

УДК 621.396

ОЦЕНКА ЭМС VSAT И РАДИОРЕЛЕЙНЫХ СТАНЦИЙ ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ В KU-ДИАПАЗОНЕ

Н. И. Харитонов, начальник отдела ФГУП НИИР

В. Т. Ермилов, зам. начальника лаборатории ФГУП НИИР, к. т. н.; ermilov@niir.ru

Г. И. Масайлов, студент МФТИ

Ключевые слова: VSAT-станция (станция с антенной очень малой апертуры), радиорелейная станция, статистическое моделирование, метод Монте-Карло, вероятность появления помехи.

Постановка задачи. Практика развития мирового телекоммуникационного рынка показала неоспоримые преимущества технологии VSAT перед технологией обычных земных станций спутниковой связи (ЗССС) фиксированной спутниковой службы (ФСС), что обусловило их широкое применение во всем мире.

Упрощение нормативного регулирования частотного обеспечения и ввода в эксплуатацию ЗССС, работающих по технологии VSAT (VSAT-станций) в ФСС, привело к существенному снижению временных и финансовых затрат сетевых спутниковых операторов и стимулировало внедрение VSAT-станций на территории России.

Этому способствовало принятие за последние годы ряда решений ГКРЧ, одним из которых является общее Решение ГКРЧ от 26.02.2008 № 08-23-03-001 «Об упрощении процедур частотного обеспечения и применения земных станций спутниковой связи технологии VSAT на территории Российской Федерации». Согласно данному решению выделение гражданам России ряда полос радиочастот в пределах полосы 14,0...14,399 ГГц (Земля-космос) и, соответственно, на прием производится без оформления частных решений ГКРЧ для каждого конкретного типа VSAT-станций, работающих через бортовые ретрансляторы космических аппаратов типа «Экспресс» и «Ямал». Таким образом, сегодня пользователи освобождаются от оформления разрешений на использование радиочастот или радиочастотных каналов в пределах выделенных полос при выполнении ряда условий, среди которых можно выделить следующие:

- основные технические характеристики применяемых VSAT-станций должны соответствовать рекомендациям МСЭ-R S.725, S.729, в том числе: мощность передатчика не должна превышать 2 Вт, ЭИИМ — не более 50 дБВт, диаметр антенны — от 0,6 до 2,4 м;

- VSAT-станции не должны создавать вредных радиопомех и не могут требовать защиты от радиопомех со стороны действующих РЭС различного назначения.

Регистрация VSAT-станции может проводиться на основании разрешения на использование радиочастот или радиочастотных каналов пользователя радиочастотным спектром — владельца Центральной станции сети VSAT ФСС.

Цель статьи — показать возможность распространения указанного решения на полосу радиочастот 14,399...14,5 ГГц и, таким образом, обосновать введение регистрационного принципа частотного обеспечения и ввода в эксплуатацию VSAT-станций во всей полосе 14,0...14,5 ГГц.

Отличие полосы частот 14,0...14,4 ГГц от полосы 14,4...14,5 ГГц состоит в том, что в последней работают радиоэлектронные средства (РЭС) фиксированной службы (ФС), к которым относятся радиорелейные станции (РРС) прямой видимости гражданского и специального назначения.

Анализ решений ГКРЧ для данной полосы частот показывает, что всего для создания сетей связи различного назначения было принято 811 решений, в том числе 126 — для РЭС ФСС и 685 — для РРС. Из приведенных данных следует, что должен быть проведен анализ возможности совместной работы указанных типов РЭС и определены условия обеспечения их электромагнитной совместимости (ЭМС).

В основу решения этой задачи положен метод статистического моделирования (метод Монте-Карло), рекомендованный МСЭ-R для исследования совместной работы РЭС различного назначения [1].

Метод статистического моделирования. Метод Монте-Карло — численный метод, основанный на моделировании выборки исследуемой случайной величины с целью получения ее вероятностных характеристик. Фактически он сводится к формированию выборки случайных чисел с заданным законом распределения и дальнейшему функциональному преобразованию сгенерированных чисел для получения выборки исследуемой случайной величины. При этом требуется увеличение объема вычислений для получения большой выборки, на основе которой происходит оценка функции распределения искомой случайной величины. Вычислительная сложность метода Монте-Карло зависит линейно от количества случайных величин и их преобразований.

Для упрощения использования метода был разработан программный пакет SEAMCAT (Spectrum Engineering Advanced Monte-Carlo Analysis Tool), что можно перевести как система анализа ЭМС на основе метода Монте-Карло. Данная программа разрабатывается с 1997 г., и на данный момент (2010 год) уже выпущена третья версия программного пакета, которая активно применяется для статистического анализа ЭМС (особенно в области сотовой связи и беспроводного доступа) в рамках исследований, проводимых СЕРТ [2].

В программе SEAMCAT могут учитываться фактически все помеховые ситуации при исследовании как совместных (совместное использование частот), так и соседних каналов. Такая универсальность достигается тем, что системные параметры определяются как постоянные или переменные величины посредством их функций распределения.

Программное обеспечение SEAMCAT содержит следующие основные блоки: пользовательский интерфейс, си-

стемный менеджер, блок формирования функций распределения, менеджер базы данных (БД) технических параметров, менеджер БД результатов, блок подготовки отчетов по результатам моделирования.

В качестве случайных величин при моделировании выбирались следующие параметры:

- частотные присвоения источников помех (VSAT-станций) в полосе частот 14,4...14,5 ГГц (по равномерному закону);

- расположение антенн VSAT-станций по высоте (по нормальному закону);

- расстояние от VSAT-станции до PPC (по равномерному закону);

- распределение азимутов пролетов PPC (по равномерному закону во всем диапазоне углов от 0 до 360°);

- частотные присвоения PPC в полосе частот 14,4...14,5 ГГц (по равномерному закону).

Энергетические и технические характеристики VSAT-станций и PPC, плотность размещения источников помех, углы места VSAT-станций и другие необходимые параметры задавались в различных вариантах моделирования в качестве детерминированных значений. В соответствии с Рекомендацией МСЭ-R F.636-3 и ГОСТ Р50765-95 высота антенны приемников и передатчиков PPC была принята 50 м. Каждый вариант моделирования включал выборку и обработку 20000 событий, реализующих заданные функции распределения искомых случайных величин.

Если в каком-либо событии уровень помехи на входе PPC превышал допустимую величину, то фиксировалось нарушение нормальной работы PPC, а после обработки всех событий определялась вероятность появления недопустимых помех. В качестве критерия появления помехи было выбрано отношение мощности сигнала к мощности помехи на входе приемника PPC.

Сценарий моделирования состоит из следующих элементов:

Распределение пространственного положения VSAT-станций относительно приемников помех (PPC), включающее одновременное воздействие на приемники PPC излучений от VSAT-станций с различной плотностью размещения по территории вокруг PPC и задаваемый радиус воздействия помех. Можно выделить четыре основных варианта распределения, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Вариант распределения	Плотность размещения, VSAT/км ²	Радиус вокруг PPC, км	Число одновременно работающих передатчиков VSAT
1	0,109	12,0	50
2	0,077	10,5	27
3	0,084	7,3	14
4	0,042	7,3	7

Все варианты по плотностям размещения VSAT-станций пропорциональны плотностям населения, проживающего в четырех типах территориальных образований (с учетом того, что в полосе частот 14,399...14,5 ГГц на территории РФ работают 5000 VSAT-станций, при этом одна станция приходится на 19000 человек):

- города-миллионники (с населением более 1 млн человек);

Таблица 2

Класс станции	Предельные параметры			
	ЭИИМ, дБВт	Мощность ПРД, Вт	Диаметр антенны, м	
			Мин.	Макс.
VSAT-Ku1	34	0,5	0,6	1,8
VSAT-Ku2	50	2	0,9	2,4
VSAT-Ku3	60	20	1,2	3,8

- города с населением от 500 тыс. до 1 млн человек;
- города с населением от 250 до 500 тыс. человек;
- города и другие территориальные образования с населением менее 250 тыс. человек.

Число городов различных типов, площади и число жителей было взято по данным Федеральной службы государственной статистики России.

Исходные данные для VSAT-станций. Основные параметры приведены в табл. 2.

Основные характеристики, определяющие ЭМС VSAT-станций, соответствуют гармонизированному стандарту ЕТСИ EN 301 428. Режим работы VSAT-станций — круглосуточный.

Исходные данные для PPC. К концу 2009 г. в полосе радиочастот 14,4...14,5 ГГц в России находилось в эксплуатации 223 PPC. В Рекомендации МСЭ-R F.1094 записано, что в качестве модели целесообразно использовать реальные характеристики действующих PPC, а не понятие «типичной» радиорелейной системы.

В табл. 3 приведены параметры PPC, которые работают на территории Российской Федерации в полосе частот 14,4...15,35 ГГц (по тактико-техническим данным, приведенным в карточках ГКРЧ).

Выбор модели распространения радиоволн. С учетом того, что длина пролета почти всех PPC не превышает 35 км, PPC относятся к РЭС прямой видимости и выбрана модель свободного пространства.

Результаты моделирования. По описанным сценариям с использованием программы SEAMCAT было проведено статистическое моделирование влияния VSAT-станций на PPC.

Влияние плотности размещения VSAT-станций на вероятность появления помех на PPC. В табл. 4 приведены значения полученных вероятностей недопустимых помех ($P_{\text{пом}}$) на PPC от станций класса VSAT-Ku2 с антенной 0,9 м и передатчиком мощностью 2,0 Вт при скорости передачи информации 256 кбит/с (4-ФМн, FEC = $3/4$).

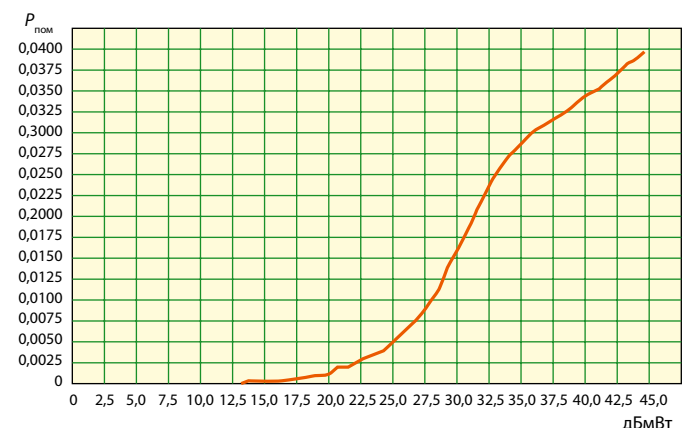


Рис. 1

Приемниками помех при проведении расчетов были взяты наиболее массовые в России типы РРС: Paso-Link 15G, Eclipse15 и др. с диаметрами антенн (D_a) от 0,3 до 1,8 м, полосой пропускания приемника от 3,5 до 28 МГц; длиной пролета — до 30—35 км, уровнем боковых лепестков — минус 30 дБ.

Сравнение значений $P_{\text{пом}}$ по всем вариантам показывает, что влияние плотности размещения VSAT-станций на вероятность появления помех на РРС значительно ($P_{\text{пом}}$ изменяется почти в 4 раза). Типичный график зависимости вероятности помехи от мощности передатчиков VSAT-станций для варианта 1—1 (РРС с $D_a = 0,3$ м и $\Delta f = 3,5$ МГц) приведен на рис. 1.

Получены следующие, усредненные по всем типам территориальных образований России с весовыми коэффициентами, пропорциональными численности населе-

ния городов и населенных пунктов (сумма весовых коэффициентов равна 1), величины $P_{\text{пом}}$: 0,013 (для вариантов 1—1÷4—1); 0,033 (для вариантов 1—2÷4—2); 0,090 (для вариантов 1—3÷4—3).

Влияние VSAT-станций различных классов на вероятность $P_{\text{пом}}$. Влияние это существенно. Например, для варианта 2 при воздействии на РРС с антенной 0,3 м и $\Delta f = 3,5$ МГц значения $P_{\text{пом}}$ изменяются от 0,003 до 0,090 (табл. 5).

Таблица 5

Класс VSAT-станции	$P_{\text{пом}}$
VSAT-Ku1	0,003
VSAT-Ku2	0,021
VSAT-Ku3	0,090

Таблица 3

Параметры	Типы РРС				
	Paso-Link 15 G	Mini-Link 15	Eclipse 15	DMC XP	Alcatel 9415
Вид модуляции	4-ФМн	4-ФМн	КАМ	4-ФМн	4-ФМн
Пропускная способность, Мбит/с	4	4	4	2	34
Разнос каналов, МГц	14,28	14,28	14,28	14,28	14,28
Коэффициент усиления антенны (максимальный), дБи	31,1	30,6	30,6	30,5	36,5
	46,1	35,5	46,3	36,6	
Ширина ДН антенны на уровне -3 дБ, град.	4,5	4,7	4,7	4,7	4,6
	0,8	2,4	0,8	2,4	
Потери в фидере (минимальные), дБ	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Тип антенны	Параболическая	Зеркальная	Параболическая	Параболическая	Параболическая
Уровень боковых лепестков, дБ	-30	-20	-30	-30	-25
Максимальная выходная мощность передатчика, дБм	23	25	27	20	22
ЭИИМ (максимальная), дБВт	39,1	30,5	43,3	26,6	28,5
Полоса пропускания приемника по ПЧ, МГц	3,5...28	3,2...57,8	3,5... 28	10	28
Чувствительность приемника пороговая, дБм	-81... -90,5	-118	-69	-90	-90
Чувствительность приемника реальная, дБм	-77...-87	-113... -84	-65	-83	-83
Отношение сигнала к помехе, дБ	12	30	12	30	30
Длина пролета, км	до 30	18...50	до 30	25	30...38
Уровень сигнала на входе приемника при коэффициенте ошибок на бит 1×10^{-3} , дБВт	-107...-117	-143...-114	-95	-113	-113

Таблица 4

VSAT-Ku2 Угол места антенн, град.	$P_{\text{пом}}$ для РРС с D_a , равным									Варианты
	0,3 м при Δf , МГц			0,6 м при Δf , МГц			1,8 м при Δf , МГц			
	3,5	10,0	28,0	3,5	10,0	28,0	3,5	10,0	28,0	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
7	0,025	0,06	0,16	0,0011	0,0029	0,0083	~0	~0	~0	1
37	0,026	0,07	0,17	0,0011	0,0029	0,0083	~0	~0	~0	(1—1÷1—9)
7	0,015	0,035	0,10	0,0007	0,0024	0,0054	~0	~0	~0	2
37	0,016	0,036	0,11	0,0007	0,0024	0,0054	~0	~0	~0	(2—1÷2—9)
7	0,012	0,020	0,055	0,0005	0,0022	0,0051	~0	~0	~0	3
37	0,013	0,021	0,056	0,0005	0,0022	0,0051	~0	~0	~0	(3—1÷3—9)
7	0,0067	0,019	0,053	0,0003	0,0020	0,0049	~0	~0	~0	4
37	0,0067	0,020	0,054	0,0003	0,0020	0,0049	~0	~0	~0	(4—1÷4—9)

* Δf — полоса пропускания приемника РРС.

Таблица 6

Параметры РРС	Значение параметра	$P_{\text{пом}}$ для РРС с D_a , равным					
		0,3 м при Δf , МГц			0,6 м при Δf , МГц		
		3,5	10,0	28,0	3,5	10,0	28,0
Защитное отношение	12	0,015	0,035	0,100	0,0007	0,0024	0,0054
	30	0,042	0,126	0,289	0,0082	0,0269	0,0742
Чувствительность приёмника, дБм	-65	0,0127	0,0371	0,0984	0,0007	0,0017	0,0049
	-90	0,0125	0,0372	0,0978	0,0006	0,0020	0,0049
	-113	0,0114	0,0370	0,0967	0,0008	0,0020	0,0050

Влияние угла места антенн VSAT-станций на вероятность появления помех на РРС. Это влияние, как видно из табл. 4, незначительно, что дает основание исключить ограничение работы VSAT-станций по углу места.

Влияние ширины полосы пропускания приемника РРС на вероятность появления помехи. Такое влияние существенно. Например, при работе станции класса VSAT-Ku2 с $D_a = 0,9$ м значение $P_{\text{пом}}$ изменяется от 0,025 до 0,16 при воздействии на РРС с $\Delta f = 3,5$ МГц и $\Delta f = 28$ МГц соответственно (вариант 1) и от 0,0067 до 0,054 при действии на РРС с $\Delta f = 3,5$ МГц и $\Delta f = 28$ МГц в варианте 4, т. е. более чем в 4 раза.

Влияние диаметра антенны РРС на вероятность появления помехи. Из приведенных в табл. 4 данных следует, что размер антенны РРС является существенным фактором, влияющим на величину $P_{\text{пом}}$. Самые распространенные РРС в Российской Федерации имеют диаметр антенны 0,3, 0,6 и 1,8 м. Расчеты показывают, что даже при самых неблагоприятных условиях вероятность помехи на РРС с антенной диаметром 1,8 м близка к нулю. При переходе от РРС с $D_a = 0,3$ м к РРС с $D_a = 0,6$ м значение $P_{\text{пом}}$ уменьшается в 20—25 раз и ни при каких условиях не превышает 1 %.

Влияние отношения сигнала к помехе C/I на входе приемника РРС на вероятность появления помехи. Защитное отношение C/I приемника РРС изменяется от 12 до 30 дБ.

Для варианта 2 при источнике помех VSAT-Ku2 пример оценки приведен в табл. 6, из которой следует, что при изменении отношения C/I на 18 дБ вероятность помехи изменяется только в 4 раза (для РРС с $D_a = 0,3$ м).

Влияние чувствительности приемника РРС на вероятность появления помехи. Реальная чувствительность при-

емника РРС может изменяться в пределах от — 65 дБм до — 113 дБм. При этом результаты моделирования показывают (для варианта 2 при действии источника помехи VSAT-Ku2), что значение $P_{\text{пом}}$ изменяется незначительно (см. табл. 6).

Условия обеспечения совместной работы VSAT-станций и РРС. В случае появления недопустимой помехи на конкретной площадке РРС от VSAT-станции необходимо обеспечить условия совместной работы РЭС. Наиболее эффективным методом для этого является реализация норм частотно-территориального разнеса (ЧТР) между данными РЭС [3].

Нормы ЧТР представляют собой предельные численные значения разнесов, при которых обеспечивается электромагнитная совместимость между РЭС. При этом влияние рельефа местности на распространение радиосигналов, как правило, не учитывается. Таким образом, если истинные частотно-территориальные разнесы РЭС превышают значения норм ЧТР, то ЭМС между РЭС считается обеспеченной. В противном случае на оцениваемые РЭС необходимо наложить дополнительные ограничения (частотные, пространственные или энергетические).

Нормы ЧТР имеют широкий разброс по расстояниям между РЭС и частотам разнеса. Для данной задачи типичными значениями являются нормы ЧТР порядка 5—20 км по расстоянию и 10—20 МГц — по частоте (для главных лепестков ДН антенны РРС и боковых лепестков VSAT-станций) и 0,1—2 км и 1—20 МГц по частоте (для боковых лепестков ДН антенны РРС и боковых лепестков VSAT-станций) для углов места VSAT-станций 7—10°.

Как правило, излучения от VSAT-станций действуют от боковых и задних (фоновых) лепестков ДН антенны на боковые и задние лепестки ДН антенны РРС. В этом случае частотная расстройка между передатчиками VSAT-станций и приемниками РРС на 5—10 МГц в большинстве случаев будет достаточной для обеспечения ЭМС. В случае появления помехи такая полоса вокруг несущей передатчика РРС может служить запретной для работы VSAT-станции.

Пример норм ЧТР между VSAT-станциями и РРС показан на рис. 2.

Выводы. Анализ результатов статистического моделирования показывает, что наиболее существенными факторами, влияющими на вероятность появления недопустимых помех на РРС от VSAT-станций, являются:

- плотность размещения VSAT-станций по территориальным образованиям Российской Федерации;
- ширина полосы пропускания приемника РРС;
- диаметр антенны РРС (уровни боковых лепестков антенны);
- отношение сигнал/помеха приемника РРС;

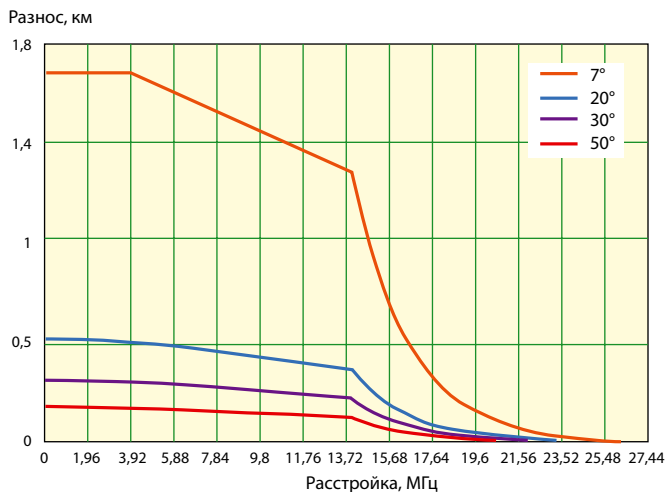


Рис. 2

• скорость передачи информации от VSAT-станций (ширина спектра основного излучения передатчика), мощность излучения VSAT-станции.

Из результатов моделирования также видно, что вероятность недопустимой помехи, как правило, невелика. Ее значение находится, в основном, в диапазоне от долей процентов до единиц процентов. И только в редких случаях (при широкой полосе пропускания приемника, минимальном диаметре антенны РРС, большой энергетике VSAT-станций) $P_{\text{пом}}$ может достигать десятков процентов. При этом очевидно, что полученные значения помех завышены, поскольку модель не учитывает рельефа местности (расчеты предполагают незатененное распространение помехи). Кроме того, предполагается, что все источники помех работают круглосуточно, тогда как в реальных условиях VSAT-станции работают не постоянно, т.е. значения вероятностей помехи ниже указанных. Однако при появлении помехи должна быть процедура по ее определению

на РРС и принятию мер по устранению помехи оператором VSAT-станции.

На основе данных исследований в феврале 2010 г. ГКРЧ принято решение по введению регистрационного принципа частотного обеспечения и ввода в эксплуатацию VSAT-станций в полосе радиочастот 14,4...14,5 ГГц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Report ITU-R SM.2028—1 Monte-Carlo simulation methodology for the use in sharing and compatibility studies between different radio services or systems (Question ITU-R 211/1).
2. ERC Report 68. Monte-Carlo simulation methodology for the use in sharing and compatibility studies between different radio services or systems. Baden: ERC, 2002.
3. **Ермилов В. Т.** Новый этап в нормативном регулировании сетей VSAT//Электросвязь. — 2004. — № 4.

Получено 3.02.10