

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

УДК 621.391.96

То Лвин Хтун

Защита земных станций С-диапазона от помех сетей связи NR

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание степени магистра технических наук
по специальности 7-06-0713-03
«Радиосистемы и радиотехнологии»

_____То Лвин Хтун

Научный руководитель

Козел Виктор Михайлович

Кандидат технических наук, доцент

Минск 2025

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Регламентом Радиосвязи (в редакции 2024 года, вступает в силу 01 января 2025 года) полоса радиочастот 3400-3800 МГц распределена **ФИКСИРОВАННОЙ, ФИКСИРОВАННОЙ СПУТНИКОВОЙ** (космос-Земля), ПОДВИЖНОЙ, за исключением воздушной подвижной, службам на первичной основе. В тоже время, использование полосы радиочастот 3600-3800 МГц подвижной службой в Республике Беларусь в соответствии с Таблицей распределения полос радиочастот между радиослужбами Республики Беларусь (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 09.08.2016 года № 620) пока ограничено вторичным характером её использования. В целом полоса радиочастот 3400-3800 МГц определена как наиболее перспективная для внедрения сетей Международной подвижной службы IMT-2020 (5G).

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Целью выполнения работ является изыскание возможности выделения полосы радиочастот шириной 100 МГц с временным дуплексным разделением каналов (TDD) в полосе радиочастот 3400 – 3800 МГц для эксплуатации радиоэлектронных средств (РЭС) сухопутной подвижной службы системы сотовой подвижной электросвязи (СПЭ) IMT-2020 (5G).

Основными задачами, решаемыми в диссертации являются:

сбор исходных данных по номенклатуре и тактико-техническим характеристикам действующих РЭС гражданского и специального назначения, эксплуатируемых и планируемых к внедрению в исследуемой полосе радиочастот 3400-3800 МГц, а также их применения;

исследование сценариев формирования электромагнитного поля РЭС сотовой подвижной электросвязи стандарта IMT-2020 (5G) с временным разделением каналов (TDD) с точки зрения методологии обеспечения электромагнитной совместимости;

разработка методики проведения натурных экспериментов на электромагнитную совместимость и критериев защиты РЭС СПЭ стандарта 5G с РЭС специального назначения в полосе радиочастот 3400-3800 МГц;

постановка и проведение натурных (стендовых) экспериментов на электромагнитную совместимость РЭС СПЭ стандарта 5G с РЭС специального назначения в условиях совместного использования полосы радиочастот 3400-3800 МГц;

частотно-территориальный анализ помехового воздействия РЭС СПЭ стандарта 5G по критериям защиты РЭС специального назначения и оценка

перспектив и объема радиочастотного спектра, доступного для развития технологии IMT-2020 (5G) на территории Республики Беларусь в условиях совместного использования полосы радиочастот 3400-3800 МГц;

разработка предложений по реализации методов и способов обеспечения электромагнитной совместимости РЭС СПЭ стандарта IMT-2020 (5G) с РЭС специального назначения в условиях совместного использования полосы радиочастот 3400-3800 МГц;

частотно-территориальный анализ помехового воздействия РЭС СПЭ стандарта IMT-2020 (5G) по критериям защиты РЭС гражданского назначения и оценка перспектив и объема радиочастотного спектра, доступного для развития технологии IMT-2020 (5G) на территории Республики Беларусь в условиях совместного использования полосы радиочастот 3400-3800 МГц.

Цель и задачи исследования

Цель работы: Изыскание возможности выделения полосы радиочастот шириной 100 МГц с временным дуплексным разделением каналов (TDD) в полосе радиочастот 3400 – 3800 МГц для эксплуатации радиоэлектронных средств (РЭС) сухопутной подвижной службы системы сотовой подвижной электросвязи (СПЭ) IMT-2020 (5G) по результатам проведения экспертизы на электромагнитную совместимость с РЭС гражданского и специального назначения.

Задачи исследования;

1. Сбор и анализ тактико-технических характеристик РЭС ФСС и IMT-2020 (5G), работающих в полосе 3400–3800 МГц.
2. Исследование сценариев помехового воздействия базовых станций (БС) 5G на земные станции спутниковой связи (ЗССС).
3. Разработка методики оценки ЭМС, включая критерии защиты ЗССС от помех.
4. Проведение натурных экспериментов для проверки теоретических моделей помехового воздействия.
5. Частотно-территориальный анализ с определением координационных зон и допустимых разносов между РЭС.
6. Разработка предложений по обеспечению ЭМС, включая методы частотного и пространственного разделения.
7. Анализ международных стандартов и регуляторных требований к защите ЗССС.

Научная новизна:

- Впервые для условий Республики Беларусь проведен комплексный анализ ЭМС РЭС 5G и ЗССС с учетом геостационарной орбитальной группировки.
- Разработаны адаптированные критерии защиты ЗССС, учитывающие специфику их размещения и эксплуатации.

Личный вклад соискателя ученой степени

Содержание диссертации отображает личный вклад автора. Он заключается в научном обосновании методов, программных средств и т.д.) названия, постановке и проведении экспериментов по исследованию характеристик, обработке и анализе полученных результатов, формулировке выводов.

Определение целей и задач исследований, интерпретация и обобщение полученных результатов проводились совместно с научным руководителем-Кандидат технических наук, доцент. Козел. В. М.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на республиканской научно-технической конференции «Информационные радиосистемы и радиотехнологии» (г. Минск 2024 г.); 61-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск 2025 г.).

Опубликование результатов диссертации

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 2 статьи в сборниках материалов научных конференций. Общий объем публикаций составляет 0.5 авторских листа.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Технология системы сотовой подвижной 5-го поколения IMT-2020 (5G)

Радиоэлектронных средств IMT-2020: глобального стандарта 5G для нового радиointерфейса на основе OFDM и Massive MIMO (множественный входной сигнал с несколькими входами - 64-256 антенн) с временным разделением каналов (TDD).

Заявляемые радиоэлектронные средства предназначены для организации радиопокрытия и обеспечения пользовательского радиointерфейса в сети сотовой подвижной электросвязи IMT-2020 (5G), в соответствии со спецификациями 3GPP TS 38 series (<https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-17>).

Полосы радиочастот соответствуют спецификации 3GPP TS 38.211 V18.4.0 предусматривающему использование для эксплуатации сетей IMT-2020 (5G) целого ряда полос радиочастот из двух условных блоков FR (в нашем случае FR1: частоты до 6 ГГц) с максимальной шириной одного радиоканала равной 100 МГц. Технические характеристики РЭС сети IMT-2020 (5G) для проведения экспертизы на электромагнитную совместимость приняты в соответствии с радиочастотной заявкой ООО «Белорусские облачные технологии».

1.2 Перечень радиоэлектронных средств фиксированной спутниковой службы (3400-4200 МГц) гражданского назначения подлежащих экспертизе на электромагнитную совместимость и их основные характеристики.

Радиоэлектронные средства фиксированной спутниковой службы "гражданского назначения" полосу радиочастот 3400-3600 МГц не использует, что обусловлено техническими параметрами транспондеров спутника BELINTERSAT-1, а использование полосы радиочастот 3600-3800 МГц ограничено территориями обслуживания Африканского и Азиатского (Восточного) луча спутника BELINTERSAT-1.

1.3 Перечень радиоэлектронных средств фиксированной спутниковой службы (3400-4200 МГц) специального назначения подлежащих экспертизе на электромагнитную совместимость и их основные характеристики.

Таблица Краткие характеристики РЭС спутниковой связи специального назначения Р443

Наименование параметра, характеристики	Значение параметра, характеристик
Диаметр антенны, м	эквивалент 2.5м
Диапазон рабочих частот на прием, ГГц	3.4-4.2
Коэффициент усиления антенны на средней частоте приема, дБ, не менее	расчетное значение 39
Поляризация антенны	Круговая левая/правая
КСВН трактов приема и передачи	не более 1,6
Диапазон угловых перемещений антенны в горизонтальной плоскости, град	0-360
Диапазон угловых перемещений антенны в плоскости угла места, град	0-90
Шумовая температура, К	100

Краткие характеристики системы спутниковой связи специального назначения «Аурига 1.2в»

Наименование параметра, характеристики	Значение параметра, характеристик
Диаметр антенны, м	эквивалент 1.2м
Диапазон рабочих частот на прием, ГГц	3.4-4.2
Коэффициент усиления антенны на средней частоте приема, дБ, не менее	31, расчетное значение 33
Поляризация антенны	Круговая левая/правая
КСВН трактов приема и передачи	не более 1,6
Диапазон угловых перемещений антенны в горизонтальной плоскости, град	0-360
Диапазон угловых перемещений антенны в плоскости угла места, град	0-90
Шумовая температура МШУ, К	20

1.4 Особенности организации каналов связи с использованием геостационарной спутниковой группировки

Таблица Азимуты и углы места антенн ЗССС на территории РБ

Точка стояния	Азимут антенны ЗССС,	Угол места антенны
---------------	----------------------	--------------------

спутника, градус в.д.	град	ЗССС, град
10	195-207	24-29
45	158-165	25-30
51	147-158	26-30
90	108-117	5.6-11

2 КРИТЕРИЙ БЕСПОМЕХОВОЙ РАБОТЫ ЗЕМНОЙ СТАНЦИИ СИСТЕМЫ СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЫ

Допустимая деградация эквивалентной шумовой температуры в случае помех от сухопутной подвижной службы должны составлять не более 6%.

Следовательно, предельный уровень мощности допустимой помехи на выходе приемной антенны в полосе частот 5 МГц составляет;

$$P_I = N \times 5 \times 10^6 = 3.31 \times 10^{-22} \times 5 \times 10^6 \cong 1,66 \times 10^{-15} \text{ Вт или минус } 118 \text{ дБм} - \text{ для земной станции Р443,}$$

и

$$P_I = N \times 5 \times 10^6 = 2,65 \times 10^{-22} \times 5 \times 10^6 \cong 1,33 \times 10^{-15} \text{ Вт или минус } 119 \text{ дБм} - \text{ для земной Аурига 1,2В,}$$

Соответственно в единицах напряженности электрического поля для случая помехового воздействия в пределах главного луча ($\pm 2^\circ$) диаграммы направленности приемной антенны земной станции:

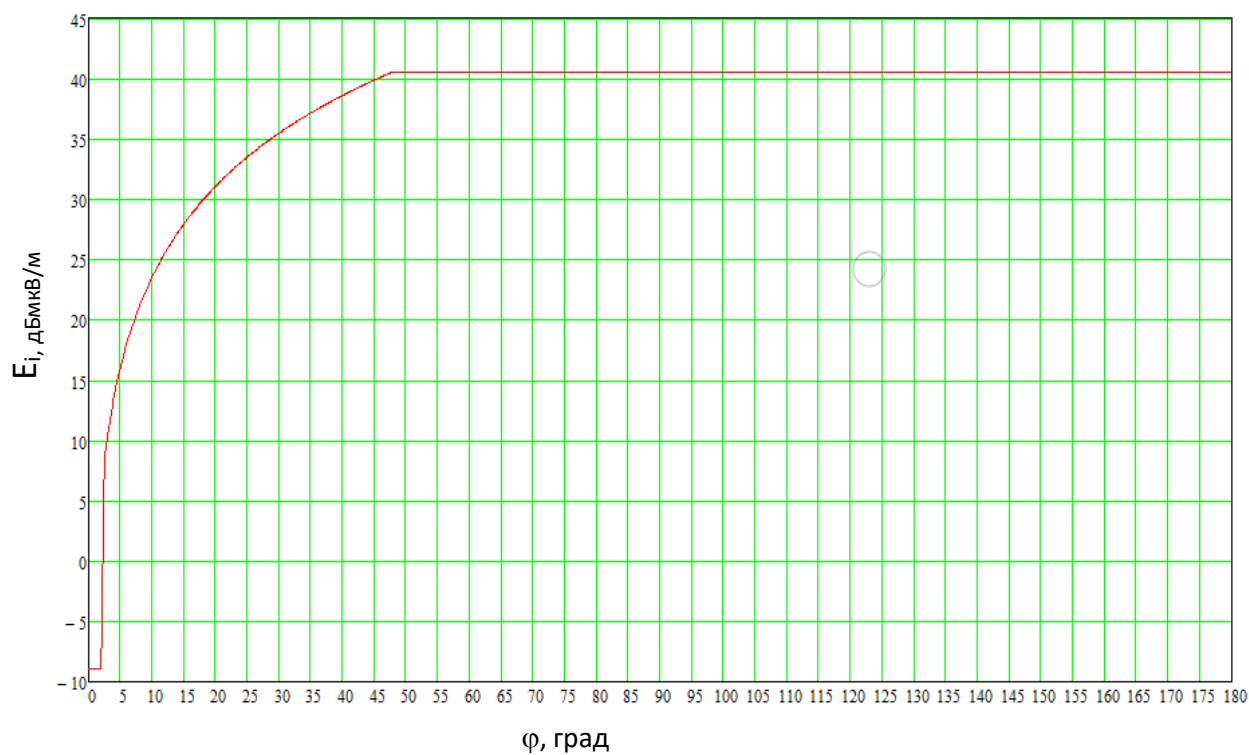
$$E_I = \sqrt{\frac{120\pi P_I}{S}} = \sqrt{\frac{120\pi P_I}{\pi R^2}} = \sqrt{\frac{120 \times 3.14 \times 1,66 \times 10^{-15}}{3,14 \times (1,25)^2}} = 0,36 \text{ мкВ/м или минус } 8,9 \text{ дБмкВ/м} - \text{ для земной станции Р443}$$

и

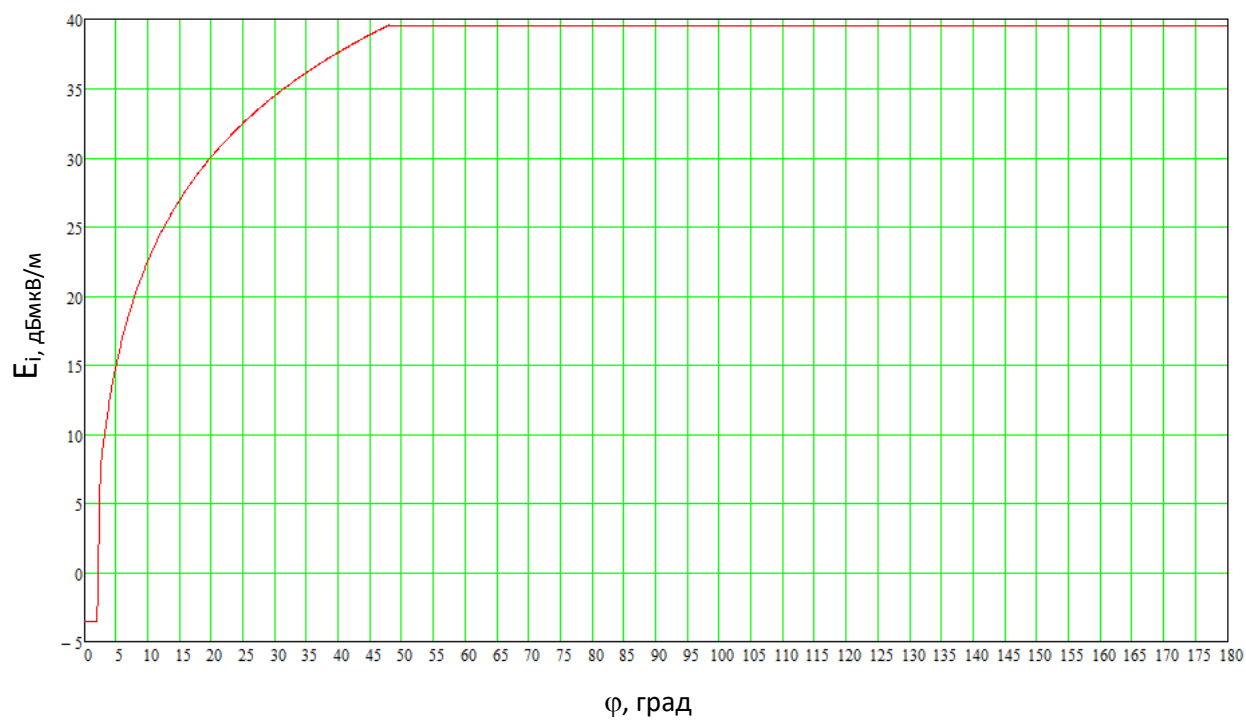
$$E_I = \sqrt{\frac{120\pi P_I}{S}} = \sqrt{\frac{120\pi P_I}{\pi R^2}} = \sqrt{\frac{120 \times 3.14 \times 1,33 \times 10^{-15}}{3,14 \times (0,6)^2}} = 0,66 \text{ мкВ/м или минус } 3,6 \text{ дБмкВ/м} - \text{ для земной Аурига 1,2В}$$

где S и R – площадь апертуры и радиус апертуры приемной антенны, м^2 и м , соответственно (здесь для упрощения принято, что эффективная площадь приемной антенны равна ее апертуре) $R=1.25$ и $0,6$ м для земных станций Р443 и «Аурига 1,2В» соответственно;

На рисунках приведены зависимости допустимой напряженности поля помех, создаваемых в месте расположения земных станций Р443 и «Аурига 1,2В» в диапазоне вне осевых углов $0...180^\circ$ (в диапазоне углов $2...2,5^\circ$ применена кусочно-линейная аппроксимация).



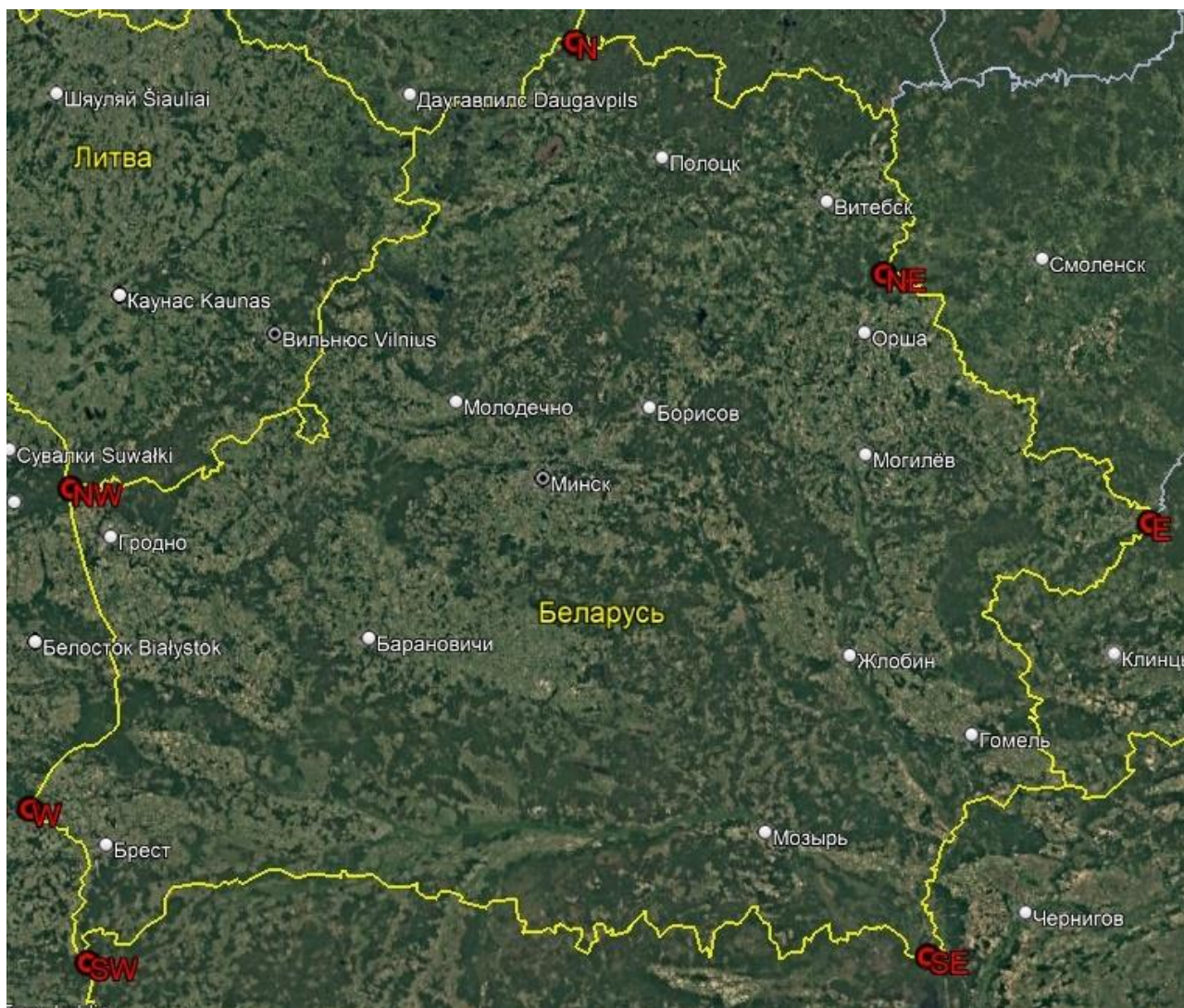
Допустимая напряженность поля помех для земной станции R443



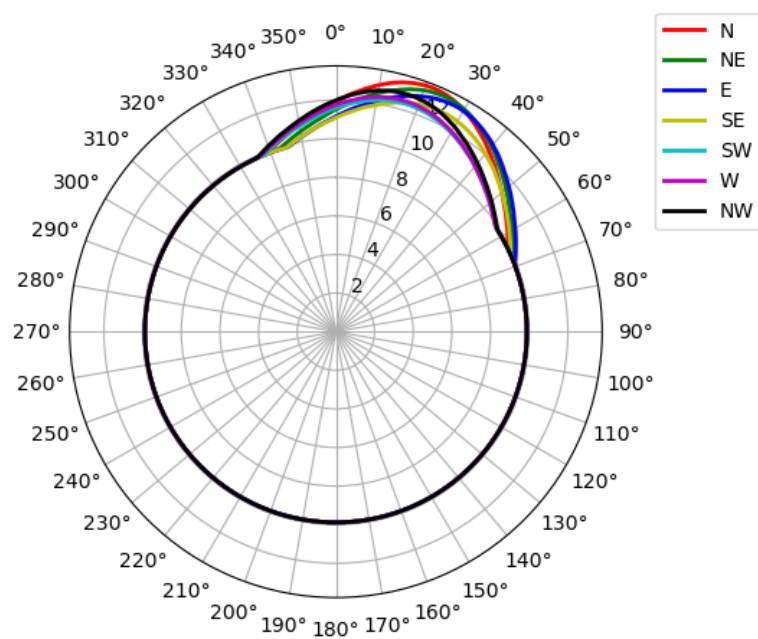
Допустимая напряженность поля помех для земной станции «Аурига 1,2В»

3 ОЦЕНКА УРОВНЯ ПОМЕХОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТ РЭС СОТОВОЙ ПОДВИЖНОЙ СВЯЗИ СТАНДАРТА 1MT-2020 (5G) В ТОЧКЕ СТОЯНИЯ РЭС НАЗЕМНОЙ СПУТНИКОВОЙ СЛУЖБЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

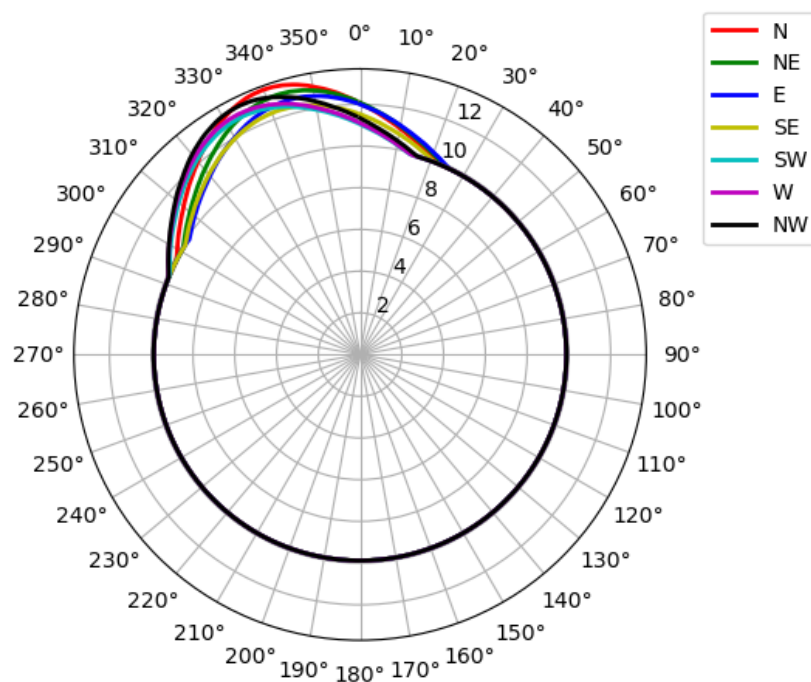
Учитывая случайный характер размещения и зависимости уровня допустимой помехи от географического расположения ЗССС построено семейство координационных зон для ЗССС в предельных точках на границе территории Республики Беларусь.



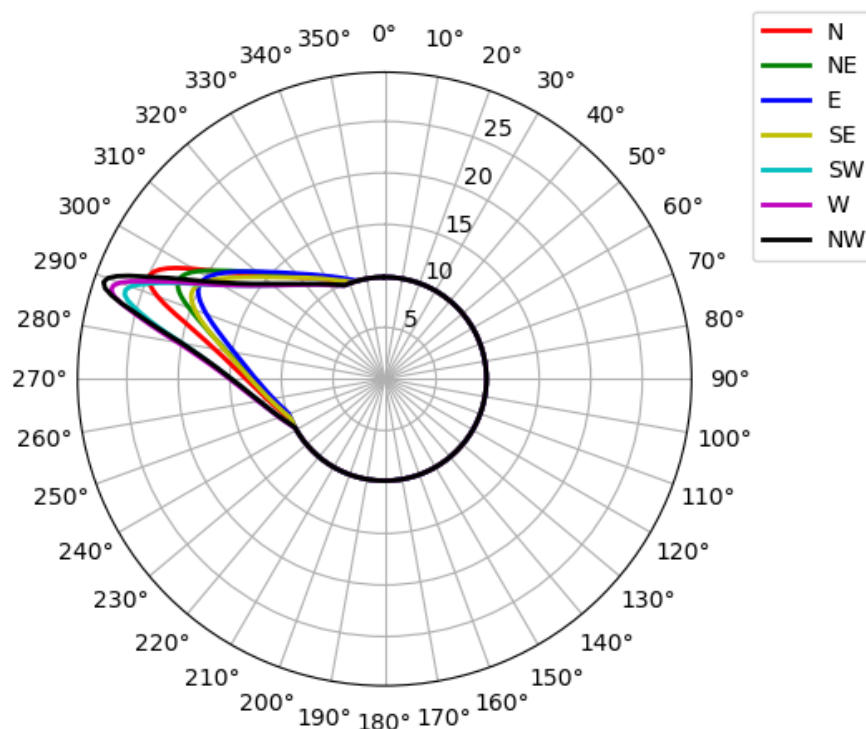
Пространственное расположение предельных точек



Координационная зона от БС IMT-2020 (5G) для ЗССС в предельных точках для долготы стояния спутника 10 град.



Координационная зона БС IMT-2020 (5G) для ЗССС в предельных точках для долготы стояния спутника 45 град.



Координационная зона БС IMT-2020 (5G) для ЗССС в предельных точках для долготы стояния спутника 90 град.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА ПОМЕХОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ БАЗОВОЙ СТАНЦИИ СЕТИ IMT-2020 (5G) НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ЗЕМНОЙ СТАНЦИИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Тактико-технические характеристики экспериментальной базовой станции IMT-2020 (5G)

Производитель и тип оборудования	Huawei Technologies	
Место размещения антенн	на триподе на кровле здания	
Высота фазового центра антенны над поверхностью земли, м	12	
Рабочие частоты (ширина канала)	3700-3800 МГц (100 МГц)	
Сектор излучения	1	2
Азимут максимального излучения, град	20	170
Угол максимального излучения в вертикальной плоскости, град	0	0
Регулируемая мощность передатчика, дБм/на каналный элемент	5-35	5-35
Тип антенны	Huawei AAU5613	Huawei AAU5613

Коэффициент усиления антенны в луче, дБи	20.82	20.82
Ширина ДН луча по половинной мощности в гор.пл.(верт.пл.), град	15/12	15/12
Поляризация излучения	Х	
Режим работы TDD	3/7	
Сценарий работы	7+1 лучей	

В контрольных точках (КТ) поэтапно размещалась земная станция спутниковой связи Аурига-1.2В (рисунок 13). Работа земной станций в КТ осуществлялась на геостационарный спутник «Благовест» с т.с. 45 гр. в.д. на рабочей частоте 3752,0 МГц (QPSK 2/3), азимут максимального излучения 159,0 градусов, угол места 26,4 градуса.

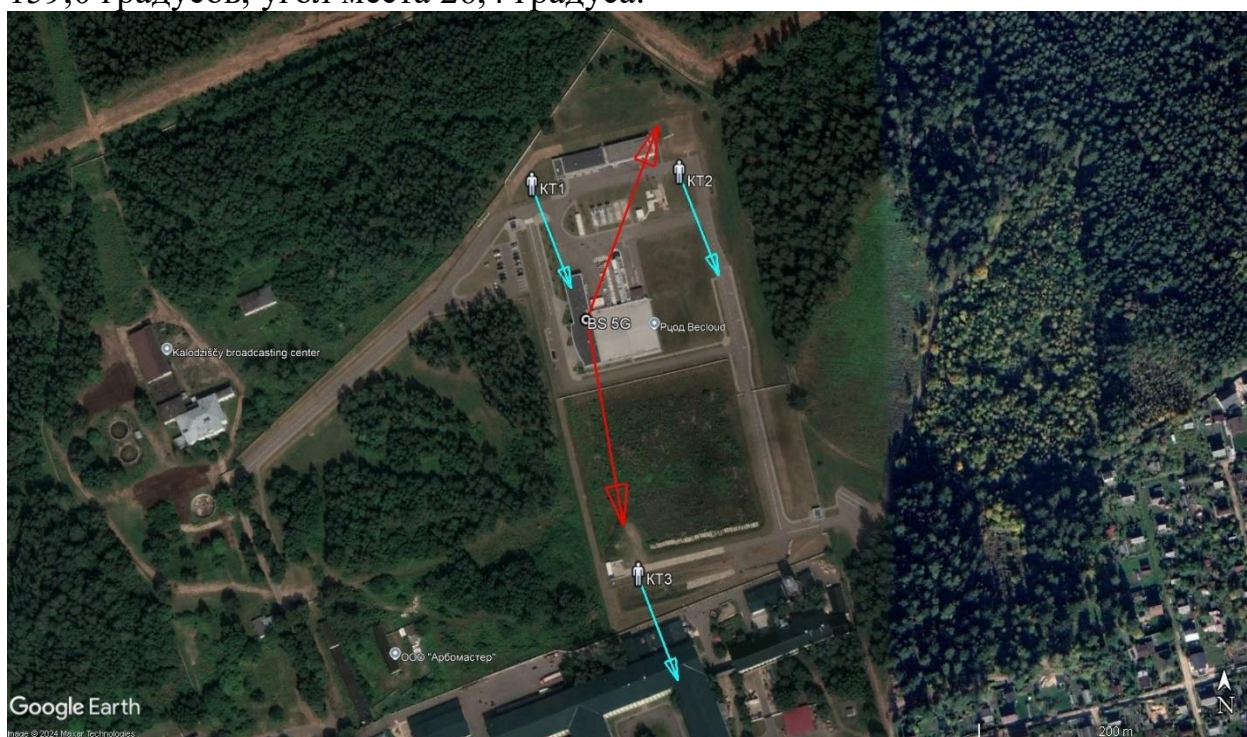


Схема проведения эксперимента

Обобщённые результаты экспериментальных измерений приведены в таблице

Результаты экспериментальных измерений

Номер КТ	Мощность на канальный элемент, дБм		Сигнал/шум ЗССС, дБ	Работоспособность ЗССС
	Сектор №1	Сектор №2		
1	-	-	13,2...13,4	+
	5	-	0	-
	-	5	0	-
2	-	-	10,9...11,0	+
	5	-	0	-

	-	5	0	-
3	-	-	12,8...12,9	+
	-	5	1,7...2,3	-
	15	-	7,6...9,0	-
	10	-	10,6...8,	+/-
	5	-	11,9	+

Приведенные в таблице результаты экспериментальных исследований подтверждают наличие помехового воздействия базовых станций сети сотовой подвижной электросвязи стандарта IMT 2020 (5G) на приемные тракты земных станций спутниковой связи и коррелируют с результатами теоретической оценки критериев защиты и размеров требуемого территориального разнеса конфликтующих радиоэлектронных средств.

5 АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ ПРИСВОЕНИЙ СПУТНИКОВОЙ ГРУППИРОВКИ, ИСПОЛЪЗУЕМОЙ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ СВЯЗИ

Частотные присвоения транспондеров космических аппаратов в полосе радиочастот 3400-3800 МГц.

Канал IMT- 2020 (5G)	Blagovest 1 (Cosmos 2520) @ 45° E	Belintersat 1 (ChinaSat 15) @ 51.5° E	Blagovest 3 (Cosmos 2533) @ 70° E	Yamal 401 @ 90° E
МГц	Freq Pol	Freq Pol	Freq Pol	Freq Pol
1	2	3	4	5
3400- 3500				
3500- 3600	3527 R			
	3531 R			
				3571 R
				3588 L
	3598 R			
3600- 3800				3605 L
		3614 R	3614 R	
				3616 R
		3617 R		

		3624 R		
--	--	--------	--	--

1	2	3	4	5
		3634 R		
				3639 R
	3641 R	3641 R		
		3645 R		3645 L
	3653 L			
	3654 R			
	3669 R			
				3674 R\L
				3681 R
		3694 R		
3700- 3800		3705 R		3705 L
			3710 R	
	3720 L			
				3725 L
				3728 R
			3742 R	
	3743 R			
				3747 L
				3748 R
	3749 R			
			3753 R	
	3759 R		3759 R	
	3761 L			3761 L
			3774 R	
		3780 L		
		3784 L		
		3786 R		
	3793 L			

Анализ представленных выше данных показывает, что полоса радиочастот 3400-3500 МГц является наименее утилизирована основными спутниковыми сетями, используемыми на территории Республики Беларусь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств сотовой подвижной электросвязи IMT-2020 (5G) с действующими радиоэлектронными средствами гражданского и специального назначения в полосе радиочастот 3400-3800 МГц позволяет сделать следующие выводы и заключения.

1. Внедрение сетей сотовой подвижной электросвязи IMT-2020 (5G) в полосе радиочастот 3400-3800 МГц сопряжено с необходимостью обеспечения электромагнитной совместимости с РЭС фиксированной спутниковой службы гражданского и специального назначения, использующим указанную полосу радиочастот на первичной основе.

2. Основным видом помехового поражения является воздействие излучения базовых станций сотовой подвижной электросвязи IMT-2020 (5G) на приемные тракты земных станций спутниковой связи.

3. Особенности организации спутниковых каналов связи с использованием геостационарных космических аппаратов, расположенных в точках стояния от 10 до 90 гр.в.д., фактически исключают возможность помехового поражения ЗССС по основному лучу диаграммы направленности. Это существенно сокращает, но не исключает необходимость обеспечения территориальных разнесов конфликтующих РЭС.

4. Обеспечение электромагнитной совместимости ЗССС с базовыми станциями сотовой подвижной электросвязи IMT-2020 (5G) при совместном использовании полос радиочастот (работа в совмещенном канале) в общем случае требует обеспечения территориальных разнесов от 10-ти до 30-ти км. (без учета экранирующих свойств рельефа, растительности, застройки и т.д.).

5. Указанные территориальные разнесы обеспечивают защиту приемных трактов ЗССС от линейного поражения, а динамический диапазон и характеристики частотной избирательности входных трактов ЗССС исключают их блокирование.

СПИСОК СОБСТВЕННЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

1. То Лвин Хтун. Критерий защиты от помех земных станций диапазона с при непреднамеренном помеховом воздействии от базовых станций сети связи / То Лвин Хтун // материалы открытой республиканской научно-практической интернет-конференции(Республика Беларусь, Минск, 21–22 ноября 2024 года), Минск: БГУИР, 2024. – С. 52-57.
2. То Лвин Хтун. Критерий беспомеховой работы земной станций системы связи с использованием геостационарной / То Лвин Хтун // сборник материалов 61-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Респ. Беларусь, Минск, 22–23 апр. 2025 г.), Минск, БГУИР, 2025.