

На правах рукописи

Зарипова Альбина Рануровна

Электромагнитная совместимость радиосистем мобильных устройств

Направление подготовки

11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
направленность – Многоканальные телекоммуникационные системы
программа академической магистратуры

АВТОРЕФЕРАТ

магистерской диссертации
на соискание квалификации (степени) магистра

Екатеринбург 2020

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, к.т.н.

Д.В. Денисов

Рецензент, к.т.н.

Д.В. Кусайкин

Защита состоится «30» июня 2020 г. в 9:00 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.

Стремительное развитие технологий меняет жизнь человека и в целом всего общества, создавая при этом как огромные возможности, так и колоссальные трудности. Новые технологии создают экспоненциальный рост количества, качества и многообразия связи. Концентрация телекоммуникационного оборудования и пользовательских устройств также растет, что создает потребность в анализе их совместной работы, а именно анализе электромагнитной совместимости радиосистем.

В последнее время наблюдается тенденция нового применения уже давно известных технологий. Большую популярность получила технология Bluetooth, теперь у почти у каждого жителя есть беспроводные наушники или фитнес-браслет, важно обеспечить их совместную работу, особое внимание стоит уделить воспроизведению речи, так как это вид передаваемой информации наиболее требователен к качеству. Вместе с тем следует подчеркнуть, что все эти технологии должны работать совместно в очень небольшом корпусе, что делает анализ электромагнитной совместимости еще сложнее. Отдельно стоит отметить сотовую связь, где происходит повторное использование частот из-за ограниченности ресурсов. Возникает проблема совмещения двух стандартов в общем диапазоне частот, необходимо обеспечить электромагнитную совместимость радиосистем и высокую скорость, которая заявлена в стандарте. Поэтому так важно оценить влияние всех систем и спрогнозировать источники помех на этапе проектирования.

Таким образом, актуальность темы магистерской диссертации определяется развитием технологий и востребованностью в телекоммуникационном оборудовании, совместная работа технологий потребует наличие электросовместимости радиосистем. Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации» только подтверждает, что отрасль инфокоммуникаций будет в дальнейшем развиваться, а конвергенция технологий только приумножит внимание к проблеме электромагнитной совместимости.

Объект исследования – радиосистемы мобильных устройств.

Предмет исследования – электромагнитная совместимость радиосистем мобильных устройств.

Цель работы – Исследование электромагнитной совместимости радиосистем мобильных устройств с помощью программного пакета ANSYS EMIT

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) анализ публикаций по теме исследования;
- 2) изучение технологий в современном мобильном устройстве;
- 3) исследование радиосистем и структуры мобильного устройства;
- 4) моделирование совместной работы радиосистем мобильных устройств.

Научная новизна работы заключается в оценке взаимного влияния радиосистем различных технологий и способах обеспечения электромагнитной совместимости, при их совместной работе в современном мобильном устройстве.

Практическая значимость заключается в возможности определения источника электромагнитных помех и прогнозирование потенциальных влияний на радиосистемы, при проектировании радиосистем мобильных устройств.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач моделирования, расчета и оценки электромагнитной совместимости радиосистем мобильных устройств, использовался программный пакет ANSYS EMIT. С помощью которого будут оценены взаимные влияния при совместной работе несколько радиосистем и определение источника электромагнитных помех.

Положения, выносимые на защиту:

- EMIT позволяет производить диагностику и предсказать причины возникновения RFI и других нежелательных эффектов;

- с помощью диаграммы взаимодействий можно увидеть прохождение сигнала, которой вносит наибольшие помехи в системе, а также увидеть помехи для отдельно выбранной пары передатчика и приемника. В данном примере приемник GPS больше всех испытывает помехи, причина их видна на диаграмме взаимодействий;

- оценить причины возникновения интермодуляции и найти их источник, позволяет результирующий график. Положительный уровень помех внутриполосного шума указывает на помехи на приеме, из-за совместной работы нескольких передатчиков возникли продукты интермодуляции, а именно возникла частота близкая к несущей частоте L1 для приемника GPS;

- был создан проект города с базовыми элементами для расчета, чтобы оценить запаса мощности в условиях городской застройки. В окне Link Analysis наглядно виден путь прохождения сигнала, отображены такие показатели, как SNR, SINR, Rx SNR. Чем выше значение SNR, тем менее зашумлён эфир и качественней канал связи. В точке Coupling запас мощности уменьшается на ~3 dB из-за введенного источника шума.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием, при моделировании и исследовании, расчета и оценки результатов использовалось ведущее в отрасли программное обеспечение EMIT, которое позволяет моделировать радиочастотные помехи в сложных средах. Проект был создан с учетом всех теоретических и технических требований, изученные в процессе написания теоретической части диссертации. Результаты исследования были получены с учетом различных условий и согласно техническим требованиям.

Апробация результатов.

1) Анализаторы Wi-Fi-покрытия// Материалы XX научно-практической конференции студентов УрТИСИ СибГУТИ – Екатеринбург: Изд-во УрТИСИ СибГУТИ, 2018 г.;

2) Исследование электромагнитной совместимости радиосистем// Материалы научно-практической конференции студентов УрТИСИ СибГУТИ – Екатеринбург: Изд-во УрТИСИ СибГУТИ, 2019;

3) Международный журнал «Цифровая наука», «Исследование электромагнитной совместимости радиосистем», г. Саратов 2020;

4) Анализ электромагнитной совместимости в ANSYS EMIT// ADVANCES IN SCIENCE AND TECHNOLOGY Сборник статей XXII международной научно-практической конференции. Научно-издательский центр «Актуальность.РФ». 2019. С. 85-86 (РИНЦ).

По теме диссертации опубликовано 4 научные работы, в том числе 2 статьи в научных журналах РИНЦ, 2 статьи в сборниках и периодических изданиях УрТИСИ СибГУТИ. По теме диссертации опубликовано 4 отчета о НИР.

Диссертационная работа включает введение, пять глав, заключение, список литературы из 32 наименований. Объем диссертации 92 страница, включены также 55 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы магистерской диссертации, определены объект и предмет исследования, приведены цель и задачи работы, описаны научная новизна и практическая значимость.

В первой главе «Анализ публикаций» проведен анализ публикаций по теме исследования, который позволил определить степень проработанности вопроса электромагнитной совместимости радиосистем мобильных устройств. Изученные материалы отражают популярные направления развития исследований в данной области.

В существующих публикациях по данной теме информации мало или она не раскрыта полностью. Исследования рассматривают частные случаи, технологии и системы, что позволяет изучить опубликованные и сформировать общее представление о направлении и тенденциях в анализируемой области.

Несмотря на обширный список возможных электромагнитных помех, влияющих на смартфон, в изученных публикациях, не рассмотрены вопросы электромагнитной совместимости радиосистем мобильных устройств. Поэтому, целью данной работы является исследование электромагнитной совместимости радиосистем мобильных устройств.

Во второй главе «Проблемы электромагнитной совместимости в системах связи» проведен анализ факторов, оказывающих влияние на электромагнитную совместимость. Изучена нормативная документация, регулирующая проблемы электромагнитной совместимости. Рассмотрены стандарты и технологии в радиосистемах мобильных устройств, их последние спецификации и влияние друг на друга.

На сегодняшний день стала очень актуальна проблема электромагнитной совместимости, это произошло из-за стремительного развития беспроводных технологий. Современные системы связи, использующие одни и те же диапазоны радиоволн, делают эту проблему чрезвычайно важной. Под электромагнитной совместимостью понимается возможность одновременного функционирования нескольким РЭС (Радиоэлектронных систем) в реальных условиях эксплуатации

с требуемым качеством связи. При воздействии не создавать непреднамеренных и недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам.

Системы связи в основном работают на небольших расстояниях и на вещают на одинаковых или близких частотах. В современных системах связи происходит укорочение длины рабочей волны, что приводит к возможности увеличения числа систем связи близко расположенных друг другу, что делает проблему электромагнитной совместимости более актуальной. Электромагнитная обстановка формируется всеми видами существующих в заданной ситуации электромагнитных помех, создаваемых как внешними, так и внутренними источниками. Источники электромагнитных помех весьма разнообразны и имеют различные характеристики: интенсивность, направленность, временной и частотный диапазоны и так далее. Классификация помех по причинам их возникновения является одним из основных и наиболее полезных видов анализа помех.

Необходимость нормативной документации для обеспечения электромагнитной совместимости возникла по причине того, что большинство средств связи и электронное оборудование обладают свойствами электромагнитной эмиссии и электромагнитной восприимчивости. Стандартизации и нормирование характеристик ЭМС РЭС позволяет устранить их или хотя бы значительно ослаблена с помощью аппаратуры, удовлетворяющей указанным нормам и стандартам.

Нормативно-техническая документация в области ЭМС должна удовлетворять всем требованиям показателей аппаратуры с учетом перспектив ее использования. Существует ряд международных соглашений в области ЭМС, обязательных для всех стран, а также положений, имеющих характер рекомендаций. В России государственную политику в области радиосвязи в Российской Федерации определяет Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. Министерство обеспечивает работу трех межведомственных государственных комиссий: по радиочастотам (ГКРЧ), электросвязи и информатизации.

Радиосвязь является одной и важнейших видов связи в современном мире, популярность беспроводных технологий с каждым годом набирает обороты. Это объясняется удобством их использования, дешевизной и приемлемой пропускной способностью. Исходя из текущей динамики развития, можно сделать вывод о том, что по количеству и распространенности беспроводные сети в скором времени превзойдут проводные сети. Рассмотрим основные беспроводные технологии, используемые в современных мобильных устройствах и их ЭМС с другими технологиями:

1) GPS (Global Positioning System) – это спутниковая навигационная система, используемая для определения наземного положения объекта. Устройство может потерять спутник, когда нарушена электромагнитная совместимость, например, помехи средства низкоорбитальных систем подвижной спутниковой связи (ПСС), занимающие полосу выше 1610 МГц. Другим типом помех являются мешающие сигналы на частотах, кратных гармоникам несущей частоты. Они могут быть достаточно сильными, особенно

если постановщик помех находится в непосредственной близости от приемника. Источниками помех могут быть вторые гармоники сигналов запроса. Имеется также некоторое количество любительских радиорелейных станций;

2) Wi-Fi – это технология беспроводных сетей, построенных с использованием стандарта IEEE 802.11. Рассмотрим технологию Wi-Fi с точки зрения электромагнитной совместимости и влияния на другие технологии. Совместная работа двух и более радиосистем может обеспечивать загруженность эфира, если высокая мощность у антенн. В таком случае на работу системы может сказываться влияние внутриканальных и межканальных помех. Наличие таких помех увеличивают уровень шума, что приводит к низкой стабильности связи из-за постоянной переотправке пакетов. Wi-Fi может оказывать негативное влияние на работу Bluetooth, если работает на частоте 2.4 ГГц;

3) Мобильная связь, которая насчитывает самое большое число абонентов. Сотовой связью пользуются не только пользователи, имеющие смартфон, но и другие устройства. На сегодняшний день существует пять поколений сотовой связи. Однако, совместная работа двух стандартов может привести ухудшению качества связи и потери емкости. Например, сеть LTE влияет на сеть GSM в диапазоне частот 1800 МГц. Совпадение частот ведет к потерям пропускной способности сети LTE, примерно на 5%, а потери емкости кластера сети GSM не превысят 20%, в результате чего итоговая его емкость составит не менее 80% от первоначальной.

Таким образом в современном мобильном устройстве должно поддерживать несколько антенн в одном корпусе для нескольких технологий и обеспечивать их совместную работу. Для этого необходимо хорошо понимать структуру мобильного телефона и используемые антенны.

В третьей главе «Антенны радиосистем мобильных устройств» изучена структура мобильного устройства, назначение его элементов. Рассмотрены виды антенн, используемые в мобильном устройстве. Произведен выбор программного пакета, для анализа ЭМС радиосистем мобильных устройств.

В настоящее время мобильный телефон стал неотъемлемой частью жизни, о имеется почти у каждого жителя земли. Современный смартфон является многофункциональным устройством, так как потребности пользователей растут. Тенденция в мобильных устройствах заключается в том, чтобы устройство могло предоставить больше памяти, быстрый процессор, дополнительные возможности подключения с доступом к Wi-Fi, GPS, 3G и 4G по всему миру, и все это с большим временем автономной работы.

Сейчас существует множество различных моделей смартфонов, разных конструкций, с разными характеристиками, но основные компоненты не меняются. На рисунке 1 представлена модель из чего состоит смартфон.



Рисунок 1 – Структура мобильного телефона

Чтобы обеспечивать связь с внешним миром телефону необходима антенна. Рабочая полоса частот мобильного телефона становится шире и пространство для антенны смартфона ограничено. Также в каждом мобильном телефоне находятся не только антенны для сотовой связи, Wi-Fi, GPS, но и дополнительно антенны для совместимости с более старыми стандартами связи.

Изначально антенны были штыревые, такие антенны имеют одинаковое усиление во всех азимутальных направлениях. Это значит, что электромагнитные волны распространяются изотропно в H -плоскости, поэтому сигнал распространяется одинаково во всех направлениях и хорошо ловит сигнал от вышек сотовой связи независимо от местоположения пользователя. Несмотря на высокую эффективность, от них пришлось отказаться. Внешние антенны негативно влияли на здоровье пользователей, имели хрупкость и не позволяли производить развязку между антенными системами. На замену им пришли внутренние антенны. В последние годы печатная антенна широко применяется в беспроводных устройствах. Уникальные свойства печатных антенн, такие как механическая совместимость, долговечность, компактность и дешевые производственные затраты делают их подходящими для широкого применения в разных областях. Поскольку антенну мобильного телефона, ввиду ее малых размеров по сравнению с длиной волны, трудно сделать широкополосной, в телефоне часто используется несколько антенн, настроенных на различные частоты. Оптимальное размещение антенн в смартфоне играет большую роль в производительности системы. На расположение антенны влияют размеры смартфона, изменение размещения антенны на несколько миллиметров может существенно изменить в лучшую или худшую сторону работу системы.

Анализ ЭМС радиосистем мобильных устройств представляет собой сложные расчеты, поэтому были разработаны ряд программных пакетов, которые не только помогут сделать расчеты, но и смоделировать ситуации, в которых будет нарушено ЭМС.

Таким образом, необходимо обеспечить ЭМС для нескольких радиочастотных систем расположенных в одном корпусе. Чувствительность

приемников значительно снижается из-за тенденции близкого расположения антенн, кажущиеся незначительными излучения или восприимчивость передатчиков и приемников могут привести к помехам. Кроме того, уровни мощности передатчика, схемы модуляции, гармоники и нелинейное поведение приводят к росту спектра как внутри, так и вне полосы, что может привести к перегрузке приемников. Также приемники обладают внутриполосной и внеполосной восприимчивостью. Первые из них могут являться причиной ухудшением достоверности приема, а вторые ухудшают электромагнитную обстановку. Для исследования электромагнитной совместимости радиосистем мобильных устройств, а в частности влияние друг на друга нескольких технологий в одном корпусе, подойдет EMIT. Он подойдет для этих целей лучше, чем другие программные пакеты, по причине того, что в ней есть матрица сценария.

В четвертой главе «Программное обеспечение для моделирования радиочастотных помех ANSYS EMIT» изучен программный пакет ANSYS EMIT, базовые функции и возможности. Отдельно рассмотрена функция матрица сценариев, ее возможности и польза при диагностировании электромагнитной совместимости радиосистем мобильных устройств.

ANSYS EMIT – это инструмент моделирования для прогнозирования космических и радиочастотных помех (RFI). Интерфейс EMIT используется для определения новых проектов, запуска моделирования и отображения данных и результатов проекта. Интерфейс EMIT имеет несколько окон, которые используются на разных этапах процесса моделирования, и обычно не все отображаются одновременно. Окна могут быть сконфигурированы в основном интерфейсе так, чтобы они оставались в фиксированном положении («закреплено») или были «плавающими» в области интерфейса с несколькими документами (MDI). Большая возможность настройки конфигурации окна в EMIT возможна в соответствии с индивидуальными предпочтениями пользователя. В EMIT доступно несколько различных окон для отображения различных аспектов проекта и результатов моделирования.

Матрица сценариев EMIT обеспечивает компактный способ просмотра и управления сценариями в проекте EMIT. Матрица сценариев представляет полную картину в матричном формате со всеми Tx RF системами, перечисленными по горизонтали, и всеми Rx RF системами, перечисленными по вертикали. Крайние правые столбцы представляют N-to-1 ситуации, в которых учитываются помехи для Rx из-за одновременной работы нескольких Tx. Записи, выделенные серым цветом в матрице сценариев, представляют взаимодействия Tx / Rx, которые были отключены и не включены в моделирование EMIT.

В пятой главе «Исследование электромагнитной совместимости с помощью программного пакета Ansys EMIT» в программном пакете Ansys EMIT был сформирован проект для оценки электромагнитной совместимости радиосистем мобильных устройств. Проанализированы полученные результаты и предложен метод борьбы с негативными влияниями.

При разработке электронных устройств, которые включают в себя встроенные беспроводные технологии и часто содержат несколько систем

радиосвязи для связи, передачи данных и навигации, необходимо обеспечить правильную работу всех этих беспроводных функций в непосредственной близости друг от друга, которые могут быть источниками радиочастотных помех для беспроводной сети, приводящие к помехам в приемнике или Desense. Desense – это показатель помех, который EMIT может вычислять и отображать. Значение desense указывает, насколько общая мощность внутриполостных помех (узкополосный плюс широкополосный компоненты) превышает чувствительность Rx.

В этом примере расчеты выполняются с помощью программного пакета ANSYS EMIT для моделирования взаимодействия электромагнитной связи и радиочастотной системы. В ANSYS EMIT был создан проект, который включает в себя четыре антенны. Антенна GPS для глобального позиционирования, которая работает только на прием. Wi-Fi и Bluetooth антенны, имеющие приемник и передатчик. На рисунке 2 представлена диаграмма взаимодействия.

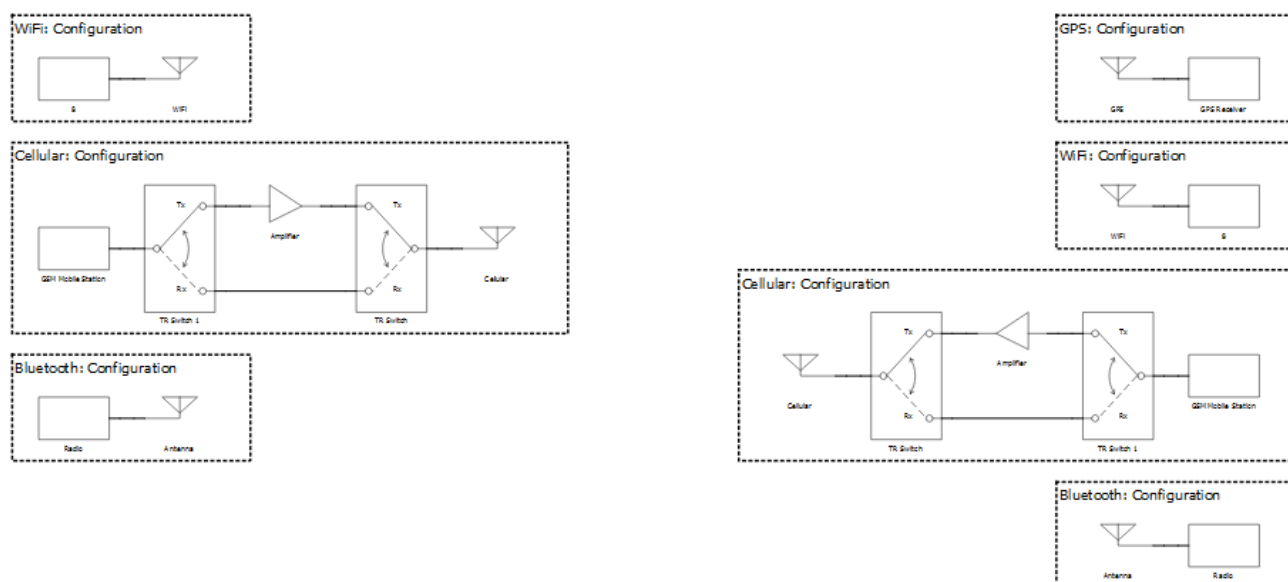


Рисунок 2 – Диаграмма взаимодействия антенн без расчета

В данном примере, при создании радиосистем учитывалось такое свойство, как пассивный шум (Enable Passive Noise), а свойство усилить уровень теплового шума (Enforce Thermal Noise Floor) отключен. Последний контролирует, допустимо ли падение уровня широкополосного шума ниже минимального уровня теплового шума для текущего проекта.

После запуска расчетов, механизм EMIT выполняет анализ потока мощности для широкополосных спектров сигналов, исходящих от Tx и проходящих, иногда очень сложными маршрутами, к каждому подверженному воздействию Rx. Каждый Rx EMIT сравнивает спектр принимаемого сигнала с чувствительностью Rx для вычисления нескольких показателей помех EMI Margins, Sensitivity, Desense или Availability, для количественной оценки помех на Rx. Каждый раз, когда спектр сигнала встречается с негативным эффектом, он изменяется широкополосными характеристиками компонента, включая потенциальные

нелинейные эффекты. Каждый спектр сигнала в ЕМІТ содержит как узкополосные, так и широкополосные элементы. Для прогнозирования взаимных влияний от созданных радиосистем ЕМІТ рассчитывает запас ЕМІ, который является метрикой и сравнивает уровень мощности принимаемых помех с чувствительность приемника. ЕМІТ рассчитает три различных поля ЕМІ, чтобы определить причину любых помех: Точка ЕМІ Margin, Peak I n-Band ЕМІ Margin, и Noise I n-Band ЕМІ Margin.

Из-за нелинейности таких устройств, как усилитель мощности, могут возникать нежелательные продукты интермодуляции, которые могут вызывать помехи, даже если отдельные сигналы этого не делают. В широком смысле интермодуляция – это взаимодействие между двумя или более частотами, проходящими через активную или пассивную нелинейную электрическую цепь или через любой компонент, который генерирует нежелательные частоты. В матрицу сценариев добавим сценарий N-on-1, где будет оцениваться влияние двух передатчиков на один приемник. Таким образом, всего получится 2,349,881 комбинаций каналов.

Рассмотрим более подробно результаты расчетов. Приемник GPS имеет хорошую электросовместимость с другими технологиями и даже имеет запас в -4,9. Но при работе нескольких передатчиков и приемника GPS возникают помехи, на диаграмме взаимодействий видно, что происходит смещение частот передатчика для сотовой связи и Wi-Fi, из-за чего возникает частота близкая к несущей для приемника GPS. На рисунке 4 отображен путь сигнала, при котором возникает помеха

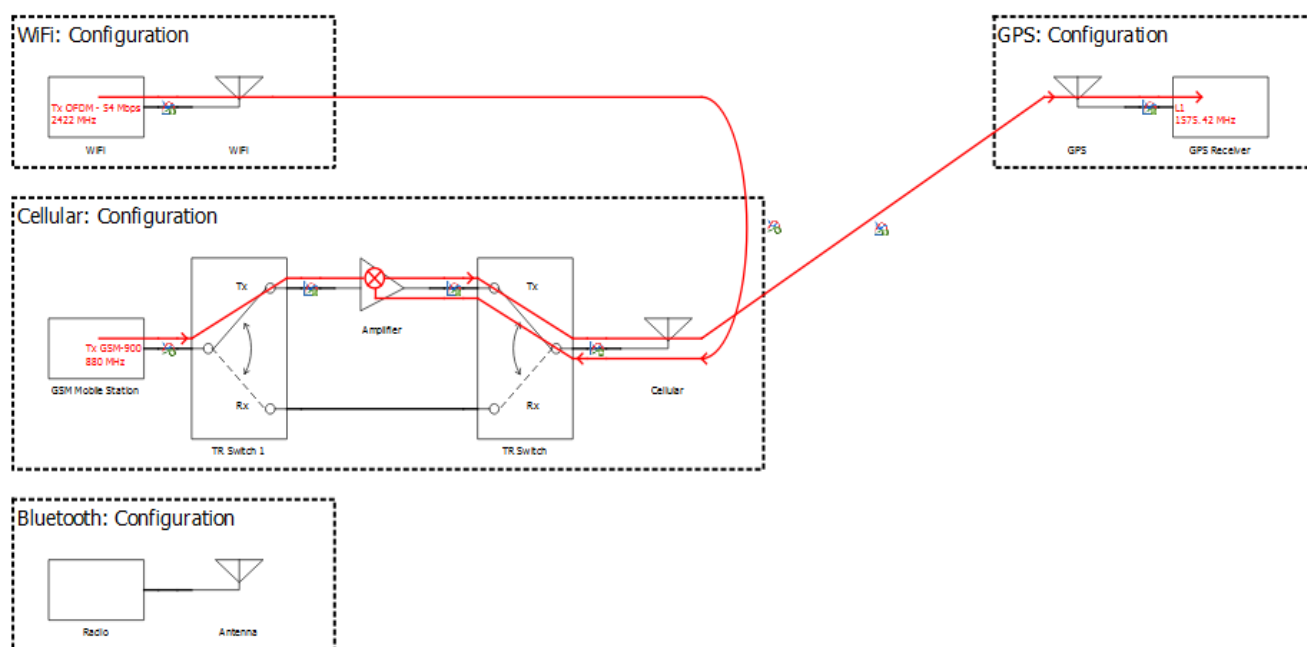


Рисунок 4 – Диаграмма взаимодействий для приемника GPS

Более детально можно посмотреть на итоговом графике. Положительный уровень помех внутриполосного шума указывает на помехи на приеме. Это происходит, когда общая мощность из-за широкополосного шум в канале Rx

превышает восприимчивость Rx. В легенде к графику указывается негативное влияние в размере 10.5 dB, из-за совместной работы нескольких передатчиков возникли продукты интермодуляции, а именно $f_1 - f_2$, возникла частота близкая к несущей частоте L1 для приемника GPS. На рисунке 5 представлен результирующий график.

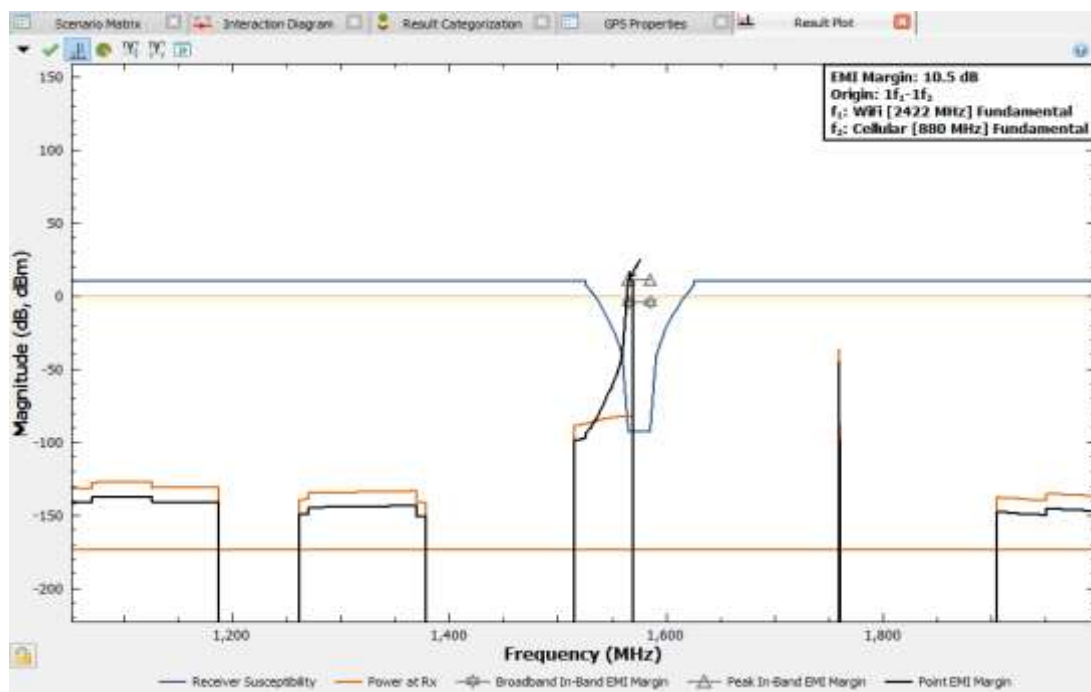


Рисунок 5 – Результирующий график для оценки интермодуляции

Один из способов для устранения данного вида помехи это поставить фильтр. В данном примере продукты интермодуляции 2 порядка возникают из-за усилителя в конфигурации антенны для сотовой связи. Было решено поставить режекторный фильтр после усилителя. После пересчета проекта, приемник GPS не испытывает помех и имеет некий запас EMI.

Сотовая связь постепенно проникает в различные сферы нашей жизни, поэтому так важно обеспечить качественный канал связи. Для обеспечения канала с должным качеством, необходимо соблюдение ЭМС. Исходя из этих потребностей, была смоделирована следующая ситуация. Распространение сигнала от базовой станции и сотового телефона в условиях городской застройки, представлено. На рисунке 6 представлен проект города.

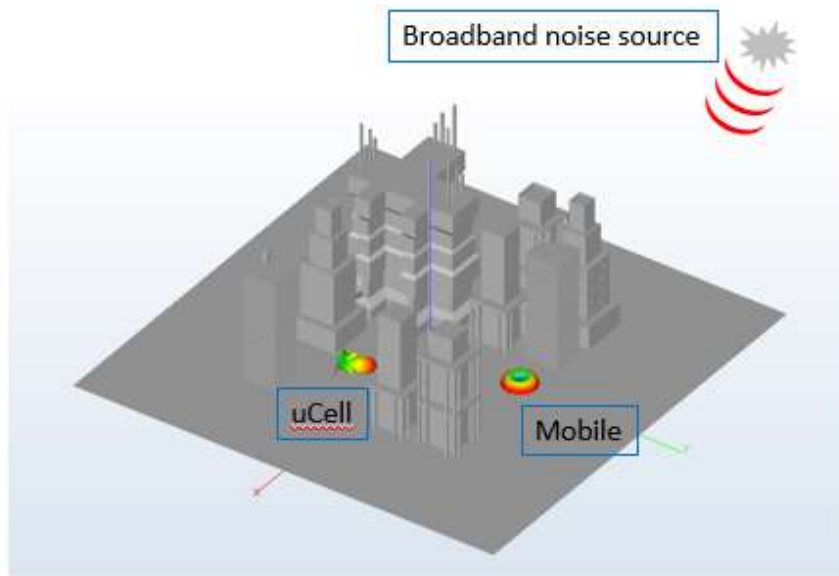


Рисунок 6 – Проект города для расчета

Всего было проанализировано 385 комбинаций каналов. В окне Scenario Details, можно выбрать канал 28,2 ГГц в диапазоне Band of uCell_RF для передатчика и канал 28,2 ГГц в полосе Mobile_RF для приемника, таблица автоматический просчитается для выбранных каналов. В данном диапазоне частот больше всего возникает помех. И в окне Link Analysis получить усиление антенны в направлении, в котором передатчик и приемник направлены друг на друга. На рисунке 7 наглядно видно путь прохождения сигнала, отображены такие показатели, как SNR, SINR, Rx SNR. Чем выше значение SNR, тем менее зашумлен эфир и качественней канал связи. В точке Coupling запас мощности уменьшается на ~3 dB из-за введенного источника шума.

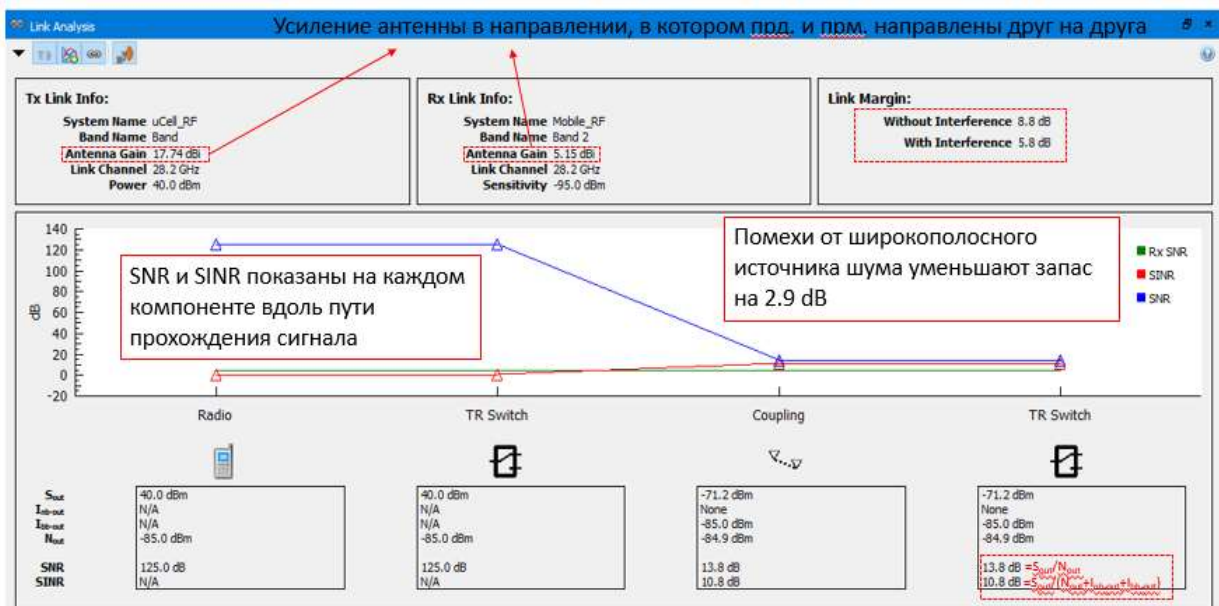


Рисунок 7 – Окно Link Analysis

В результате был смоделирован проект приближенная к реальной ситуации в жизни. В условиях городской застройки было создана АМС с направленной антенной сотового оператора, мобильный телефон и передатчик, который вносит помехи. Проанализировано изменение уровня сигнала с учетом городской застройки и вносимых внешних помех.

Произведена локальная оценка электромагнитной совместимости РЭС группировки. В данном случае были применены статистическая оценка, т.к. она подходит для оценки РЭС на большие расстояния, а также для совокупности РЭС со сложными процессами взаимодействия и чаще всего используется для мобильной связи. В первом примере использовалась объективная оценка группировки РЭС, которая используется в случае расположения РЭС на одном объекте, например, смартфон.

В ходе моделирования было использовано два метода оценки электромагнитной совместимости и предложены следующие меры по обеспечению электромагнитной совместимости:

- пространственно-временная развязка – разводка РЭС по пространству за счёт диаграмм направленности. По времени за счёт временного распределения работы;

- оптимальное использование частотного спектра – частотный разнос между отдельными РЭС;

- совершенствование приемно-передающей аппаратуры – обеспечение фильтрации полезных сигналов и подавление внеполосных излучений, как было предложено в примере с исследованием радиосистем смартфона;

- минимизация помех по сетям питания путём реализации заземляющих устройств и экранировки от промышленных помех;

- совершенствование вибро-защиты аппаратуры;

- боковые лепестки любой антенны влияют на ЭМС. Антенна излучает или принимает из боковых лепестков. Чем больше длин волн и уже диаграмма направленности, тем больше боковых лепестков. Боковые лепестки отражаются от земли и создают помеху. Уменьшение боковых лепестков можно за счет расширения диаграммы. При близком расположении РЭС высокие требования к задним боковым лепесткам. Требование к заднему лепестку -30 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках магистерской диссертации была исследована проблема электромагнитная совместимость радиосистем мобильных устройств, дана оценка взаимным влияниям радиосистем в современном смартфоне.

Целью диссертации являлось исследование электромагнитной совместимости радиосистем мобильных устройств с помощью программного пакета Ansys EMIT.

В ходе диссертационного исследования были выполнены поставленные задачи. Проведенный анализ публикаций по теме исследования позволил определить степень проработанности проблемы электромагнитной

совместимости радиосистем мобильных устройств. Рассмотрены популярные направления в области электромагнитной совместимости мобильных устройств. Был сделан вывод, что недостаточное внимание уделяется проблеме электромагнитной совместимости радиосистем, из чего было решено далее исследовать эту тему.

Рассмотрены проблемы электромагнитной совместимости в системах связи, произведен анализ факторов, оказывающих влияние на ЭМС. Анализ позволил сделать вывод, что влияния носят комплексный характер. В нашей стране электромагнитные воздействия нормируются Министерством цифрового развития и другими подчиненными органами. Рассмотрены стандарты и технологии, которые используются в современных смартфонах, их влияние друг на друга при совместной работе. Учитывая современные тенденции исследования, была рассмотрена структура мобильного устройства. Антенна мобильного телефона, является терминальным оборудованием для передачи и приема электромагнитных волн. Рассмотрены основные виды антенны, их достоинства и недостатки.

Проблема электромагнитной совместимости важна и сложна в расчетах и требует современного подхода к решению. Для обеспечения качественной работы изделия, на этапе разработки необходимо учитывать ЭМС и внешние воздействия в виде электромагнитных помех. Рассмотрены основные программные пакеты для исследования электромагнитных волн, проанализированы их достоинства и недостатки. EMIT – это ведущее в отрасли программное обеспечение для моделирования радиочастотных помех (RFI) в сложных средах.

В программном пакете Ansys EMIT был создан проект для оценки электромагнитной совместимости радиосистем мобильных устройств. Использовалась объективная оценка группировки РЭС, которая используется в случае расположения РЭС на одном объекте. Был сделан вывод, что радиосистемы оказывают друг на друга влияние. Практическим путем было выявлено, что влиянию подвержены не только радиосистемы, которые используют одни частоты. По результатам диагностики были выявлены передатчики и приемники, которые испытывают помехи при совместной работе. Был создан отдельный сценарий для анализа влияние нескольких передатчиков на один приемник. В качестве примера был выбран приемник GPS, который был подвержен влиянию передатчиков от сотовой связи Wi-Fi. После детального анализа были предложены меры устранения помехи, режекторный фильтр помог устранить нежелательное влияние от других передатчиков. В результате для передатчика GPS соблюдается электромагнитная совместимость и имеется большой запас от негативного влияния. Для второго метода оценки, был смоделирован проект для анализа изменения уровня сигнала с учетом городской застройки и вносимых внешних помех. В условиях городской застройки было создана АМС с направленной антенной сотового оператора, мобильный телефон и передатчик, который вносит помехи. В ходе моделирования было использовано два метода оценки электромагнитной совместимости и предложены меры по обеспечению электромагнитной совместимости.

Основные результаты работы:

- в теоретической части диссертации было предположение о влиянии некоторых радио систем друг на друга и рассмотрены методы оценки ЭМС;
- в программном пакете Ansys EMIT был сформирован проект с радиосистемами, которые встречаются в современном смартфоне, для более точного воссоздания ЭМО и локальной оценки группировки РЭС;
- проанализировано взаимное влияние различных радиосистем, были обнаружены причины и источник электромагнитных помех;
- предложено одно из решений для устранения продуктов интермодуляции;
- создан проект для анализа уровня сигнала при распространении в городской застройке, с учётом шумов;
- рассмотрено два метода оценки ЭМС и предложены методы по обеспечению ЭМС.

Научная новизна работы заключается в оценке взаимного влияния радиосистем различных технологий и способах обеспечения электромагнитной совместимости, при их совместной работе в современном мобильном устройстве.

Практическая значимость заключается в возможности определения источника электромагнитных помех и прогнозирования потенциальных влияний на радиосистемы, при проектировании радиосистем мобильных устройств.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях перечня РИНЦ

- 1) Зарипова А.Р. Анализ электромагнитной совместимости в ANSYS EMIT/ А.Р. Зарипова, Д.В. Денисов// ADVANCES IN SCIENCE AND TECHNOLOGY Сборник статей XXII международной научно-практической конференции. Научно-издательский центр «Актуальность.РФ». 2019. С. 85-86
- 2) Зарипова А.Р. Исследование электромагнитной совместимости радиосистем мобильных устройств // Международный журнал «Цифровая наука», г. Саратов 2020;

Научные статьи, опубликованные в изданиях УрТИСИ СибГУТИ

- 1) Анализаторы Wi-Fi-покрытия// Материалы XX научно-практической конференции студентов УрТИСИ СибГУТИ – Екатеринбург: Изд-во УрТИСИ СибГУТИ, 2018 г.;
- 2) Исследование электромагнитной совместимости радиосистем// Материалы научно-практической конференции студентов УрТИСИ СибГУТИ – Екатеринбург: Изд-во УрТИСИ СибГУТИ, 2019;