

# Совместное использование частотного ресурса для развития сетей 5G в диапазоне 700 МГц

**В.П. Высочин**, начальник отдела ЦНИИ ВВС Минобороны России, с.н.с., к.т.н.; [cnii\\_vvs@mil.ru](mailto:cnii_vvs@mil.ru)

УДК 621.391.82

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы электромагнитной совместимости (ЭМС) оборудования мобильных сетей связи 5G и приемных устройств радиоэлектронных средств (РЭС) воздушной радионавигационной службы (ВРНС) в диапазоне 700 МГц. Приведены результаты исследований воздействия непреднамеренных помех от передатчиков сетей связи 5G на РЭС ВРНС для различных сценариев их взаимодействия. Определены меры обеспечения совместной работы.

**Ключевые слова:** сети связи 5G, азимутально-дальномерный радиомаяк (АДРМ), воздушная радионавигационная служба (ВРНС), электромагнитная совместимость (ЭМС), непреднамеренные радиопомехи (НРП).

## ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие технологии 5G в различных диапазонах радиочастотного спектра порождает множество проблем, связанных с необходимостью решения задачи обеспечения электромагнитной совместимости и частотного шеринга для радиоэлектронных средств, относящихся к различным радиослужбам. Технологическая стратегия развития сетей 5G разделила частотные диапазоны оборудования 5G на диапазоны ниже 6 ГГц (FR1) и выше 6 ГГц (FR2) [1–3]. Одним из наиболее привлекательных диапазонов для будущего развития сетей 5G является диапазон 700 МГц, обозначенный Партнерским проектом по системам 3-го поколения (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) как n28 и n83.

Для будущего внедрения и планирования совместного развития сетей 5G с РЭС воздушной радионавигационной службы, использующих этот диапазон на первичной основе, необходимо провести исследования и сформировать требования к традиционным критериям защиты от помех и ЭМС. Данное условие очень важно в тех случаях, когда полосы частот, используемые в нашей стране на первичной основе РЭС ВРНС Минобороны России, начинают использоваться для сетей мобильной связи 5G. Ранее такая проблема ЭМС РЭС сетей мобильной связи 4-го поколения LTE-800 и РЭС ВРНС возникла в диапазонах частот 880–915/925–960 и 832–862/791–821 МГц и была решена как в теоретическом плане, так и в практическом [4, 5]. Диапазон частот 703–748/758–803 МГц изучен с точки зрения ЭМС с РЭС военного (специального) назначения в меньшей степени, вследствие чего потребуются детальные исследования. Ожидается, что проблема ЭМС приемных устройств РЭС ВРНС Минобороны РФ при развертывании сетей 5G в диапазоне 700 МГц, как и для сетей LTE-800, будет решена.

## ПРОБЛЕМА ЭМС В ДИАПАЗОНЕ 700 МГц

При исследовании возможности обеспечения ЭМС

между передатчиками оборудования 5G и приемниками азимутально-дальномерного радиомаяка (АДРМ) «Тропа-СМД» был рассмотрен один из диапазонов развития сетей мобильной связи 5G, отнесенный к поддиапазону FR1, — n28 (703–748/758–803 МГц). Диапазон n28 имеет традиционную схему дуплекса, применяемую для частотного разделения каналов FDD, когда передатчики абонентских терминалов (АТ) работают в нижней части диапазона в полосе 703–748 МГц, а передатчики базовых станций (БС) — в верхней части диапазона в полосе 758–803 МГц, в отличие от диапазона, используемого в сетях LTE. Ширина каждой дуплексной полосы составляет 45 МГц, разнос между парными частотными каналами линии вверх и линии вниз — 55 МГц, разнос между ближайшими частотными каналами — 10 МГц для режима FDD.

В этом диапазоне частот для сетей 5G могут применяться несколько значений ширины частотного канала для базовых станций и абонентских терминалов 5G (табл. 1 [1, 2]), которые выбраны такими же, как и в сетях LTE.

Емкость диапазона 700 МГц позволяет использовать следующие комбинации значений ширины частотных каналов в каждом дуплексе:

- 9 каналов по 5 МГц;
- 4 канала по 10 МГц + канал 5 МГц;
- 3 канала по 15 МГц;
- 2 канала по 20 МГц + канал 5 МГц.

При частотном анализе загрузки диапазона 700 МГц РЭС различных радиослужб было выявлено, что одной из основных проблем в данном случае будет возможность обеспечения ЭМС сетей 5G с АДРМ «Тропа-СМД», работающим в полосе частот 726–768 МГц. Эту полосу частот могут одновременно использовать радиоприемное устройство АДРМ и радиопередающие устройства абонентских терминалов и базовых станций 5G. Очевидно, что в этом случае РЭС сетей мобильной

**Таблица 1**

Используемые значения ширины частотного канала для БС и АТ

Диапазон NR	SCS, кГц	Ширина частотных каналов для БС и АТ, МГц			
		5	10	15	20
n28	15	Да	Да	Да	Да
	30	Нет	Да	Да	Да

Примечание. SCS – разнос между несущими OFDM-сигнала.

связи 5G будут источниками непреднамеренных радиопомех для РЭС ВРНС (АДРМ «Тропа-СМД»).

Для оценки ЭМС рассматриваемых РЭС были использованы следующие исходные данные, определяющие ЭМС-характеристики этих радиосредств [1–3]: Значения ширины каналов БС и АТ ..... 5 и 10 МГц (режим FDD)

- ЭИМ АТ ..... 23 дБм
- ЭИИМ БС ..... 32 дБВт
- Поляризация антенн БС, АТ ..... Наклонная
- Коэффициент усиления антенны радиоприемного устройства АДРМ «Тропа-СМД» ..... 14 дБ
- Чувствительность радиоприемника АДРМ – 125 дБВт
- Уровень боковых лепестков ДНА АДРМ ..... – 18 дБ
- Потери в АФУ АДРМ «Тропа-СМД» ..... – 1,5 дБ
- Высота фазового центра антенны ..... 3,5–4 м

В ходе исследований ЭМС было рассмотрено два основных помеховых сценария:

- Сценарий 1 – воздействие радиопередающих устройств БС сетей 5G на приемные устройства АДРМ «Тропа-СМД»;
- Сценарий 2 – воздействие радиопередающих устройств АТ сетей 5G на приемные устройства АДРМ «Тропа-СМД».

Показателем помехозащищенности при воздействии НРП от передающих устройств оборудования мобильной связи 5G на АДРМ «Тропа-СМД» служило защитное отношение сигнал/помеха  $K_3$  на входе приемного устройства АДРМ, а показателем качества функционирования АДРМ – правильный прием 99% входящих радиоимпульсов полезного сигнала.

Поскольку до настоящего времени экспериментальные данные по влиянию РЭС сетей 5G на приемные устройства АДРМ не получены, для его оценивания использовались принцип аналогии, а также результаты экспериментальных исследований влияния сигналов от передатчиков оборудования стандарта LTE (с шириной канала  $\Delta f_n = 5$  МГц) и сигналов передатчиков цифрового телевидения (ЦТВ) DVB-T2 ( $\Delta f_n = 8$  МГц) на радиоприемник АДРМ «Тропа-СМД». Данный подход к оценке влияния НРП вполне обоснован, так как в передающих устройствах сетей 5G используется такой же OFDM-сигнал, как и в передающих устройствах сетей LTE и

ЦТВ с DVB-T2.

В передатчиках БС радиointерфейса 5G (линия вниз) используются сигналы с технологией CP-OFDM (Cyclic Prefix – Orthogonal Frequency Division Multiplexing, ортогональное частотное мультиплексирование с циклическим префиксом). Для линии вверх в передатчиках АТ сети 5G, помимо CP-OFDM, имеется также возможность использовать технологию DFT-S-OFDM (Discrete Fourier Transform – Spread – Orthogonal Frequency Division Multiplexing, ортогональное частотное мультиплексирование с предобработкой на базе дискретного преобразования Фурье) [3].

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЗАЩИТНОГО ОТНОШЕНИЯ

Защитное отношение  $K_3$  для НРП с шириной спектра частотного канала  $\Delta f_n = 10$  МГц, используемой передатчиками оборудования 5G, определим по методике, предложенной в работе [6]. Суть подхода заключается в пересчете значений защитных отношений, полученных для НРП с шириной спектра 10 МГц при известных значениях защитного отношения  $K_3$  для непреднамеренных помех от передатчиков ЦТВ DVB-T2. Согласно данной методике, защитное отношение сигнал/помеха рассчитывается по формуле

$$K_3(\Delta f_p) \cong K_{3\text{ЦТВ}}(\Delta f_p - 1) \text{ при } \Delta f_p > \frac{\Delta f_{\text{упч}} + \Delta f_{\text{п}}}{2}.$$

Данный пересчет справедлив при условии преобладающего влияния помехи и при значительных частотных расстройках из-за проникновения помех по внеполосному каналу приема, что подтверждается исследованиями амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) приемника АДРМ «Тропа-СМД» в лабораторных условиях [6].

Полученные в результате расчетов значения защитного отношения  $K_3$  представлены в табл. 2. Анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований помехозащищенности АДРМ показал, что зависимость значения защитного отношения  $K_3$  от частотной расстройки  $\Delta f_p$  между частотными каналами оборудования 5G и АДРМ является несимметричной относительно нулевой частотной расстройки. Кроме того, защитное отношение  $K_3$  зависит от используемой рабочей частоты АДРМ. Сравнение значений защитного отношения  $K_3$  при частотной расстройке  $\Delta f_p = 8 \dots 15$  МГц для частотных каналов  $f_{c1} = 730$  МГц и  $f_{c2} = 764$  МГц показало, что они различаются незначительно: на 1,5–2,5 дБ. Таким образом, при проведении расчетов ЭМС рассматриваемых РЭС можно использовать значения защитного отношения  $K_3$ , приведенные в табл. 2.

### ОЦЕНКА ДАЛЬНОСТЕЙ ВЛИЯНИЯ ПОМЕХ

Значения дальностей влияния передатчиков БС сети мобильной связи 5G на приемники АДРМ «Тропа-СМД» для приведенных выше ЭМС-характеристик рас-

**Таблица 2**

Защитные отношения  $K_s$  (в дБ) для приемника АДРМ «Тропа-СМД»

Тип НРП	Ширина канала, МГц	Частотный разнос, МГц								
		-15	-10	-8	-5	0	5	8	10	15
LTE*	5	-54,2	-45,3	-32,5	-13,3	6,5	-3,3	-20,7	-37,4	-53,9
ЦТВ*	8	-47,6	-31,6	-21,5	-4,5	5,7	-2,2	-9,4	-25,1	-48
5G	5	-54,2	-45,3	-32,5	-13,3	6,5	-3,3	-20,7	-37,4	-53,9
5G	10	-46,0	-27,9	-15,7	1,9	5,7	2,9	-5,4	-16,3	-45,0

*Примечание.*  $\Delta f_p = f_c - f_n; f_{c1} = 730$  МГц.  
\* Экспериментальные данные.

**Таблица 3**

Дальности влияния помех (в км) от БС на АДРМ «Тропа-СМД»

Ширина канала передатчика 5G, МГц	h, м	Частотная расстройка между РЭС $ \Delta f_p $ , МГц				
		0	5	8	10	15
5	37,5	35	22	9	3	–
	75	45	30	13	4	–
10	37,5	33	22	19	5	–
	75	43	38	26	9	–

смаатриваемых РЭС представлены в табл. 3. Расчеты проведены в соответствии с методиками распространения сигналов, утвержденными Рекомендациями МСЭ-R P.1546-4 [7] для 10% времени  $t$  и 50% мест  $S$ .

При этом допустимые значения  $E_{доп}$  были рассчитаны для случаев влияния БС сетей 5G на АДРМ «Тропа-СМД» по главному и боковому лепесткам диаграммы направленности антенны (ДНА) РЭС ВРНС. Влияние по боковому лепестку ДНА (в вертикальной плоскости) будет проявляться на удалениях передатчиков БС сетей 5G от АДРМ более 10 км. Уровень НРП при этом будет ослаблен примерно на 5–6 дБ. Данный фактор был учтен при составлении табл. 3. Для территориальных разнесов между БС сетей 5G и АДРМ с  $R \leq 10$  км учитывалось влияние НРП по главному лепестку ДНА АДРМ «Тропа-СМД» ( $E_{доп} = 23...24$  дБмкВ/м), а для территориальных разнесов  $R > 10$  км – влияние по боковым лепесткам ДНА ( $E_{доп} = 28...29$  дБмкВ/м).

Анализ рассчитанных значений дальностей влияния НРП  $R_{вл}$  от БС сетей 5G на приемное устройство АДРМ «Тропа-СМД» показал, что на совпадающих частотах эти дальности могут составлять до 33–45 км. Более приемлемые значения  $R_{вл}$  с точки зрения их использования как нормы территориального разнеса характерны для частотных разнесов  $\Delta f_p \geq 10$  МГц между частотами передатчиков БС сетей 5G и приемников АДРМ.

Полученные результаты расчетов говорят о том, что участки диапазона частот 703–723/758–778 МГц достаточно проблематичны для использования из-за влияния помех от БС на АДРМ (случай использования каналов 5 МГц). Проведенные исследования ЭМС показали, что для оставшегося частотного ресурса диапазона 700 МГц

из-за влияния помех от АТ 5G на АДРМ «Тропа-СМД» помеховая ситуация складывается не лучше. Так, полоса частот 723–748 МГц с частотными каналами передатчиков 5G полностью перекрывается диапазоном приемных устройств АДРМ 726–768 МГц. На совпадающих частотах необходимый территориальный разнос между БС сетей 5G и приемниками АДРМ «Тропа-СМД» для исключения влияния АТ будет определяться дальностью действия АТ и дальностью влияния НРП.

Размер зон обслуживания БС сетей 5G в диапазоне 700 МГц следует ожидать в пределах 10–20 км, и эта дальность не меньше дальности действия БС сетей LTE-800, подтвержденной результатами экспериментальных исследований. С учетом дальностей влияния НРП от нескольких передатчиков АТ LTE-800 (с суммарной эффективной излучаемой мощностью, равной 1 Вт) на приемники диспетчерских радиолокаторов (сокращенно ДРЛ) управления воздушным движением, также полученных экспериментальным путем ( $R_{вл} = 9...13$  км), и разности в допустимой напряженности поля ( $E_{ДРЛ} = 17$  дБмкВ/м;  $E_{АДРМ} = 23...28$  дБмкВ/м) следует ожидать максимальные дальности влияния АТ 5G на АДРМ «Тропа-СМД» на совпадающих частотах порядка 3,5–5 км. Исходя из результатов исследований ЭМС, делаем вывод, что общий необходимый территориальный разнос между БС сетей 5G и АДРМ «Тропа-СМД» будет не менее 20 км [6].

Таким образом, можно показать, что задачу обеспечения ЭМС за счет введения только территориального разнеса между БС сетей 5G и АДРМ «Тропа-СМД» решить практически сложно. Особенно трудно это реализовать в условиях размещения БС сетей мобильной связи 5G

**Таблица 4**

Защитное отношение  $K_3$  (в дБ) при использовании фильтра на входе радиоприемника АДРМ «Тропа-СМД»

Источник НРП	Ширина канала, МГц	Наличие фильтра	Частотный разнос $ \Delta f_p $ , МГц					
			0	5	8	10	12	15
5G	5	Без фильтра	6,5	-(3,3...13,3)	-(20,7...32,5)	-(37,4...45,3)	-(50...53)	-(53,9...54,2)
		С фильтром	6,3	-27,8	-60,2	-60	-60	-60

в областных городах, поскольку аэродромы, где могут (или должны) размещаться АДРМ, находятся внутри или вблизи таких населенных пунктов.

Решить задачу обеспечения ЭМС рассматриваемых РЭС за счет частотного разноса на данном этапе тоже непросто. В полосе частот 703–748/758–803 МГц нет ни одного дуплекса по 5 МГц, не совпадающего с диапазоном частот АДРМ «Тропа-СМД». Проблема еще и в том, что в настоящее время отсутствует утвержденный частотно-территориальный план для АДРМ. На практике необходимо будет проводить оценку ЭМС РЭС сетей связи 5G с АДРМ при условии использования на аэродроме любой частоты из всего диапазона, т.е. частотная регламентация не применима.

### ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО МЕРАМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ

Для решения проблемы ЭМС РЭС сетей 5G и АДРМ целесообразно разработать ряд мер по обеспечению ЭМС, чтобы использовать их при внедрении сетей 5G в диапазоне 700 МГц.

В первую очередь рекомендуется провести следующие организационные мероприятия по снижению дальностей влияния НРП:

- пространственная регламентация излучений БС сетей 5G (запрет излучений в определенных секторах) или использование АФУ с вертикальной поляризацией;
- ограничение зон обслуживания АТ сетей 5G, основанное на опыте построения сетей LTE-800 (программно-алгоритмический метод).

Для упрощения задачи частотного регламентирования следует сформировать радионавигационное поле для АДРМ «Тропа-СМД». При этом необходимо доработать радиоприемник АДРМ, так как без улучшения АЧХ приемного устройства АДРМ существующего частотного ресурса 726–768 МГц будет недостаточно для формирования радионавигационного поля всей аэродромной сети РФ. Это обусловлено высокой вероятностью возникновения межсистемных помех между близко расположенными АДРМ «Тропа-СМД». Кроме того, улучшение характеристик двухсигнальной избирательности приемных устройств АДРМ повлияет на условия обеспечения ЭМС с АТ и БС сетей 5G.

Кроме того, следует еще раз подчеркнуть, что *решать*

*задачу эффективного использования радиочастотного спектра в сетях 5G станет проще, если весь ресурс (хотя бы в пределах областей) будет принадлежать одному инфраструктурному оператору (лучше – государственно-му). Это облегчит согласование использования частотных каналов сети 5G в диапазоне 700 МГц с органами военного управления; с меньшими административными издержками будут устраняться НРП; планирование сетей 5G вблизи объектов аэродрома, даже в условиях существующей неопределенности по радионавигационному полю, упростится.*

Таким образом, при обеспечении ЭМС сетей 5G на первый план выходят два фактора:

- использование одним инфраструктурным оператором 5G диапазона 700 МГц позволит задействовать все ресурсные возможности частотного шеринга этого диапазона с АДРМ «Тропа-СМД»;
- радиоприемное устройство АДРМ «Тропа-СМД» должно быть доработано с целью улучшения ЭМС-характеристик.

Говоря о доработке радиоприемного устройства АДРМ «Тропа-СМД», целесообразно рассмотреть не только находящиеся в эксплуатации, но и серийно выпускаемые АДРМ «Тропа-СМД». Эффективность такого шага не подлежит сомнению, хотя реализовать его будет затратно по времени, сложно в технологическом и техническом отношении.

Другой подход к обеспечению ЭМС предусматривает установку дополнительного входного фильтра (изготавливается серия фильтров под каждый номинал частоты АДРМ) на радиомаяки после запуска их в эксплуатацию. В ряде регионов России уже имеется практический опыт реализации такого подхода к обеспечению ЭМС передатчиков национальной сети ЦТВ DVB-T2 и АДРМ «Тропа-СМД».

В качестве примера в табл. 4 приведены значения защитного отношения  $K_3$  при использовании дополнительного фильтра (макета) для сравнения с защитными отношениями на входе приемного устройства АДРМ при работе без фильтра (см. табл. 2). Эксперимент по измерению защитных отношений сигнал/помеха проведен совместно с разработчиком АДРМ «Тропа-СМД» – ВНИИРА.

Из табл. 4 видно, что при частотных разносах  $\Delta f_p$  более 8 МГц между передатчиками БС сетей 5G и приемника-

ми АДРМ «Тропа-СМД» влияние НРП от передатчиков БС сетей 5G практически будет отсутствовать при условии введения ограничений на размещения БС сетей 5G вблизи аэродромов или даже на территории аэродромов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ проблем ЭМС РЭС мобильной связи пятого поколения с РЭС воздушной радионавигации в диапазоне 703–748/758–803 МГц показал, что без проведения организационных и организационно-технических мероприятий использование данного диапазона частот на значительной территории РФ будет практически невозможно.

Основные направления по обеспечению совместного использования спектра в диапазоне частот 700 МГц заключаются в следующем:

- предоставление частотного ресурса единому ин-

фраструктурному оператору 5G. Это позволит использовать все ресурсные возможности частотного шеринга диапазона 700 МГц для АДРМ «Тропа-СМД». Дробление частотного ресурса диапазона 700 МГц для нескольких операторов (по аналогии с диапазоном 800 МГц) неприемлемо;

- доработка радиоприемного устройства АДРМ «Тропа-СМД». Это повысит его избирательность к внеполосным помехам;
- разработка проекта частотно-территориального плана для маяков «Тропа-СМД» с учетом возможного влияния непреднамеренных помех со стороны сетей мобильной связи 5G.

Перечень организационно-технических мероприятий для внедрения сетей 5G в диапазоне 700 МГц целесообразно включить в План конверсии РЧС, разрабатываемый Минкомсвязи РФ совместно с Минобороны РФ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 3GPP TS 38 104. NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 15).  
 2. 3GPP TS 38 101. NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 15).  
 3. Тихвинский, В.О. Особенности построения и ЭМС-характеристики будущего оборудования сетей мобильной связи 5G //

Электросвязь. – 2018. – № 6. – С. 63-68.

4. Отчет по теме «LTE-10» / ЦНИИ ВВС, Щелково, 2018.

5. Высочин, В.П. Методика учета суммарной НРП, создаваемой базовыми станциями стандарта LTE наземным радиомаякам РСБН // Материалы XVI конференции НРА. – 2017.

6. Благостов, О.Ю. и др. Оценка ЭМС

РЭС ВВС и РЭС стандарта LTE-700 // Материалы XVI конференции НРА. – 2017.

7. Рекомендация МСЭ-R P.1546-4. Метод прогнозирования для трасс связи «пункта с зоной» для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 3000 МГц (10/2009).

*Получено 13.06.19*