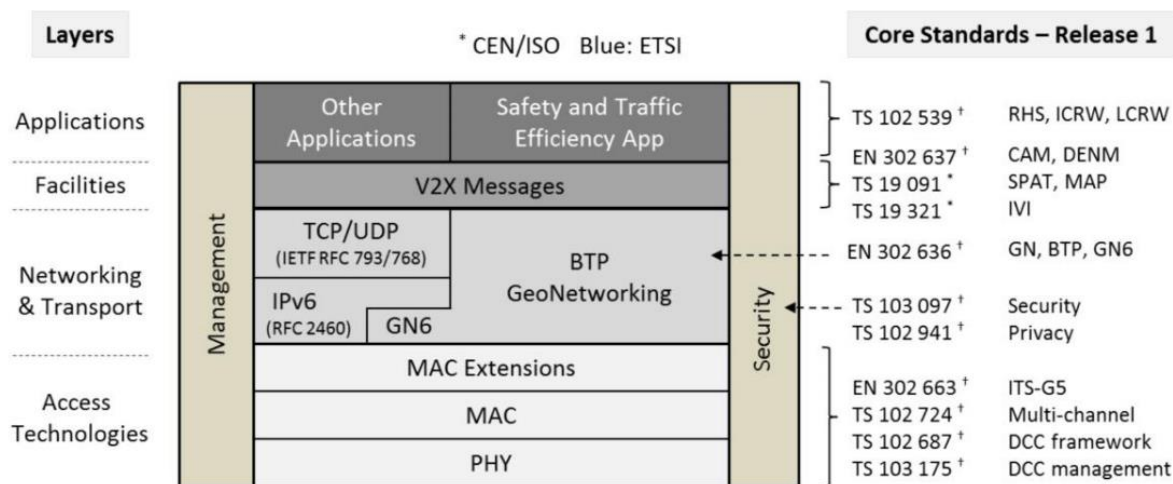


Рисунок 3 – Стек протоколов C-V2X

**Во второй главе (Разработка модели для проведения эксперимента)** проведен сравнительный анализ программного обеспечения

для моделирования беспроводных систем, рассмотрены возможности используемого программного пакета, представлен эталонный образец расчета электромагнитной совместимости в ANSYS HFSS.

Для исследования проблемы, поднимаемой в работе, необходимо применять ряд специализированных аппаратно-программных средств и комплексов моделирования таких как MATLAB, MathCAD, Radio Inspector, ANSYS. Каждый из них по-своему уникален и предоставляет различный функционал.

MATLAB (сокращение от англ. «Matrix Laboratory», в русском языке произносится как Матлáb) – пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений. Пакет используют более миллиона инженерных и научных работников, он работает на большинстве современных операционных систем, включая Linux, Mac OS, Solaris и Windows.

Пользователю предоставляется большое количество функций для анализа данных, практически из всех областей математики, удобные средства для разработки алгоритмов, включая высокоуровневые с использованием концепций объектно-ориентированного программирования. Для MATLAB имеется возможность создавать специальные наборы инструментов (англ. toolbox), расширяющие его функциональность. Наборы инструментов представляют собой коллекции функций и объектов, написанных на языке MATLAB для решения определённого класса задач. Компания Mathworks поставляет наборы инструментов, которые используются во многих областях.

Следует отметить, что на данный момент, нет уникального набора инструментов, который позволил бы провести расчеты для V2X в MATLAB. Этого можно добиться путем применения сразу нескольких инструментов, но процесс будет весьма трудозатратным и потребует большого количества времени для поиска и изучения материалов.

Чтобы полностью раскрыть возможности MATLAB и с легкостью решать требуемые задачи, придется сначала разобраться объемной документацией, ведь широкие возможности требуют более длительного изучения. Нельзя сказать, что MATLAB – простая программа.

Еще одним недостатком является то, что при создании сложных моделей приходится строить довольно громоздкие многоуровневые блок-схемы, не отражающие естественной структуры моделируемой системы. Также недостатки пакета связаны с стремлением вставить в пакет все, что только можно.

В целом, можно подвести итог, Matlab может подойти для решения задач электромагнитной совместимости, его освоение длительный процесс, но интуитивный. Следует рассмотреть еще несколько решений, для лучшей выборки.

Существует отечественный пакет измерительных программ для анализа радиочастотного спектра, поиска опасных сигналов и измерения параметров высокочастотных излучений «RadioInspector». Специальное программное обеспечение (СПО) «RadioInspector» представляет собой пакет

измерительных и управляющих программ, предназначенных для обеспечения эффективного и высокоскоростного процесса инструментального контроля радиочастотного спектра, поиска опасных источников радиосигналов, выполнения метрологически аттестованных измерений параметров излучений, выполнения ряда других прикладных задач радиоконтроля и радиомониторинга. Но данный пакет используется больше для комплексного анализа уже существующей, построенной сети, для её совершенствования, чем моделирования в рамках исследования.

Для компьютерного моделирования и инженерного анализа широко используются системы автоматизированного проектирования (САПР). Легкие системы САПР предназначены для 2D-проектирования и черчения, а также для создания отдельных трехмерных моделей без необходимости работы со сборочными единицами.

Существуют системы «тяжелого» моделирования, они предназначены для работы со сложными изделиями и для решения трудоемких задач, оптимизации, визуализации результатов, моделирования в реальном времени. Функционально могут выполнять все те же задачи, что предыдущие пакеты, но в них заложена совершенно другая архитектура и математическая составляющая.

Инженерами разработаны средства компьютерного инженерного моделирования, использующие метод конечных элементов (МКЭ), который весьма эффективен при моделировании распространения волн. МКЭ – численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики. Метод широко используется для решения задач механики деформируемого твёрдого тела, теплообмена, гидродинамики, электродинамики и топологической оптимизации.

Данный метод широко используется в программных продуктах компании ANSYS. Инструменты ANSYS позволяют решать всевозможные задачи из различных областей физики.

Как новичкам, так и опытным пользователям этот комплекс предлагает непрерывно растущий перечень расчетных средств, которые могут учесть разнообразные конструктивные нелинейности; дают возможность решить самый общий случай контактной задачи для поверхностей; допускают наличие больших (конечных) деформаций и углов поворота; позволяют выполнить интерактивную оптимизацию и анализ влияния электромагнитных полей, получить решение задач гидроаэродинамики и многое другое – вместе с параметрическим моделированием, адаптивным перестроением сетки, использованием р-элементов и обширными возможностями создания макрокоманд с помощью языка параметрического проектирования.

Работа с виртуальными моделями взамен дорогостоящих натуральных экспериментов имеет четкую экономическую обоснованность. HFSS – современное, высокопроизводительное программное обеспечение для моделирования электромагнитных полей, используемое для анализа

беспроводных устройств, печатных плат, элементов силовой электроники и прочих электронных устройств различного применения. HFSS является отличным инструментом для решения задач радиолокации, расчета объектов со сложной геометрией. Из всех пакетов, данный подходит для решения диссертационной задачи больше всего, так как специализируется на электродинамике.

Для демонстрации возможностей программного пакета проведено моделирование взаимных влияний на вертолете «Апач» (AH-64 Apache), предоставленном в эталонных моделях. На нем установлено девять антенн, использующих семь разных радиочастотных систем. Необходимо убедиться, что системы не создают радиочастотных помех друг другу. Для этого, рассчитан сценарий разнесения с использованием EMIT в ANSYS Electronics Desktop. Внешний вид модели вертолета в среде моделирования приведен в рисунке 4.

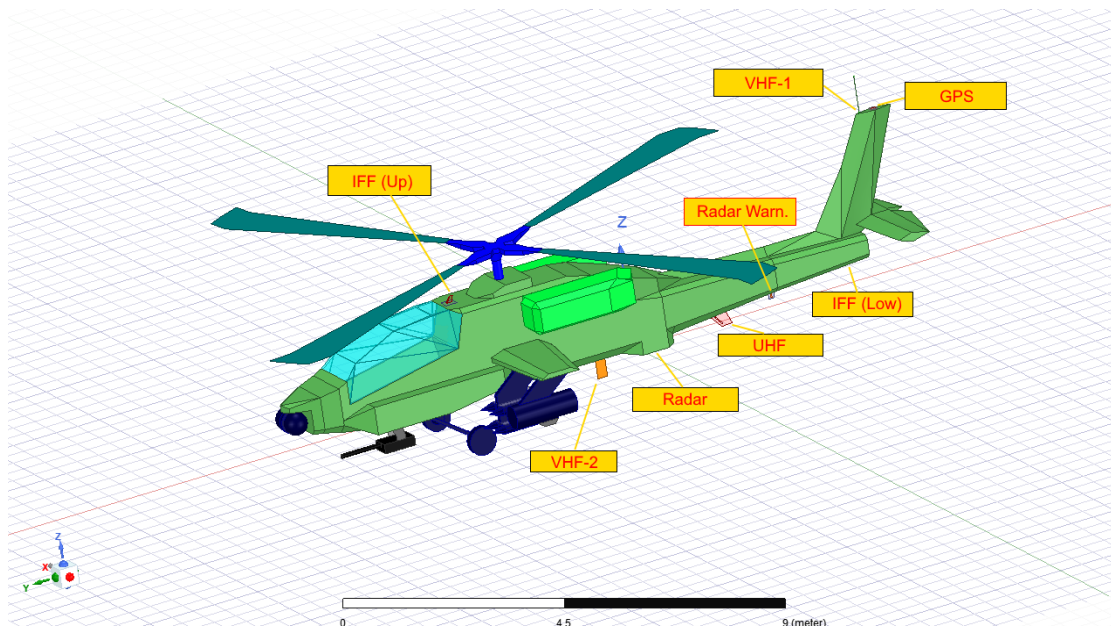


Рисунок 4 – Модель вертолета «Апаче» в программной среде

В программной среде существует специальный инструмент «Coupling Editor», позволяющий детально демонстрировать взаимные помехи между различными радиочастотными элементами системы. Если это необходимо, анализ производится автоматически. Выбрав соответствующую ячейку из матрицы излучателей, можно посмотреть график помех прямо в редакторе (рисунок 5).

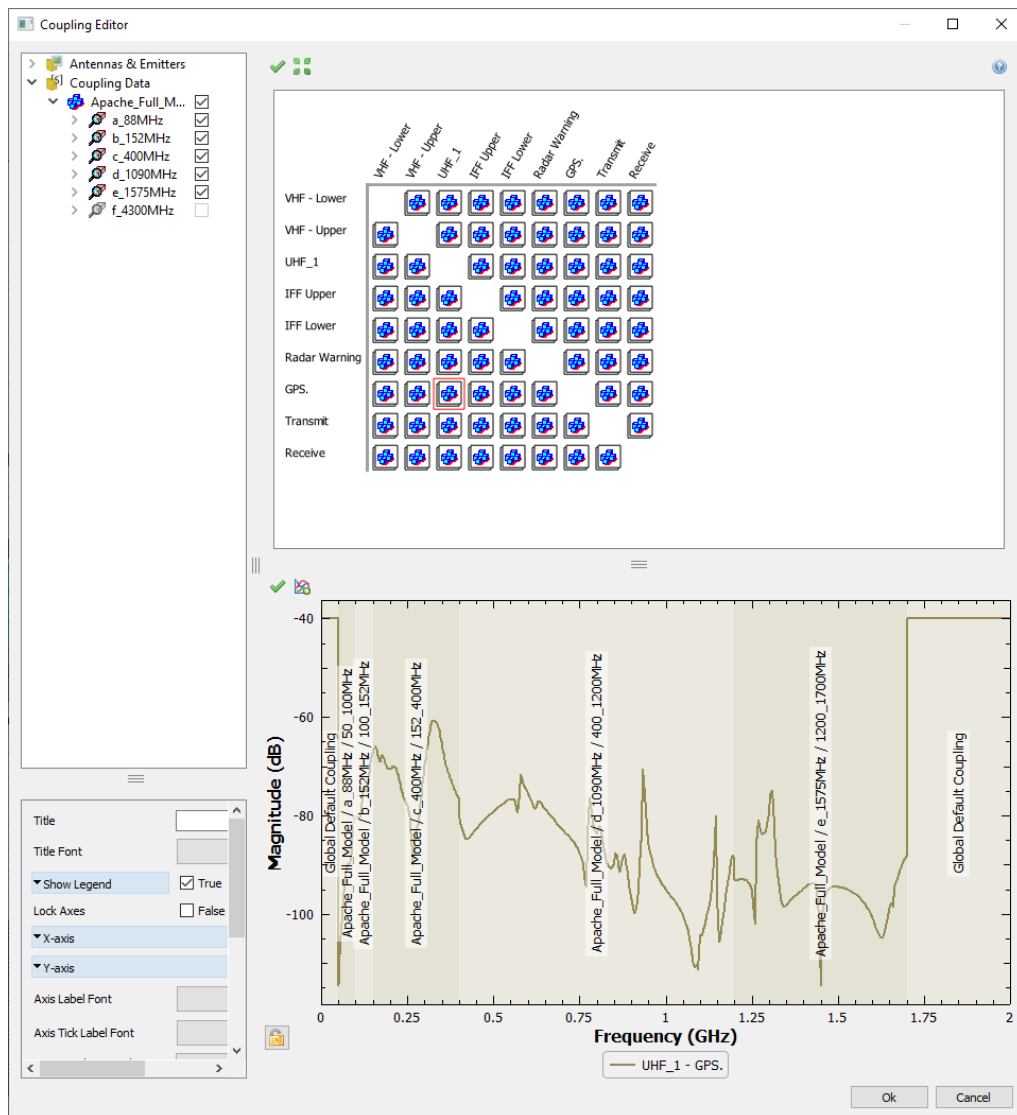


Рисунок 5 – Редактор межсистемных влияний

**В третьей главе (Моделирование и анализ беспроводных систем)** изложены результаты по исследованию электромагнитной совместимости в городской среде с использованием программного комплекса ANSYS. Разработано и проанализировано три сценария взаимодействия беспроводных систем.

Рассматривается сценарий многолучевого распространения, имитирующего заезд беспилотного транспорта к гаражу. На машине, в районе зеркала заднего вида, расположена антенна, излучающая электромагнитные волны на несущей частоте 4.7 ГГц (5G band n79). Антенна аналогичной частоты расположена в гараже. Все материалы приближены к реальным – корпус машины представлен в качестве проводника (металл), стены постройки из кирпича, плато, на котором находятся модели, выступает в качестве асфальта.

В данном сценарии представляет интерес влияние городских построек на распространение радиоволн и самого корпуса беспилотного транспорта.



Для упрощения модели, другие источники не рассматриваются. Расчеты будут проводиться в два этапа:

1) моделирование с учетом существующей гаражной двери, представленной в виде проводника, на пути у сигнала. Например, он может отвечать за её открытие;

2) моделирование без учета существующей гаражной двери.

В работе подробно проанализированы результаты расчетов модели. Например, приведена трассировка лучей для частоты 4.7 ГГц от источника в машине при закрытой двери (рисунок 6).

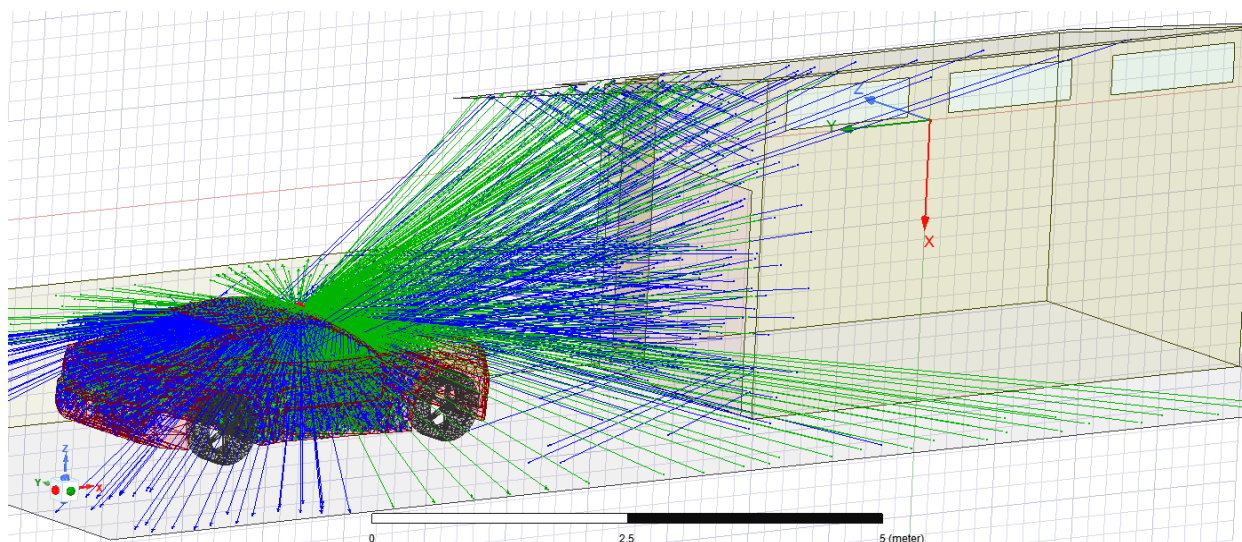


Рисунок 6 – Трассировка лучей для частоты 4,7 ГГц от источника в машине

Также рассматривается распространение электромагнитных волн между беспилотным транспортом и светофором – Vehicle-to-Infrastructure (второй сценарий). Такие условия уже близки к городским, так как имитируют остановку на перекрестке. Антенна на светофоре в зоне прямой видимости для антенны машины. Интерес представляет оптимизация и обоснование правильности/неправильности расположения излучателей в данном сценарии, обнаружение теневых зон.

Все антенны взяты из уже разобранный случая с гаражом (PIFA и диполь), как и модель беспилотного автомобиля, частота расчета – 4.7 ГГц, материал светофора является проводником, как и в случае с гаражной дверью. На рисунке 7 представлена интерпретация работы алгоритма SBR с отображением результатов моделирования в виде точек попадания лучей на поверхности.

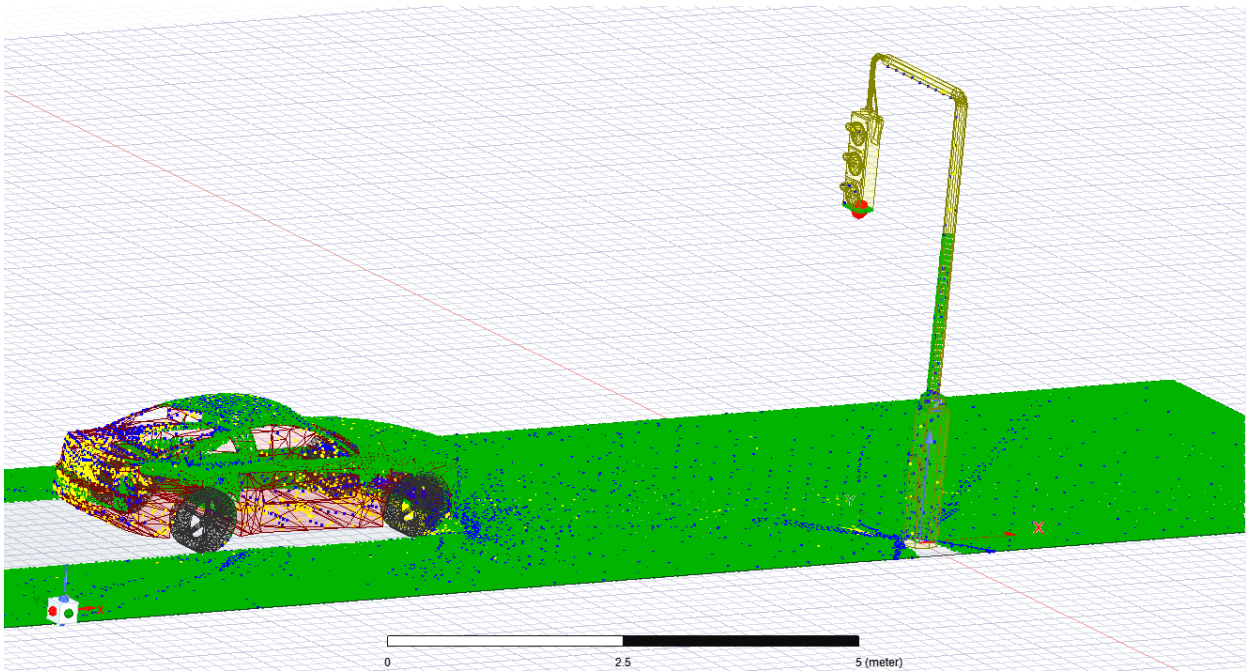


Рисунок 7 – Площадь попадания лучей от источника в светофоре

Интерес представляет заключительный сценарий электромагнитной совместимости в городской среде. В данном сценарии в качестве начальных условий задан город с высокоэтажной кирпично-бетонной застройкой, между двумя зданиями расположены модели машины и светофора, использованных в предыдущем разделе. Количество беспроводных антенных систем увеличено до пяти: GPS приемник, система мобильной связи 5G (базовая станция, беспилотный транспорт, система распознавания препятствий (приемник и передатчик)). Приводится матрица взаимных влияний антенных систем, аналогично анализу эталонной модели из второй главы (рисунок 8).

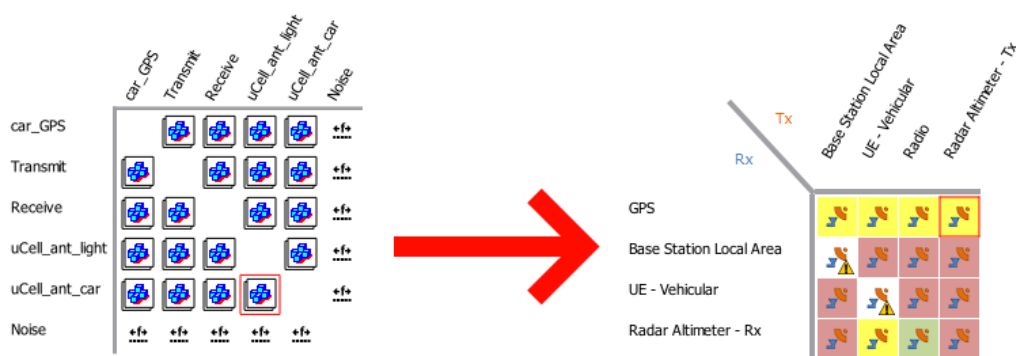


Рисунок 8 – Матрицы взаимных влияний в среде Ansys EMIT

Анализируя матрицу взаимных влияний, можно получить большое количество информации, которая полезна при возникновении различных ситуаций в реальности. Это позволит предсказать, на каких частотах между беспроводными системами будут конфликты, при какой настройке их работа

станет корректной, без искажений информации. Например, рассмотрен такой график для связи между антенной на светофоре (частота работы может быть любой в диапазоне от 4400 МГц до 5000 МГц), и антенной радара, отвечающего за измерение дальности до препятствий (4300 МГц). По оси «у» определяется уровень затухания в децибелах, по оси «х» частота в ГГц. График зависимости затухания от частоты при взаимодействии двух антенн разных беспроводных систем (рисунок 9).

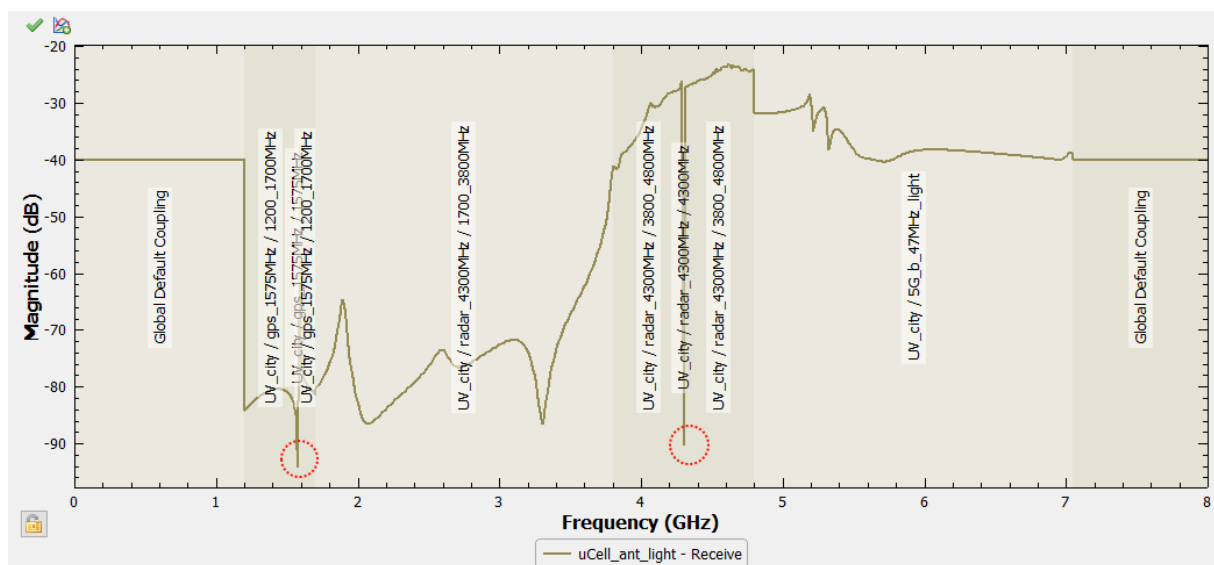


Рисунок 9 – Зависимость затухания от частоты при взаимодействии двух антенн разных беспроводных систем

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской диссертации была достигнута цель по исследованию электромагнитной совместимости беспроводных систем связи пятого поколения в городских условиях при плотной интеграции устройств. Разработка модели основана на строгих электромагнитных методах анализа интегрированных в ANSYS EMIT и HFSS в городской среде при плотной интеграции устройств. В качестве примера плотной интеграции устройств взят беспилотный автомобиль, для которого необходима безотказная и корректная работа множества датчиков и беспроводных систем.

Первостепенной задачей для достижения цели стал анализ предметной области и литературы по исследуемой тематике. Несмотря на наличие официальной стратегии развития в области беспилотного транспорта Российской Федерации и мобильных сетей 5G, исследований на тему электромагнитной совместимости достаточно мало, еще меньше исследований на данную тематику обнаруживается при рассмотрении взаимодействия беспроводных систем, датчиков беспилотного транспорта и мобильных сетей пятого поколения как единой структуры.

Вторая задача основана на исследовании особенности распространения радиоволн в городской среде. Изучена и приведена в работе

актуальная документация Радиосекции Международного Союза Электросвязи в области распространения электромагнитных волн в городских каньонах на частотах мобильных беспроводных систем.

Следующей задачей рассмотрены требования и критерии качества связи для беспилотных аппаратов. Описана архитектура интеллектуальной транспортной системы Vehicle-to-Everything (V2X), рассмотрены уровни автоматизации беспилотных автомобилей. Приведены ключевые показатели эффективности систем V2X и требования к качеству связи в различных сценариях использования (таблица 1.1).

В четвертой задаче описаны стеки беспроводных технологий для беспилотного транспорта. Выделены два основных типа связи с беспилотным транспортом – с помощью сетей стандарта 802.11p (DSRC), и мобильных сетей (C-V2X). Рассмотрены основные протоколы взаимодействия для разных уровней данных систем (рисунок 1.6, 1.7).

В ходе решения пятой задачи проведен сравнительный анализ программного обеспечения и его возможностей для моделирования беспроводных систем. Сравнивались известные программы для исследовательских и инженерных задач: MATLAB и семейство пакетов ANSYS. Отмечены достоинства и недостатки при работе с ними.

Третья глава данной магистерской диссертации описывает решение последней задачи, связанной с непосредственным проведением эксперимента, моделировании и анализа беспроводных систем при различных сценариях. Были рассмотрены типовые ситуации взаимодействия беспроводных систем в городской среде при плотной интеграции устройств.

В качестве результатов можно выделить моделирование многолучевого распространения электромагнитных волн при въезде беспилотного транспорта в гараж с помощью вычислительного метода трассировки лучей «Shooting and Bouncing Rays» в программной среде ANSYS EMIT. Проведено сравнение многолучевой картины в данном сценарии при частотах 4.7 ГГц (рисунок 3.11) и 2.4 ГГц (рисунок 3.12), значительных изменений при малом числе отражений не зафиксировано, в связи с тем, что начальные условия проведения эксперимента (материалы препятствий на пути лучей) не изменялись. Рассмотрен многолучевой характер распространения радиоволн от двух источников: PIFA антенны, расположенной на лобовом стекле автомобиля, и диполя, расположенного под потолком гаража. Чтобы оценить влияние препятствий на отражение радиоволн, из модели эксперимента была убрана гаражная дверь, сделанная из проводящего материала. Результаты расчетов при открытой двери для двух источников приведены на рисунках 3.14 и 3.15

Второй сценарий эксперимента моделировал распространение электромагнитных волн в ситуации Vehicle-to-Infrastructure, при взаимодействии антенн из предыдущего эксперимента, но гараж заменен светофором на перекрестке. В этом случае, результат отражения радиоволн от поверхности представлен в виде точек на поверхностях, что позволяет

прогнозировать теневые зоны и корректировать расположение антенн, руководствуясь полученными данными (рисунки 3.19 и 3.20).

Заключительный сценарий эксперимента анализирует электромагнитную совместимость сразу нескольких различных беспроводных систем, 5G в том числе, в городе с многоэтажной застройкой. Использован программный продукт ANSYS EMIT. По итогам расчетов, на рисунке 3.27 построен график зависимости затухания сигнала на разных частотах для мобильной станции 5G расположенной на светофоре и взаимодействующей сразу с несколькими беспроводными системами беспилотного автомобиля. После выявления причин возникновения помех, возможно оценить меры по их устранению еще на самом раннем этапе построения систем. В конечном счете, анализ и устранение проблем, связанных с электромагнитной совместимостью, приведет к сокращению времени проектирования и уменьшению дальнейших финансовых затрат.

Ценность проработанных сценариев и моделей заключается в том, что они могут выступать в качестве базовых, то есть, являются легко масштабируемыми и применимыми к большому количеству различных ситуаций. Поставленные задачи выполнены, и требуемая цель достигнута.

Практическая значимость заключается в возможности использования созданных математических и программных моделей при проектировании и построении современных мобильных сетей связи пятого поколения, а также в образовательных целях, для подготовки научных кадров в области связи.

#### **Основные теоретические и практические результаты работы.**

1) Рассмотрены и выявлены проблемы электромагнитной совместимости беспроводных систем связи пятого поколения в городской среде при плотной интеграции устройств;

2) Проведен анализ предметной области, особенностей распространения радиоволн в городской среде, стеков беспроводных технологий для беспилотного транспорта;

3) Исследованы сценарии электромагнитной совместимости беспроводных систем связи в городской среде, полученные модели являются масштабируемыми и могут быть применены к большому количеству различных сценариев.

#### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1 Брагин К.И. Проблематика сотового принципа покрытия в современной мобильной связи / Брагин К.И. // Актуальные исследования №4(7) – Белгород, 2020.

2 Брагин К.И., Тагатов А.А., Сабуров Д.М. Перспективы развития мобильной связи. Применение нейронных сетей в сетях 5G / Брагин К.И., Тагатов А.А., Сабуров Д.М. // VI Всероссийская научно-техническая конференция: Цифровая экономика. Новое время – новые технологии. Росинфоком – Самара, 2020.

3 Тарасов В.С., Брагин К.И., Будылдина Н.В. Роль программно-конфигурируемых сетей в развитии мобильной связи / Тарасов В.С., Брагин К.И., Будылдина Н.В. // I Международная научно-практическая конференция: Инфокоммуникационные технологии: актуальные вопросы цифровой экономики – Екатеринбург, 2021.