Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.396.946

Туромша

Тимофей Павлович

Анализ условий электромагнитной совместимости земных станций диапазона С и базовых станций сетей пятого поколения

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук

по специальности Радиосистемы и Радиотехнологии (7-06-0713-03)

_____

Научный руководитель

Козел Виктор Михайлович

Кандидат технических наук, доцент

_____

Минск 2026

ВВЕДЕНИЕ

В отличие от сегодняшних сотовых сетей четвертого поколения (4G), грядущее пятое поколение (5G) призвано обеспечить увеличение емкости в 1000 раз, скорость передачи данных в 10–100 раз выше, время автономной работы в 10 раз дольше, задержку от конца до конца в 5 раз меньше и поддерживать в 10–100 раз больше подключаемых устройств. Однако для выполнения этих требований все еще существует ряд проблем, и многие промышленные предприятия и академические круги прилагают значительные усилия для повышения спектральной эффективности, пропускной способности систем, энергоэффективности и связности в будущих беспроводных сетях. Одним из главных ограничений для удовлетворения потребностей в емкости будущих сетей 5G и последующих поколений является недоступность пригодного для использования радиочастотного спектра, т.е. дефицит спектра, вызванный его фрагментацией и текущей политикой статического распределения частот. Один из возможных подходов к решению этой проблемы заключается в обеспечении совместного использования уже распределенного спектра различными системами, что приводит к концепции динамического совместного использования спектра. Однако успех этого метода в системах 5G во многом зависит от международных и национальных регулирующих органов, поскольку именно они отвечают за предоставление новых полос частот, определение механизмов частотной координации и операционных руководящих принципов для развертывания 5G.

Чтобы обеспечить такое совместное использование, необходимо тщательно изучить взаимодействие между мобильной службой и действующей службой (или службами). Эти исследования называются исследованиями электромагнитной совместимости и направлены на поиск набора параметров (которые могут быть техническими, практическими или, в некоторых случаях, политическими), позволяющих службам сосуществовать в одних и тех же полосах частот без создания вредных помех.

Одним из диапазонов, который оказался особенно спорным, является C–диапазон (3400 – 4200 МГц), части которого определены Международным союзом электросвязи (МСЭ) для служб Международной подвижной связи (IMT), более известных как 5G. В этом диапазоне работает большое количество спутниковых передач (космос–Земля), а во многих странах — фиксированные радиорелейные линии типа «точка–точка» или «точка–многоточка». Многие организации по всему миру изучали вопрос о том, могут ли и каким образом системы 5G сосуществовать с наземными спутниковыми приемниками в этом диапазоне. Результаты этих исследований существенно разнятся, что не позволяет обеспечить достаточную согласованность, которую

другие могли бы использовать для принятия решений о возможности и способах совместного существования этих двух систем.

Объектом исследования являются радиосистемы спутниковой связи C-диапазона и сотовые сети пятого поколения, работающие в смежных и совмещённых частотных полосах.

Предмет исследования – электромагнитная совместимость указанных систем, определяемая уровнем взаимных помех при различных частотных, пространственных и технических параметрах.

Цель работы – провести анализ условий электромагнитной совместимости земных станций FSS C-диапазона и базовых станций 5G в диапазонах n77/n78, а также определить необходимые расстояния пространственного разнесения и технические меры для обеспечения их совместного сосуществования без создания вредных помех.

Научная новизна работы заключается в разработке и исследовании модели оценки электромагнитной совместимости систем 5G и фиксированной спутниковой службы на основе рекомендаций ITU-R с учётом механизмов блокирования малошумящего усилителя, внеполосных излучений и влияния защитного частотного интервала.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования полученных результатов при планировании сетей мобильной связи пятого поколения, разработке нормативных требований по электромагнитной совместимости и оценке возможности использования C-диапазона различными радиослужбами.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, десяти глав, заключения, списка использованных источников (32 наименование) и двух приложений. Общий объём работы – 116 страниц.

Во первой главе выполнен обзор существующих исследований по ЭМС 5G и FSS, выявлены расхождения в исходных данных и предложен консервативный набор допущений.

Вторая глава посвящена анализу спектрального распределения ITU и определению конкретных полос частот, в которых возможно пересечение служб.

Третья глава содержит общее описание систем спутниковой связи, их классификации и принципов построения.

Четвертая глава рассматривает теоретические основы расчёта шумовых характеристик: шумовой температуры антенны и шума приемного устройства.

Пятая глава определяет зависимость усиления антенн от их угла поворота.

Шестая глава даёт обзор существующих радиосистем С-диапазона на примере станций Р-440О и Р-443О.

Седьмая глава описывает характеристики спутника на геостационарной орбите (на примере Ямал-601) с расчётом углов места и азимута для территории Беларуси.

Восьмая глава посвящена анализу земного приёмопередатчика: его структуре, параметрам LNA, расчёту чувствительности и уровня шума.

Девятая глава описывает систему мобильной связи 5G: сценарии развёртывания, антенные системы, маски излучения и критерии совместимости.

Десятая глава представляет методику ITU-R P.452 и её адаптацию для расчёта потерь на трассе с учётом дифракции, затенения и других факторов. Здесь же приведены результаты численного моделирования и параметрического анализа.

Одиннадцатая глава посвящена разработке методики оценки ЭМС

В двенадцатой главе разрабатывается алгоритм для моделирования ЭМС

Тринадцатая глава описывает разработанный алгоритм моделирования

Четырнадцатая глава посвящена моделированию системы в различных условиях.

В пятнадцатой главе описываются достигнутые результаты.

В заключении сформулированы основные выводы и практические рекомендации.

Приложение А содержит исходный код программы на MATLAB, реализующей разработанную модель.

Приложение Б содержит слайды к презентации

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В работе рассмотрена проблема электромагнитной совместимости базовых станций сетей мобильной связи пятого поколения и земных станций фиксированной спутниковой службы, работающих в С-диапазоне частот.

На первом этапе исследования выполнен анализ существующих публикаций и нормативных документов, посвящённых вопросам совместного использования радиочастотного спектра системами 5G и спутниковой связи. Установлено, что результаты различных исследований существенно отличаются вследствие использования различных критериев совместимости, моделей распространения радиоволн и исходных параметров оборудования. На основании проведённого анализа сформирован консервативный набор исходных данных для дальнейшего моделирования.

Проведён анализ распределения радиочастотного спектра в диапазоне 3–5 ГГц и определены полосы частот, в которых возможно возникновение взаимных помех между системами 5G и фиксированной спутниковой службой. Показано, что диапазоны n77 и n78 частично перекрываются с полосой приёма спутниковых систем С-диапазона, что создаёт предпосылки для возникновения как совмещённых, так и соседних помех.

Для оценки чувствительности спутникового приёмника рассмотрены характеристики земной станции спутниковой связи, включая параметры антенны, шумовую температуру системы и характеристики малошумящего усилителя. Выполнен расчёт коэффициента усиления антенны, уровня собственного шума приёмного тракта и допустимой мощности внешней помехи в соответствии с критерием I/N.

В работе исследованы основные механизмы возникновения помех со стороны базовых станций 5G, включая работу в совмещённом канале, воздействие внеполосных излучений, а также блокирование и перегрузку входных каскадов спутникового приёмника. Выполнена оценка требуемых потерь распространения для каждого из рассматриваемых сценариев.

Для более точного анализа разработана математическая модель расчёта электромагнитной совместимости на основе рекомендаций ITU-R P.452-18. Модель учитывает потери свободного пространства, атмосферное поглощение, дифракцию на сферической Земле и дополнительное затухание, обусловленное наличием лесных массивов. Численная реализация модели выполнена в среде MATLAB.

С использованием разработанной модели проведён параметрический анализ влияния различных факторов на условия электромагнитной совместимости. Исследовано влияние рабочей частоты, высоты размещения

антенн, диаметра спутниковой антенны, угла места спутника, характеристик входной фильтрации и величины защитного частотного интервала между системами.

Полученные результаты показывают, что наиболее неблагоприятным сценарием является работа систем в совмещённом канале. В этом случае обеспечение электромагнитной совместимости требует значительных расстояний пространственного разнесения между базовыми станциями 5G и земными станциями спутниковой связи. При использовании соседних полос частот условия совместимости существенно улучшаются.

Установлено, что наиболее эффективным способом снижения взаимных помех является введение защитного частотного интервала между системами. Дополнительное применение входных фильтров спутникового приёмника позволяет дополнительно уменьшить требуемые расстояния пространственного разнесения. По результатам моделирования определены рекомендуемые значения частотного разнесения и оценены необходимые защитные расстояния для различных сценариев совместного использования спектра.

Полученные результаты подтверждают возможность обеспечения электромагнитной совместимости систем 5G и фиксированной спутниковой службы при использовании комплекса технических мер, включающих частотное разнесение, фильтрацию сигналов и учёт пространственного расположения объектов связи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы был рассмотрен вопрос использования С–диапазона радиочастот сетями пятого поколения и проанализирована проблема электромагнитной совместимости между системами 5G и существующими радиослужбами. Показано, что диапазон 3–5 ГГц используется сразу несколькими типами систем, включая мобильные сети, спутниковую связь, радиолокацию и авиационные службы. Такое распределение спектра приводит к необходимости детального анализа возможных взаимных помех между различными радиосистемами.

Основное внимание в работе было уделено взаимодействию между базовыми станциями 5G и приемниками фиксированной спутниковой службы (FSS). Спутниковые приемники работают с крайне слабыми сигналами, поступающими со спутников, поэтому мощные наземные передатчики мобильных сетей могут создавать для них вредные помехи. Основными механизмами возникновения помех являются совмещенные помехи на рабочей частоте и внеполосные излучения передатчиков 5G, а также возможная перегрузка малошумящих усилителей спутниковых приемников.

Проведенный анализ существующих исследований показывает, что при работе систем 5G в той же полосе частот, что и спутниковые приемники С–диапазона, требуются значительные расстояния разнесения между передатчиками и приемниками, которые могут достигать десятков и даже сотен километров. Это делает совместное использование одной и той же полосы частот практически невозможным в большинстве реальных сценариев развертывания сетей.

При использовании соседних частот ситуация может быть улучшена за счет введения защитных полос частот, применения дополнительных фильтров на стороне спутниковых приемников и ограничения уровней излучения базовых станций. Тем не менее даже в этом случае требуется тщательное моделирование условий распространения сигнала и учет большого количества параметров системы.

Таким образом, обеспечение совместного использования С–диапазона системами 5G и спутниковой связи является сложной инженерной задачей, требующей применения комплекса технических и регуляторных мер. К таким мерам относятся введение защитных частотных полос, ограничение мощности передатчиков, применение фильтрации сигналов и учет пространственного разнесения между источниками и приемниками радиосигналов. Реализация данных мер позволяет снизить уровень взаимных помех и обеспечить устойчивую работу различных радиослужб в условиях ограниченного радиочастотного спектра.

Полученные результаты могут быть использованы регулирующими органами, операторами связи и проектировщиками сетей при планировании развёртывания 5G вблизи существующих спутниковых станций, а также при разработке национальных нормативных актов по электромагнитной совместимости.