

АНАЛИЗ ПОМЕХОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЕРЕДАТЧИКОВ ФИКСИРОВАННОЙ СЛУЖБЫ С ПРИЕМНИКАМИ СПУТНИКОВОЙ ГРУППИРОВКИ «СФЕРА»

*Л.А. Плотников, Московский технический университет связи и информатики,
leonidplotnikovv@yandex.ru.*

УДК 621.396.7

Аннотация. Обеспечение электромагнитной совместимости в различных условиях совместного использования частот относится к одной из наиболее актуальных тем на сегодняшний день по причинам увеличения общего количества электронных средств. Для понимания тонкостей работы спутниковой группировки «Сфера» необходимо учесть все факторы распространения радиоволн в пространстве. Учитывая широкое распространение и растущее развитие фиксированной службы в полосе 17,7-19,4 ГГц, соседняя полоса 19,4-20,2 ГГц распределена исключительно для спутниковых служб. До сих пор уделялось первоочередное внимание спутниковым операторам при широкомасштабном развертывании земных станций. Однако с развитием спутниковых систем с высокой пропускной способностью в *Ka*-диапазоне и асимметрией трафика, которая требует большего спектра нисходящей линии связи, чем восходящей линии связи, необходимо учесть условия, при которых земные станции фиксированной спутниковой службы будут работать в приемлемых условиях помех фиксированной службы в полосе 17,4-20,2 ГГц.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость; электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств фиксированной спутниковой службы; радиоэлектронные средства фиксированной службы; диаграмма направленности радиоэлектронного средства; *Ka*-диапазон; *Ki*-диапазон.

ANALYSIS OF INTERFERENCE INTERFERENCE OF FIXED SERVICE TRANSMITTERS WITH SPHERE SATELLITE RECEIVERS

L.A. Plotnikov, Moscow technical university of communications and informatics.

Annotation. Ensuring electromagnetic compatibility in various conditions of frequency sharing is one of the most relevant topics today for reasons of increasing the total number of electronic means. To understand the intricacies of the work of the satellite constellation «Sphere», it is necessary to take into account all the factors of the propagation of radio waves in space. Given the widespread and growing development of fixed-line service in the 17,7-19,4 GHz band, the adjacent 19,4-20,2 GHz band is allocated exclusively for satellite services. Until now, priority has been given to satellite operators in the large-scale deployment of Earth stations. However, with the development of satellite systems with high bandwidth in the *Ka* band and traffic asymmetry, which requires a larger spectrum of the downlink than the uplink, it is necessary to take into account the conditions under which the Earth stations of the fixed satellite service will operate in acceptable conditions of interference of the fixed service in the band 17,4-20,2 GHz.

Keywords: electromagnetic compatibility; electromagnetic compatibility of radio-electronic means of fixed satellite service; radio-electronic means of fixed service; radiation pattern of radio-electronic means; *Ka*-band; *Ki*-band.

Введение

Низкоорбитальные спутниковые системы связи являются информационными системами и требуют специальных мер защиты от возможных радиопомех. Поскольку радиоэлектронные средства (РЭС) спутниковой группировки «Сфера» относятся к аппаратуре, обеспечивающей безопасность и жизнедеятельность людей, к ней предъявляются требования по надежности и безотказной работе.

Такие требования обуславливаются необходимостью всестороннего исследования условий электромагнитной совместимости спутниковой группировки «Сфера» с радиоэлектронными средствами, функционирующими в общих и смежных диапазонах частот. Исследования предполагают рассмотрение как типовых, так и возможных непредвиденных сценариев помех.

Спутниковые системы дают важные преимущества для расширения широкополосного покрытия:

- обеспечение покрытия огромных площадей, несмотря на сложный рельеф местности;
- они надежны и не подвержены многим рискам, которым подвергаются другие сети.

Стремительно растущее использование негеостационарных спутниковых орбит (НГСО) представляет собой прорыв в спутниковых технологиях и потенциал для тех, кто лишен связи в отдаленных районах, чтобы они тоже могли пользоваться преимуществами современных технологий. Возможность установления спутниковых соединений очень важна для авиационного и морского секторов, где используются воздушные и морские суда, которые на своих маршрутах могут быть вне зоны досягаемости наземных сетей. Также возможность установления спутниковых соединений помогает сделать «умное» общество реальностью (дистанционное образование, электронное здравоохранение, электронную логистику, «умную» энергетику и «умное» сельское хозяйство) как в развитых, так и в развивающихся странах, в особенности в сельских и отдаленных районах.

Критерии выбора возможных местоположений земных станций

Процесс оптимизации наземного сегмента является важнейшим вопросом при минимизации затрат и одновременно достижения желаемой скорости передачи данных, зон покрытия и уровня резервирования при создании космической системы.

Наземный сегмент проектируемой спутниковой группировки «Сфера» представлен сетью шлюзовых станций, терминирующих поступающие от космического аппарата (*КА*) и обратно. Абонентские данные позволяют производить маршрутизацию с использованием наземной инфраструктуры глобальных проводных сетей.

Шлюзовая (земная) станция может содержать в своем составе до 20 антенных систем (постов), каждая из которых осуществляет беспроводной сеанс связи с *КА*, находящимся в зоне работы шлюзовой станции. Часть антенных постов осуществляет слежение и сопровождение *КА*, другая часть ориентируется в направлении предположительного появления следующих *КА*, ожидая сеанса связи.

Учитывая многоцелевой характер задачи проектирования спутниковой группировки «Сфера», т.е. наличие большого числа частных показателей, характеризующих качество группировки (надежность, стоимость, быстродействие, доступность продукта и т.д.), обоснованный выбор критериев оптимизации

наземного сегмента представляет собой важную задачу. Основываясь на положительном зарубежном опыте проектирования и запуска, в первом приближении, возможно использование критериев оптимизации наземного сегмента действующих зарубежных систем в Ka-диапазоне.

Критериями выбора из множества возможных местоположений ЗС при проектировании спутниковых группировок могут быть:

- гарантии глобального покрытия – критерий оптимизации, по которому размещение земных станций определено территорией возможного нахождения абонентских терминалов системы (в предельном случае – территория всех континентов);
- отсутствие пространственной «метеокорреляции» – критерий выбора расстояния между ЗС осуществляется, таким образом, чтобы пространственная корреляция погоды была сведена к минимуму, и погодные условия в местах размещения ЗС можно было считать независимыми;
- электромагнитная совместимость земных станций с действующими или планируемыми к развертыванию наземными радиоэлектронными средствами (РЭС);
- транспортная доступность площадок – критерий выбора местоположений земных станций с учетом доступности подключения услуг крупного наземного оператора транспортных сетей.

Критерий глобального покрытия

Создание глобального покрытия с целью обеспечения абонентских терминалов высокоскоростным беспроводным многостанционным доступом – одна из основных задач, решаемых в процессе проектирования спутниковых систем связи.

В основе организации глобального радиочастотного покрытия лежит принцип разделения земной поверхности на ячейки, область внутри которой является номинальной зоной обслуживания *КА*.

Процесс оптимизации выбора мест размещения земных станций напрямую связан с доступностью предоставляемого продукта конечному потребителю. В зависимости от плотности распределения абонентов – спроса на услуги связи – изменяется нагрузка на *КА* по скорости передачи данных в спутниковом канале.

Численное моделирование спроса (количества абонентов) решает задачу определения орбитальной позиции *КА*, охватывающих максимальное количество пользователей. С этой целью для каждой орбитальной высоты генерируется карта с координатной сеткой (например, разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$), с целью определения количества пользователей, попадающих в зону покрытия спутника в данной орбитальной позиции.

Для создания этой карты местонахождения возможных потребителей можно использовать набор данных о плотности мирового населения Центра социально-экономических данных и предложений *NASA (Gridded Population of the World (GPW) v4)*. На рис. 1 приведены данные переписи и прогнозирования населения на 2020 г. в графическом виде с привязкой к карте местности с разрешением 30 угловых секунд [1].

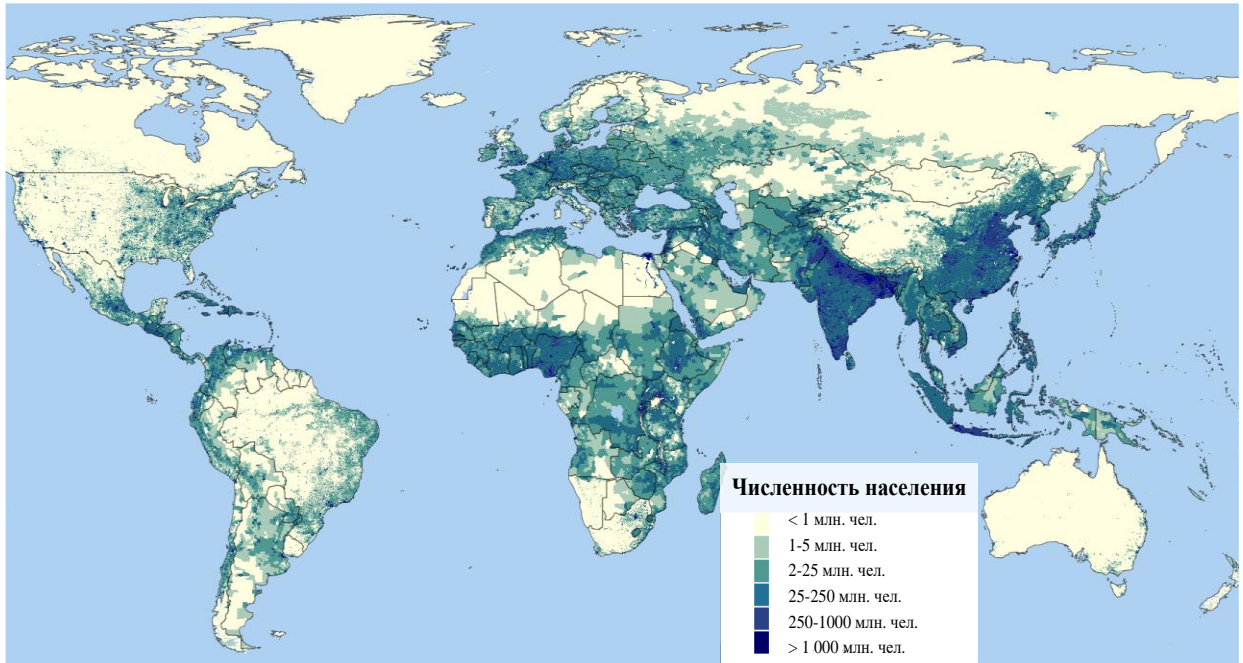


Рисунок 1

В качестве примера, на рис. 2 представлены результаты моделирования [2] количества пользователей в пределах прямой видимости для эталонной группировки (на орбитальной высоте 1200 км, минимальный угол места абонентского терминала равен 45°). Регионы с большим количеством людей отображаются ярким тоном, а регионы с меньшим спросом – в более темных тонах.

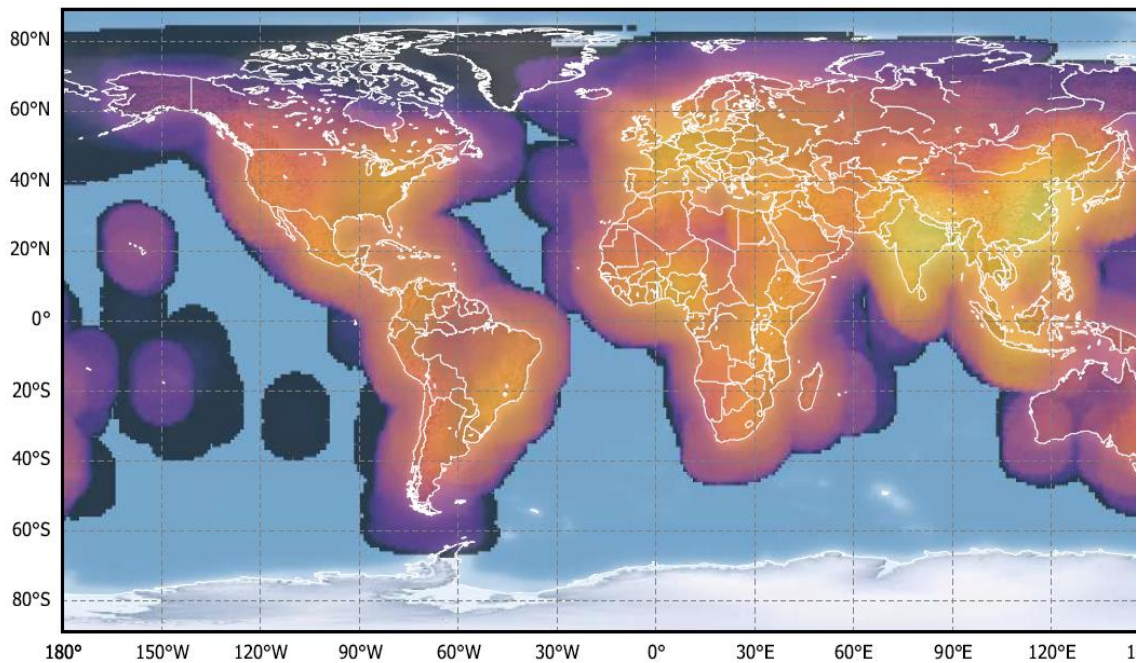


Рисунок 2

Оптимизацию наземного сегмента космической системы проводят с использованием алгоритмов выбора, в том числе и генетических алгоритмов сортировки. Существуют отчеты о положительных достигнутых результатах [2] выполнения оптимизации наземного сегмента с помощью генетического алгоритма

недоминантной сортировки с элитной стратегией (*NSGA-II*) [3] для различных частотных диапазонов, применяемых в космических системах.

Так, например [2], в типовых условиях эксплуатации 45 наземных станций, работающих в Ка-диапазоне, могут обеспечить максимальную среднюю скорость передачи данных в системе 29,2 Гбит/с. Результаты моделирования значений средней скорости передачи данных в системе при различном количестве земных станций представлены на рис. 3. Это моделирование показало, что дальнейшее наращивание объема наземного сегмента космической системы Ка-диапазона не способно привести к повышению порогового значения средней скорости передачи данных. Но при этом система 45 наземных станций в Ка-диапазоне способна обеспечить покрытие 85% требуемой территории с точки зрения средней скорости передачи данных в системе.

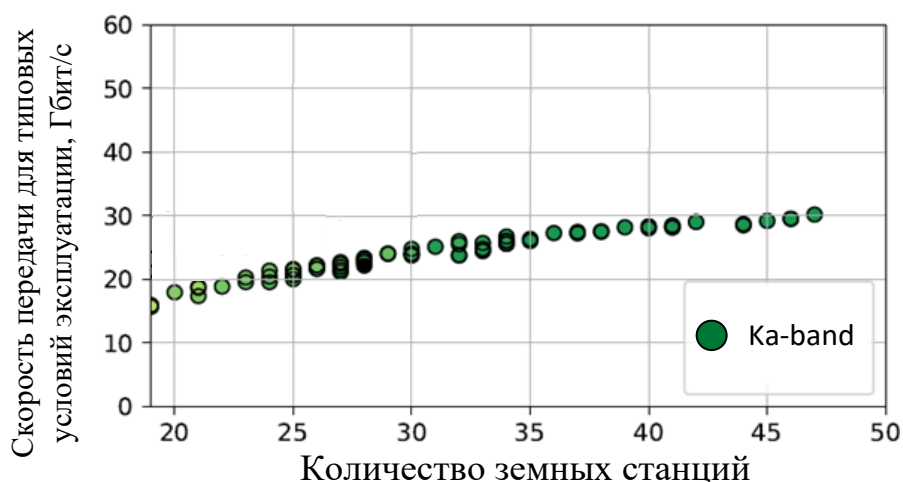


Рисунок 3

Критерий отсутствия пространственной метеокорреляции

Атмосферное затухание – это главный внешний фактор, влияющий на работу космических линий связи. На частотах Ка-диапазона его эффекты вызывают перебои в работе линий связи на весьма незначительные периоды времени – уровень вносимых затуханий составляет несколько десятых дБ. Для смягчения последствий атмосферного влияния необходимо помимо использования сложных типов модуляций и помехоустойчивого кодирования сигналов, использовать территориальное разнесение земных станций системы.

Для каждого КА должно быть доступно несколько наземных станций в пределах прямой видимости. Таким образом, если погодные условия вызывают сбой связи на одной конкретной радиолинии, то данные все равно могут передаваться через радиолинии с другими земными станциями.

Атмосферное затухание для каждой полосы частот вычисляется с использованием руководящих указаний, приведенных в Рекомендации МСЭ-R 618-12 [4], которая учитывает поглощение в атмосферных газах; поглощение, рассеяние и деполяризация за счет гидрометеоров (капель воды и частиц льда в осадках, облаках и т.д.). График частотной зависимости атмосферных потерь представлен на рис. 4. В частности, рекомендации *ITU-R P.676-10* [5] и *ITU-R P.840-6* [6] используются для вычисления ослабления в газах и облаках соответственно, а карты в рекомендациях *ITU-R P.837-5* [7], *ITU-R P.838-3* [8] и *МСЭ-R P.839-4* [9]

используются для оценки интенсивности дождя, удельного ослабления в дожде и высоты дождя соответственно.

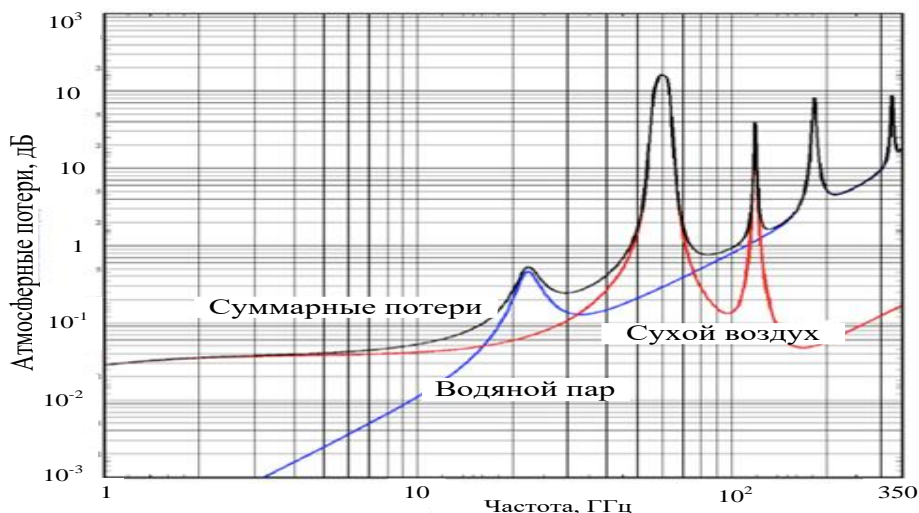


Рисунок 4

Метод, описанный в *ITU-P R.618-12* для вычисления ослабления в дожде, действителен только для процентов времени меньше 5%. Чтобы преодолеть это ограничение необходимо использовать метод, описанный в рекомендации *ITU-R P.837-5*. На рис. 5 приведены типовые кривые значений атмосферного затухания для различных процентов времени при разных углах места земной станции.

Коэффициент корреляции метеоусловий двух наземных станций в пределах прямой видимости KA может быть определен в соответствии с моделью, приведенной в Рекомендации МСЭ-R P.618-12:

$$p = 0,59e^{-\frac{d}{31}} + 0,41e^{-\frac{d}{800}}$$

где: $d = L_s \cos \theta$ – горизонтальная проекция длины наклонной трассы, км.

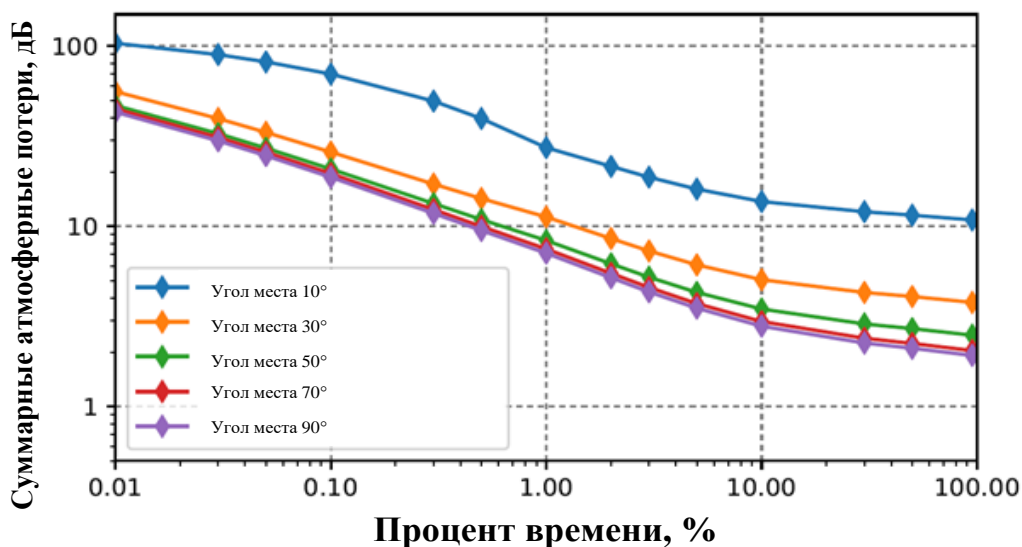


Рисунок 5

L_s – длина наклонной трассы для углов места, превышающих 5° , км:

$$L_s = \frac{(h_R - h_S)}{\sin \theta}$$

где: h_S – высота земной станции над средним уровнем моря, км;
 h_R – высота слоя дождя, км, в соответствии с Рекомендацией МСЭ-Р P.839.

В частности, в любом из рассматриваемых наземных сегментов, существующих низкоорбитальных космических систем с минимальным углом места 45° расстояние между наземными станциями должно быть не менее 2000 км [2], что, соответствует коэффициенту корреляции менее 3% (рис. 6).

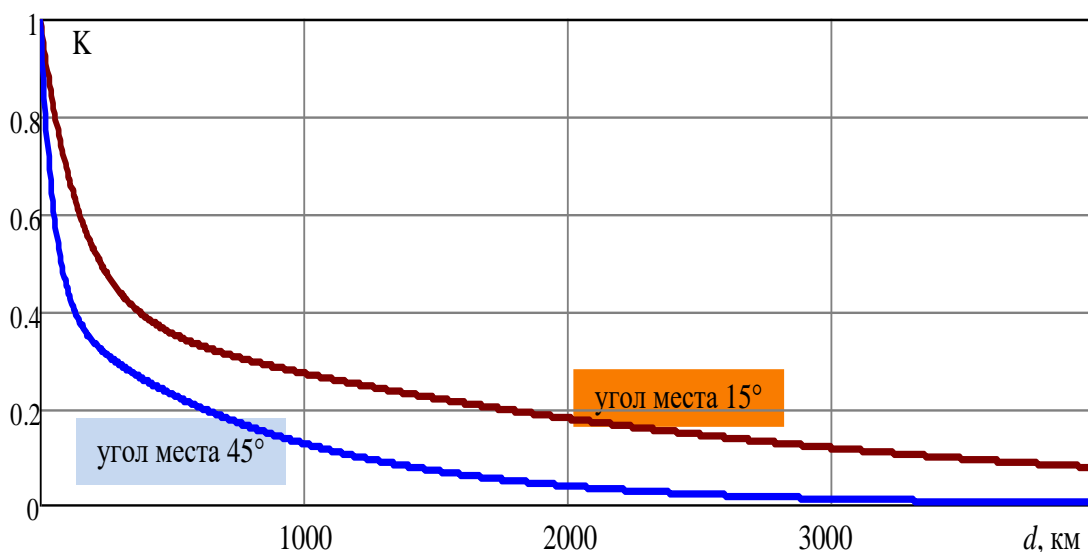


Рисунок 6

Для минимального угла места земной станции 15° в целях снижения метеокорреляции расстояние между ними необходимо увеличить до 3000 км, при этом коэффициент корреляции не превысит 10 %.

Таким образом, атмосферное ослабление необходимо учитывать при расчетах бюджета радиолиний связи КА с земными станциями. С целью уменьшения корреляция атмосферного влияния между соседними земными станциями наземного сегмента рекомендовано территориальное разнесение их на расстояние не менее 3000 км.

Критерий транспортной доступности

Необходимость обеспечения работы спутниковой группировки «Сфера» предъявляет высокие требования по скорости обмена информацией между узлами системы. Необходимым критерием размещения земной станции становится доступность подключения услуг наземного оператора магистральных транспортных сетей.

Магистральные транспортные сети – важная составляющая инфраструктуры связи и технологическая база для оказания комплекса услуг связи. Передача трафика по магистральным сетям – крупный сегмент телекоммуникационного бизнеса. Благодаря географическому расположению России, наземные магистральные сети отечественных операторов связи являются альтернативой межконтинентальным подводным кабельным системам при

передаче трафика из Европы в Азию. По данным операторов связи, в 2019 г. объем трафика, передаваемого через территорию России по разным маршрутам из Китая в Европу, составил рекордные 1,5 Тбит/с, превысив показатель предшествующего года (менее 1 Тбит/с).

На рис. 7 представлена карта магистральных сетей связи в РФ, на которой в схематичном виде изображены магистральные транспортные сети крупнейших российских операторов связи. В табл. 1 приведены основные технические характеристики сетей (протяженность магистральных сетей, поставщики оборудования, зарубежные операторы, с сетями которых имеются физические трансграничные стыки и др.).

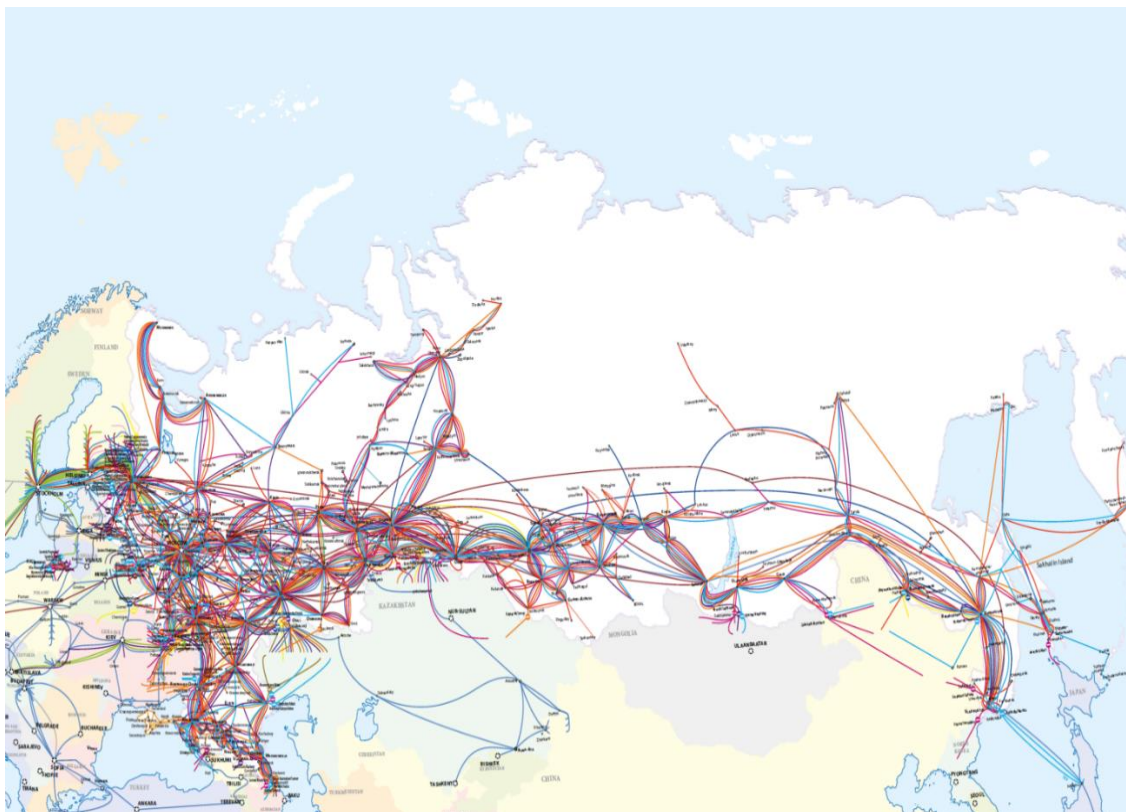


Рисунок 7

Таблица 1.

Оператор	Ростелеком, ПАО	Мобильные ТелеСистемы, ПАО	ВымпелКом, ПАО	МегаФон, ПАО	Компания ТрансТелеКом, АО
Торговая марка		МТС	Билайн	МегаФон	ТТК
Протяженность магистральной сети (тыс. км)	500.00	248.00	190.80	140.40	78.00
Производители передающего оборудования	<i>Coriant, ECI Telecom, Huawei, Infinera, NEC, Nokia Networks, T8</i>	<i>Alcatel-Lucent, Cisco, ECI Telecom, Huawei, Juniper</i>	<i>Alcatel-Lucent, Ciena, Cisco, ECI Telecom, Huawei, Juniper</i>	<i>Cisco, Huawei, Juniper</i>	<i>Alcatel-Lucent, Ciena, Cisco, ECI Telecom, Huawei, ZTE</i>

Анализ загрузки полос радиочастот, планируемых к использованию земных станций

В соответствии с исходными данными в разрабатываемой спутниковой группировке «Сфера» планируется терминирование абонентских данных опорной сетью посредством организации радиолинии связи.

Выделение полос радиочастот осуществляется в соответствии с требованиями, условиями распределения и использования полос радиочастот, которые определяются Таблицей распределения полос частот между радиослужбами Российской Федерации (Постановление Правительства РФ от 18.09.2019 г. № 1203-47), а также Международным регламентом радиосвязи (RR) на международном уровне. В таб. 2 приведено распределение полос радиочастот. Кадиапазона между радиослужбами в соответствии с нормативными документами.

Выбранные для функционирования ЗС полосы радиочастот в рамках международного и национального распределения выделены фиксированной спутниковой службе на первичной основе. Категория полос радиочастот: «СИ» – полосы радиочастот, предназначенные для совместного пользования радиоэлектронными средствами любого назначения.

Таким образом, на отдельных участках анализируемой полосы радиочастот 17,3-20,2 МГц могут функционировать на первичной основе радиоэлектронные средства следующих радиослужб:

- радиолокационная;
- фиксированная;
- фиксированная спутниковая;
- подвижная спутниковая.

Таблица 2.

Полоса частот	Радиорегламент (район 1), полоса радиочастот радиослужбы	Распределение полос радиочастот между радиослужбами в Российской Федерации	Радиорегламент (район 2), полоса радиочастот радиослужбы	Радиорегламент (район 3), полоса радиочастот радиослужбы
17,3 - 17,7 ГГц	Фиксированная спутниковая («земля-космос») 5.516, «космос-земля», 5.516а, 5.516в, радиолокационная 5.514	Радиолокационная, фиксированная спутниковая («космос-земля», «земля-космос») 221, 324, 325, 326	Фиксированная спутниковая («земля-космос») 5.516, радиовещательная спутниковая, радиолокационная 5.514, 5.515	Фиксированная спутниковая («земля-космос»), 5.516 радиолокационная 5.514
17,7-18,1 ГГц	Подвижная, фиксированная, фиксированная спутниковая («космос-земля»), 5.484а, («земля-космос») 5.516	Фиксированная, фиксированная спутниковая («космос-земля», «земля-космос») 200, 210, 221, 301, 324, 327	Фиксированная, фиксированная спутниковая («космос-земля»), 5.517, («земля-космос») 5.516 радиовещательная спутниковая,	Фиксированная, фиксированная спутниковая («космос-земля»), 5.484а, («земля-космос») 5.516 подвижная

Полоса частот	Радиорегламент (район 1), полоса радиочастот радиослужбы	Распределение полос радиочастот между радиослужбами в Российской Федерации	Радиорегламент (район 2), полоса радиочастот радиослужбы	Радиорегламент (район 3), полоса радиочастот радиослужбы
			подвижная 5.515, 5.519	
18,1 - 18,4 ГГц	Подвижная, фиксированная, фиксированная спутниковая («космос-земля»), 5.484а, 5.516в, («земля-космос»), 5.520 5.519,5.521	Фиксированная, фиксированная спутниковая («космос-земля», «земля-космос») 200, 210, 301, 327, 328,329	Подвижная, фиксированная, фиксированная спутниковая («космос-земля»), 5.484а, 5.516в, («земля-космос»), 5.520 5.519,5.521	
18,4 - 18,6 ГГц	Подвижная, фиксированная, фиксированная спутниковая («космос-земля») 5.484а, 5.516	Фиксированная, фиксированная спутниковая («космос-земля») 210, 301, 324, 327	Подвижная, фиксированная, фиксированная спутниковая («космос-земля») 5.484а, 5.516	
18,8- 19,3 ГГц	Фиксированная, фиксированная спутниковая («космос-земля») 5.516в, 5.523а подвижная	Фиксированная, фиксированная спутниковая (космос-земля) 200, 210, 327	Фиксированная, фиксированная спутниковая («космос-земля») 5.516в, 5.523а подвижная	
19,3- 19,7 ГГц	Фиксированная, фиксированная спутниковая («космос-земля», «земля-космос») 5.523б, 5.523с, 5.523д, 5.523е подвижная	Фиксированная, фиксированная спутниковая («космос-земля», «земля-космос») 200, 210, 327, 331	Фиксированная, фиксированная спутниковая («космос-земля», «земля-космос») 5.523б, 5.523с, 5.523д, 5.523е подвижная,	
19,7 - 20,1 ГГц	Фиксированная спутниковая («космос-земля»), 5.484а, 5.484в, 5.527а, подвижная спутниковая («космос-земля») 5.524	Фиксированная спутниковая («космос-земля»), подвижная спутниковая («космос-земля») 301, 326	Фиксированная спутниковая («космос-земля»), 5.484а, 5.484в, 5.527а, подвижная спутниковая («космос-земля») 5.524, 5.525, 5.526, 5.527, 5.528, 5.529	Фиксированная спутниковая («космос-земля»), 5.484а, 5.484в, 5.527а, подвижная спутниковая («космос-земля») 5.524

Полоса частот	Радиорегламент (район 1), полоса радиочастот радиослужбы	Распределение полос радиочастот между радиослужбами в Российской Федерации	Радиорегламент (район 2), полоса радиочастот радиослужбы	Радиорегламент (район 3), полоса радиочастот радиослужбы
20,1 - 20,2 ГГц	Фиксированная спутниковая («космос-земля»), 5.484а, 5.484в, 5.516в, 5.527а подвижная спутниковая («космос-земля») 5.524, 5.525, 5.526, 5.527, 5.528	Подвижная спутниковая («космос-земля»), фиксированная спутниковая («космос-земля») 301, 326, 332, 333	Фиксированная спутниковая («космос-земля»), 5.484а, 5.484в, 5.516в, 5.527а подвижная спутниковая («космос-земля») 5.524, 5.525, 5.526, 5.527, 5.528	

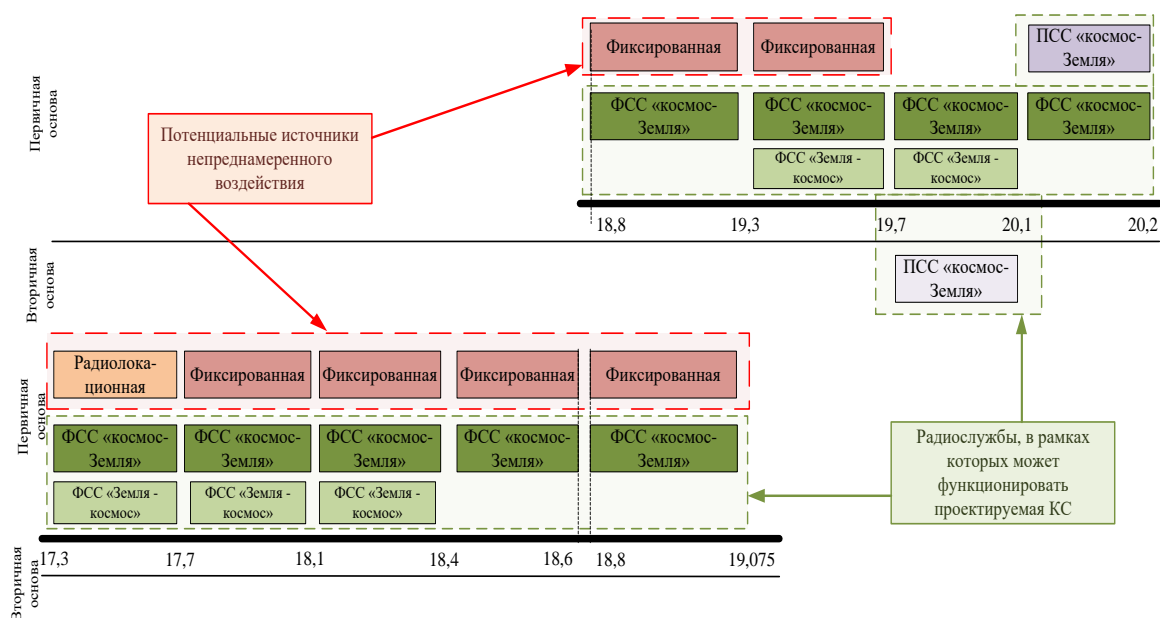


Рисунок 8

По данным ЕТС [10] и ФАИС [11] на территории РФ РЭС радиолокационной службы зарегистрированы в диапазоне радиочастот от 16,6 до 17,1 ГГц. Зарегистрированные РЭС радиолокационной службы в диапазоне радиочастот от 17,3 до 17,7 ГГц отсутствуют.

Радиоэлектронные средства фиксированной службы в диапазоне радиочастот от 17,7 до 19,7 ГГц представлены радиорелейными станциями (РРС). На территории РФ зарегистрировано более 100 000 средств. На рис. 8 приведено распределение полосы 17,3-20,2 ГГц между радиослужбами на территории РФ. Наиболее загруженной полосой, с точки зрения зарегистрированных РРС, является полоса радиочастот 17,96-19,56 ГГц.

На рис. 9 представлена диаграмма распределения количества зарегистрированных РРС на территории РФ по регионам. Наибольшее количество РРС зарегистрировано на территориях Московской области и Краснодарского края.

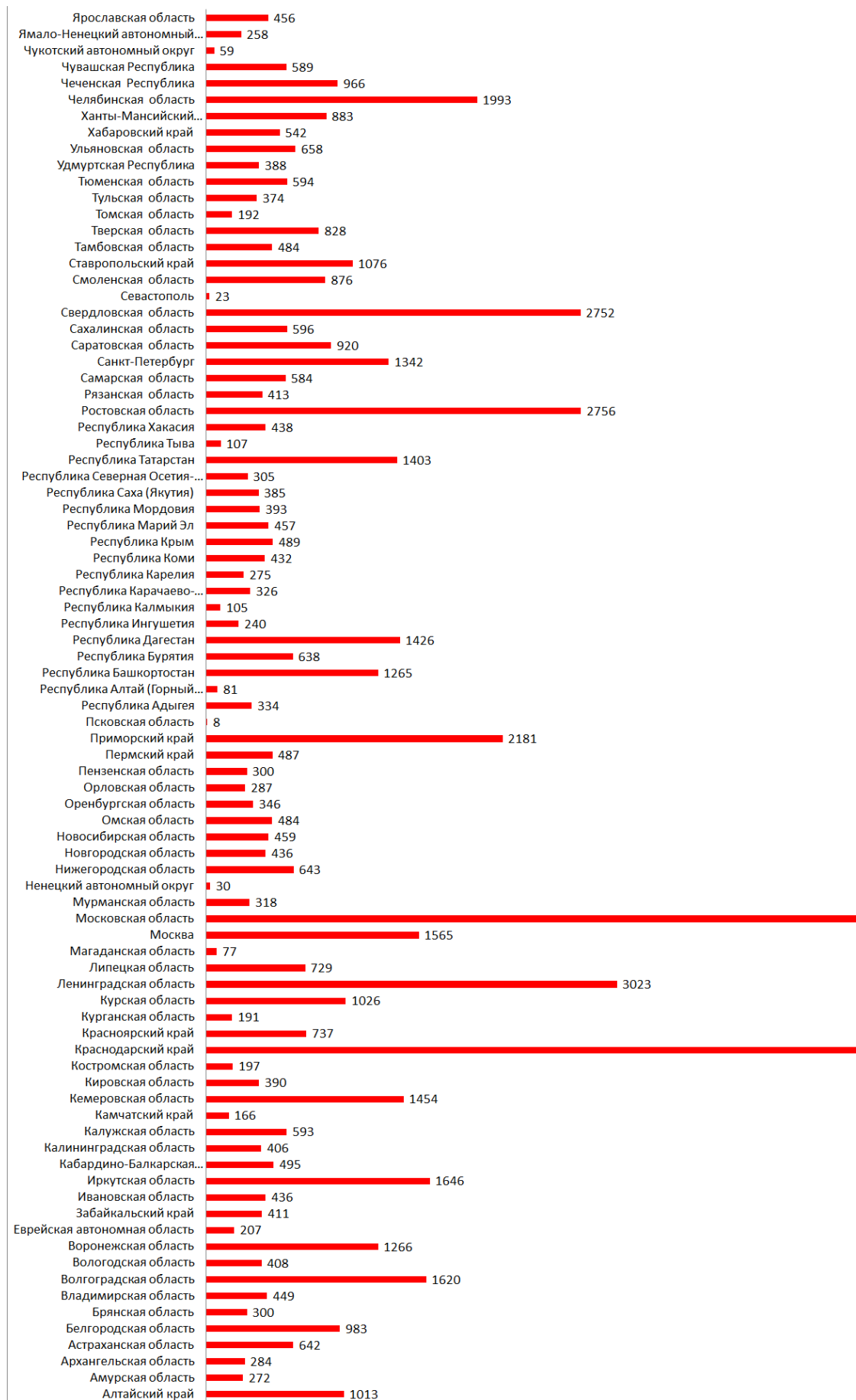


Рисунок 9

На рис. 10 приведено размещение зарегистрированных РРС на карте территории РФ.

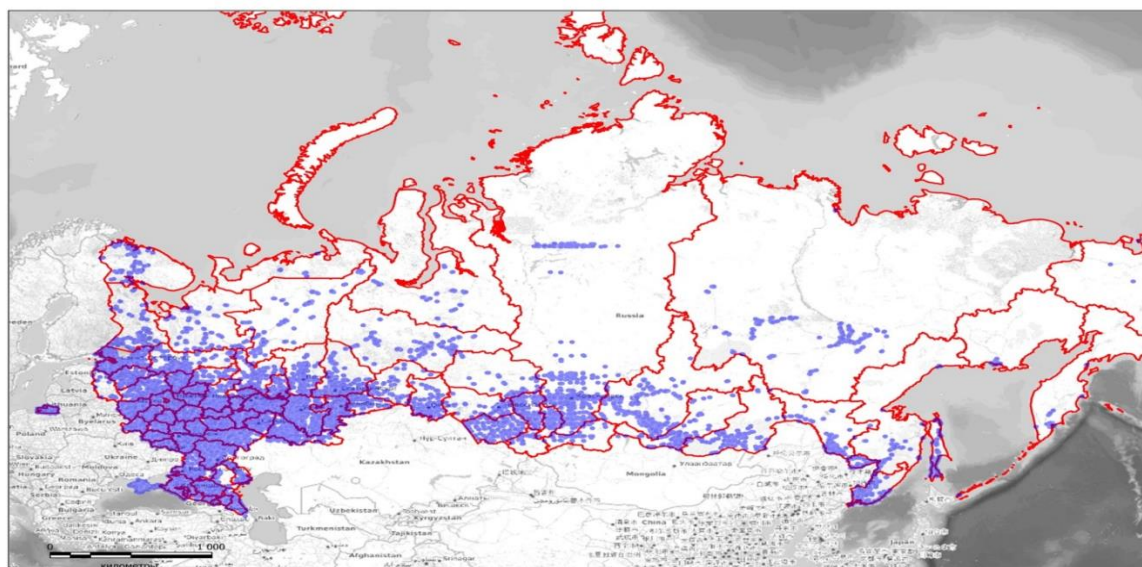


Рисунок 10

В соответствии с национальным распределением полос радиочастот средства фиксированной радиослужбы, представленные радиорелейными станциями, являются РЭС-источниками непреднамеренного помехового воздействия на земные станции.

Основные радиотехнические параметры радиорелейной линии Ка-диапазона (табл. 3) определены Решением ГКРЧ от 25.06.2007 г. № 07-21-02-001 «О выделении полосы радиочастот 17,7-19,7 ГГц для радиорелейных станций прямой видимости». Основные параметры РРС Ка-диапазона представлены в табл. 3.

Таблица 3.

Наименование параметра	Величина параметра	Единица измерения
Полоса радиочастот	17,7-19,7 ГГц	ГГц
Максимальная мощность передатчика РРС	0,5 Вт	Вт
Ширина диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости	3,8	Град

Частотные планы РРС представлены в рекомендации МСЭ-R F.595 «Планы размещения частот радиостолов для фиксированных беспроводных систем, действующих в диапазоне частот 17,7-19,7 ГГц».

Анализ международного распределения в Районах 2 и 3 полосы 17,3 – 20,2 ГГц показал, что дополнительно к службам, с которыми необходима разработка условий совместного функционирования при развертывании земных станций фиксированной спутниковой службы на территории РФ, добавляется подвижная служба в полосе 17,7-19,7 ГГц и радиовещательная в полосе частот 17,3-18,1 ГГц в Районе 2.

Оценка электромагнитной совместимости РЭС фиксированной службы и РЭС земной станции

Оценка электромагнитной совместимости (ЭМС) наземных радиоэлектронных средств в группировке представляет собой решение комплексной задачи, включающей в себя выявление источников непреднамеренного помехового воздействия (РЭС-источников), определение возможных сценариев помехового воздействия РЭС-источника на РЭС-рецептор, расчет уровней непреднамеренных помех в соответствии с выбранными сценариями, заключение о приемлемости или недопустимости оцениваемого помехового влияния РЭС-источника на РЭС-рецептор.

Процесс решения задачи по выявлению источников непреднамеренного помехового воздействия заключается в проведении анализа национального и международного распределения полос радиочастот между радиослужбами с формированием перечня типовых радиоэлектронных средств радиослужб, функционирующих в рабочем диапазоне частот РЭС-рецептора. Для такой оценки ЭМС основные параметры РЭС ЗС приведены в табл. 4.

Таблица 4.

Параметр	Значение параметра	
Диапазон частот	K_a – диапазон	
Высота орбиты K_A [км]	500 км	900 км
Угол места [град]	15	
Максимальная дальность [км]	1300	1873
Частота [МГц]	18150 (17400 – 18900 МГц)	
Коэффициент усиления передающей антенны [дБ]	54,5	
ЭИИМ [дБВт]	56,4	60,0
Потери в свободном пространстве [дБ]	181,5	184,7
Потери в атмосфере [дБ]	9,0	
Коэффициент усиления приемной антенны ЗС [дБ]	37,8	
Пороговая чувствительность приемника [дБВт]	-123,1	

На начальном этапе оценки ЭМС РЭС в группировке проводится частотный анализ ЭМС с целью выявления потенциально несовместимых РЭС группировки, а также возможные каналы проникновения радиопомех. Частотный анализ ЭМС РЭС-источником (РЭС фиксированной службы) с РЭС-рецептором (РЭС ЗС) показал их потенциальную несовместимость, учитывая, полное перекрытие рабочей полосы радиочастот РЭС ФС 17,7-19,7 ГГц с полосой частот основного канала приема ЗС 17,4-20,2 ГГц.

На этапе энергетического анализа ЭМС определяется основной энергетический показатель ΔI (дБ) ЭМС РЭС:

$$\Delta I = I - I_t, \quad (1)$$

где: I – мощность непреднамеренной помехи, приведенная ко входу приемника ЗС, дБВт;

I_t – величина допустимой мощности помехи на входе приемника ЗС (соответствует уровню реальной чувствительности), дБВт, определяемая следующим выражением (в соответствии с *ITU-R SF 1006*):

$$I_t = 10 \cdot \lg(kTB) + Q - W = -123,1 \text{ дБВт/МГц}, \quad (2)$$

где: k – постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

T – шумовая температура приемника, равная 650 К;

Q – защитное отношение приемника к помехе, равное отношению сигнал/(шум+помеха): $S / (I + N) = 17,33$ дБ;

B – эталонная полоса частот, равная 1 МГц (табл. 1 рекомендации *ITU-R SF.1006*);

W – коэффициент эквивалентности теплового шума, равный 0 дБ (табл. 1 Рекомендации *ITU-R SF.1006*) [15].

Показатель обеспечения ЭМС РЭС показывает, на сколько децибел уровень непреднамеренной радиопомехи, создаваемой РЭС окружающей группировки, превышает реальную чувствительность приемника ЗС.

В случае наличия непреднамеренного воздействия со стороны РЭС окружающей группировки на ЗС, невыполнение условия $\Delta I < 0$ говорит о том, что ЗС не сможет выполнять свои задачи с заданным качеством.

Уровень мощности непреднамеренной помехи в приемном тракте РЭС ЗС в соответствии с концепцией потерь передачи для радиолиний (рекомендация МСЭ R-341) определяется следующим выражением:

$$I = P_t - \eta_r - L(d) - \eta_r, \quad (3)$$

где: P_t – выходная мощность передатчика РЭС-источника на центральной частоте рабочего диапазона приведенная к 1 МГц, дБВт;

η_r – затухание в антенно-фидерном тракте передатчика РЭС-источника, 1 дБ;

η_r – затухание в антенно-фидерном тракте приемника ЗС, 1 дБ;

$L(d)$ – потери передачи при распространении радиоволн на расстоянии d между передающей антенной РЭС-источника и приемной антенной ЗС, дБ:

$$L(d) = L_b(d) - G_t(\varphi_r) - G_r(\varphi_t), \quad (4)$$

где: $G_t(\varphi_r)$ – коэффициент усиления передающей антенны РЭС-источника в направлении на ЗС, дБ;

$G_r(\varphi_t)$ – коэффициент усиления антенны ЗС в направлении на РЭС-источник излучения, дБ;

$L_b(d)$ – основные потери передачи, определяемые рекомендацией *ITU-R P.452-15* и выражающиеся формулой:

$$L_b(d) = 92,5 + 20 \cdot \lg(d) + 20 \cdot \lg(f) + L_d(p) + A_g + A_h, \quad (5)$$

где: d – расстояние между антеннами ЗС и РЭС-источника излучения, км;

f – частота моделирования, МГц;

$L_d(p)$ – дифракционные потери, не превышаемые для p процента времени, дБ;

A_g – общее поглощение в атмосферных газах, дБ;

$$A_g = (\gamma_0 + \gamma_w(\rho)) \cdot d, \quad (6)$$

где: γ_0 – значение погонного ослабления в сухом воздухе;
 γ_w – значение погонного ослабления в парах воды;
 ρ – плотность паров воды (по умолчанию равная 3 г/м^3);
 A_h – дополнительные потери вследствие защиты от местных отражающих предметов описываются выражением:

$$A_h = 10,25 \cdot F_{fc} \cdot e^{-d_k} (1 - \text{tg}(6(\frac{h}{h_a} - 0,625))) - 0,33, \quad (7)$$

где: $F_{fc} = 0,25 + 0,375 \cdot (1 + \text{tg}(7,5(f - 0,5)))$ – параметр расчета;
 d_k – расстояние от номинального местоположения отражающего предмета до антенны, км;
 h – высота антенны ЗС над местным уровнем земли, 20 м;
 h_a – номинальная высота отражающего предмета над местным уровнем земли, м.

Вычисление дифракционных потерь $L_d(p)$ с учетом модели сферической Земли выполняется в соответствии с рекомендацией *ITU-R P.526*.

Выбор значений $G_r(\varphi_t)$ $G_t(\varphi_r)$ определяет взаимную ориентацию антенн РЭС – выбор сценария помехового воздействия. Возможны следующие сочетания, характеризующие ориентацию антенн РЭС:

Г – Г – влияние излучения РЭС друг на друга при диаграмме направленности антенны РЭС, направленными главными лепестками навстречу друг другу;

Г – Б – влияние главного лепестка диаграммы направленности антенны РЭС-источника на боковой лепесток диаграммы направленности антенны ЗС;

Б – Г – влияние бокового лепестка диаграммы направленности антенны РЭС-источника на главный лепесток диаграммы направленности антенны ЗС;

Б – Б – влияние боковых лепестков диаграммы направленности антенны РЭС друг на друга.

При моделировании значения $G_r(\varphi_t)$ $G_t(\varphi_r)$ определяются по диаграммам направленности антенн. Рекомендацией *ITU-R F.699* определены основные параметры диаграммы направленности антенны (ДНА) РЭС, представленные на рис. 11.

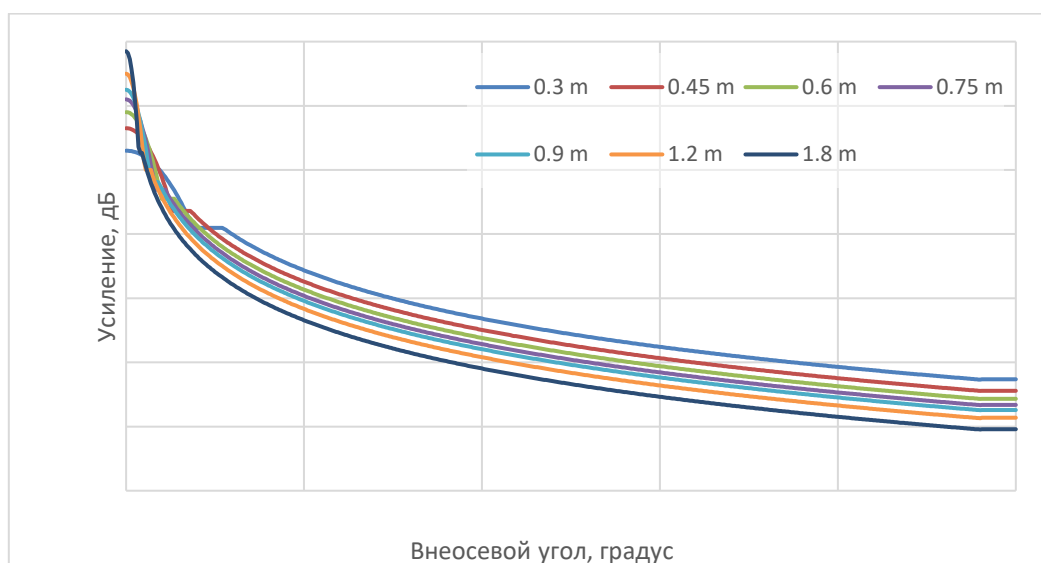


Рисунок 11

Одним из вариантов представления результатов моделирования оценки ЭМС РЭС являются области недопустимого помехового влияния – области пространства, в каждой точке которых РЭС-рецептор испытывает недопустимое помеховое влияние РЭС-источника помех: $\Delta I > 0$.

Результаты моделирования представлены на плоскости в декартовой системе координат. В начале координат зафиксировано положение РЭС-источника (РРС). Ориентация основного излучения (главного лепестка ДНА РРС) в азимутальном и угломестном направлении 0° .

В процессе моделирования ЗС перемещается по всей координатной плоскости, при этом ориентация передающей антенны ЗС сохраняется постоянной. Для каждого местоположения ЗС вычисляется величина потерь передачи между ЗС и типовой РРС и отображается в соответствии с цветовой градацией.

Усиление антенны ЗС в направлении станции РРС зависит от местоположения земной станции и угла наведения антенны, а усиление антенны РРС в направлении ЗС зависит от местоположения станции ЗС.

Результаты моделирования типовых координационных зон, обеспечивающих защиту ЗС от помехового воздействия со стороны РРС, представлены на рис. 12-15. Координационные зоны рассчитаны для типовых сценариев направленности антенн ЗС 180° , 135° , 90° и 0° . Угломестное положение антенны ЗС соответствует 15° и характеризует наихудший случай помехового воздействия излучений РРС.

По полученным результатам при угле места 15 градусов требуемое расстояние сильно зависит от азимутального направления наведения антенны ЗС, то есть от азимутального местоположения КА.

Необходимое расстояние обеспечения ЭМС составляет порядка $4-9$ км и $1-4$ км, когда ЗС располагается вне зоны действия главного луча станции РРС (рис. 12-15) – помеховый сценарий «БЛ-БЛ».

На рис. 12 показаны зоны помехового воздействия РРС на ЗС при наведении антенны ЗС на КА: азимут 135° , угол места 15° . На рис. 13 показаны зоны помехового воздействия РРС на ЗС при наведении антенны ЗС на КА: азимут 90° , угол места 15° . На рис. 14 зоны помехового воздействия РРС на ЗС при наведении антенны ЗС на КА: азимут 0° , угол места 15° . На рис. 15 зоны помехового воздействия РРС на ЗС при наведении антенны ЗС на КА: азимут 180° , угол места 15° .

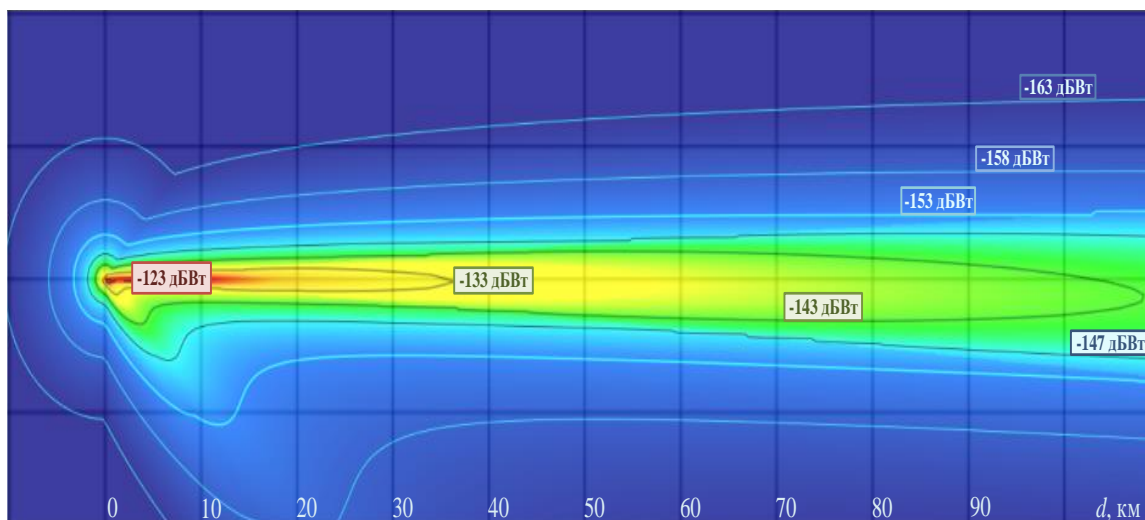


Рисунок 12

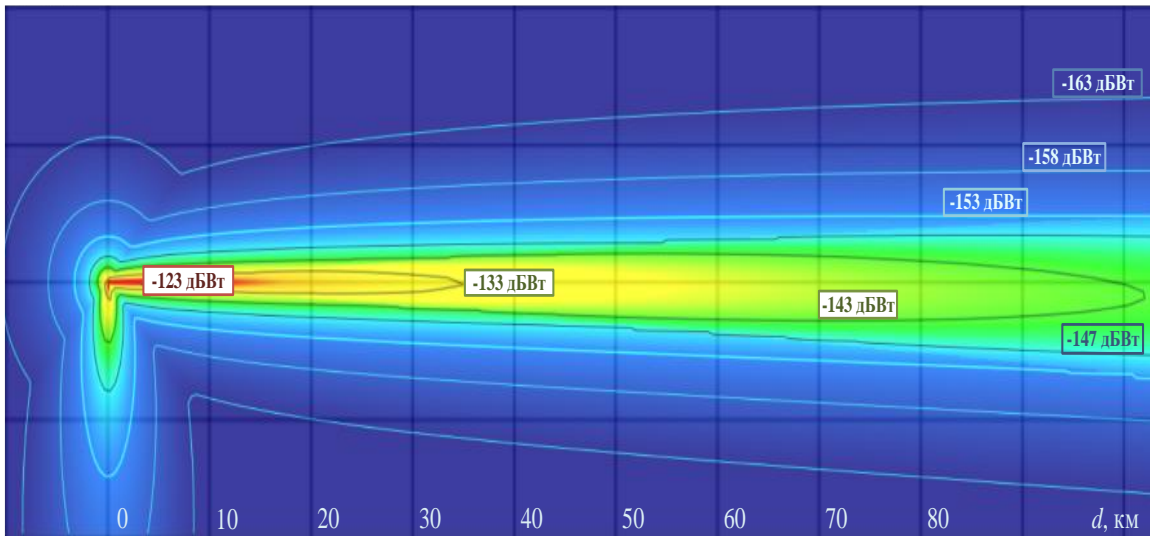


Рисунок 13

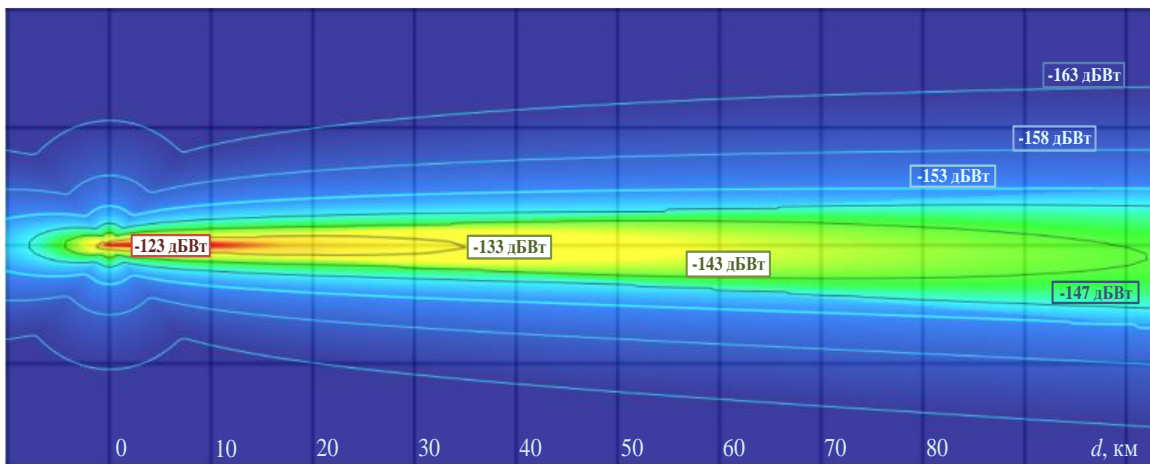


Рисунок 14

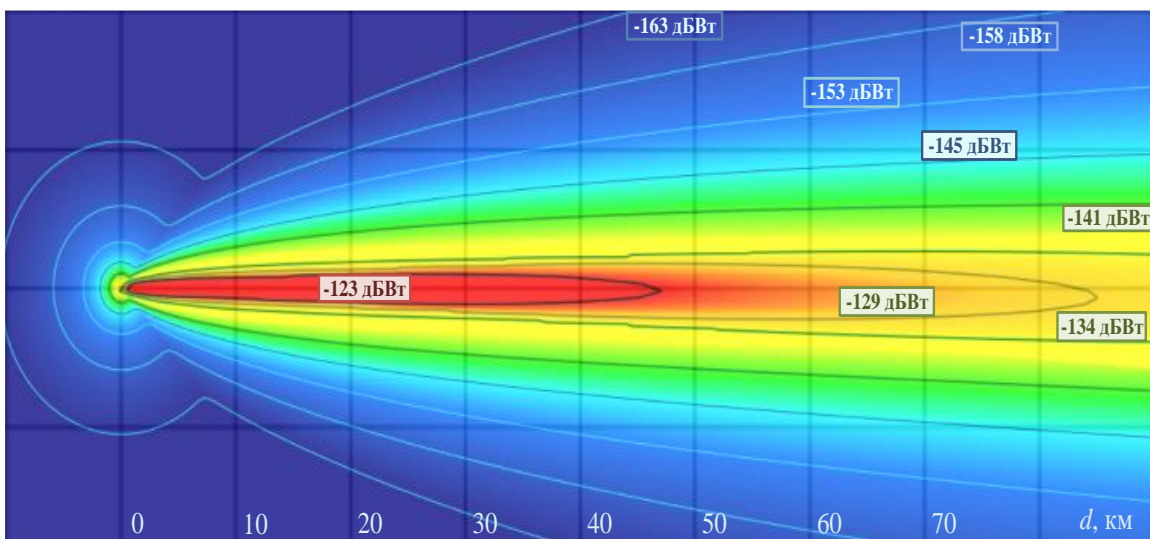


Рисунок 15

Наиболее сильное помеховое воздействие наблюдается в зоне главного луча ДНА РРС – помеховый сценарий «ГЛ-ГЛ». Требуемое расстояние в этом случае не превышает 43 км (рис. 15).

Данное моделирование проведено в соответствии со следующими допущениями:

– распространение происходит в зоне прямой видимости и дифракционными потерями можно пренебречь $Ld(p) = 0$;

– потери передачи не учитывают влияние препятствий, расположенных вблизи антенн $A_h = 0$.

Уточнение типовых координационных зон РРС на ЗС возможно при детальном анализе параметров размещения ЗС, учитывающих особенности рельефа местности, наличия затенений и реальных высот подвеса антенн группировки РРС в местах планируемого размещения шлюзовых станций ЗС проектируемой спутниковой группировки.

Заключение

По результатам проведенной оценки ЭМС ЗС с РЭС фиксированной службы получены численные значения прогнозируемого уровня помех, создаваемых группировкой РРС на уровень реальной чувствительности приемника ЗС. С целью компенсации этого превышения – создания условий обеспечения ЭМС – можно воспользоваться организационными или техническими мерами обеспечения ЭМС. Для реализации технических мер необходима корректировка технических характеристик основных функциональных узлов проектируемых РЭС ЗС: параметров антенн и приемников. Для параметров антенн – это снижение среднего уровня боковых лепестков ДНА.

Литература

1. Ciesin C. «Gridded population of the world version 4 (gpwv4): population density grids» Palisades, NY: Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), Columbia University, 2005.
2. Cameron B., I. del Portillo., Crawley E. March. Ground segment architectures for large LEO constellations with feeder links in EHF-bands, 2018 IEEE Aerospace Conference, IEEE, 2018.
3. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGAII Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, 2002. – Vol. 6. – № 2. – pp. 182-197.
4. Рекомендация МСЭ-R 618-12 Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования систем связи Земля-космос.
5. Рекомендация МСЭ-R P.676-10 Затухание в атмосферных газах (Вопрос МСЭ-R 201/3).
6. Рекомендация МСЭ-R P.840-6 Ослабление из-за облачности и тумана (Вопрос МСЭ-R 201/3).
7. Рекомендация МСЭ-R P.837-5, Характеристики осадков, используемые при моделировании распространения радиоволн (Вопрос МСЭ-R 201/3).
8. Рекомендация МСЭ-R P .838-3 Модель погонного ослабления в дожде, используемая в методах прогнозирования (Вопрос МСЭ-R 201/3).
9. МСЭ-R P.839-4 Модель высоты слоя дождя, используемая в методах прогнозирования (Вопрос МСЭ-R 201/3).
10. Единый технический справочник РЭС и ВЧУ, <http://www.ets-res.ru>. (дата обращения: 18.06.2022).

11. ФАИС, Федеральная автоматизированная информационно-аналитическая система в области использования радиочастотного спектра и средств массовой информации, <http://fais-rfs.ru/> (дата обращения: 18.06.2022).
12. Акики Д., Биайнех В., Нассар Е., Хармуш А. «Снижение уровня боковых лепестков зеркальных антенн методом позиционирования металлических полосок в раскрыве. Университет «Нотр Дам», г. Триполи, Ливан.
13. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. – М.: Техносфера, 2012. – 560 с.
14. Анпилогов В., Эйбус А. Неэквидистантная антенная решетка с низким уровнем боковых лепестков. Технологии и средства связи, 2017. – № 2 (119). – С. 40-43.
15. ITU-R SF 1006 Determination of the interference potential between earth stations of the fixed-satellite service and stations in the fixed service.
16. Рекомендация МСЭ R-341 Концепция потерь передачи для радиолиний (1959-1982-1986-1994-1995-1999-2016).
17. Рекомендация МСЭ-R P.452-15. Процедура прогнозирования для оценки помех между станциями, находящимися на поверхности Земли, на частотах выше приблизительно 0,1 ГГц (Вопрос МСЭ-R 208/3).
18. Рекомендация МСЭ-R P.526. Распространение радиоволн за счет дифракции (Вопрос МСЭ-R 202/3).
19. Рекомендация ITU-R F.699. Эталонные диаграммы направленности антенн фиксированных беспроводных систем для использования при изучении вопросов координации и оценке помех в диапазоне частот от 100 МГц до примерно 70 ГГц.
20. Решение ГКРЧ от 25.06.2007 г. № 07-21-02-001 «О выделении полосы радиочастот 17,7-19,7 ГГц для радиорелейных станций прямой видимости». [Электронный ресурс] <https://docs.cntd.ru/document/902056871> (дата обращения: 18.06.2023).